

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE QUÍMICO FARMACOBIOLOGÍA

PROGRAMA INSTITUCIONAL DE MAESTRÍA  
EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

**CARACTERIZACIÓN DE LOS PRINCIPALES  
COMPONENTES DEL NOPAL FORRAJERO  
(*Opuntia ficus-indica*) DESHIDRATADO.**

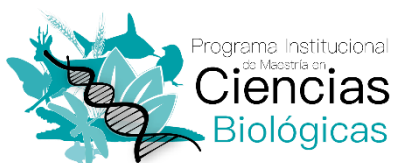
TESIS

Para obtener el grado de  
MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA

M.V.Z. Isáí Pérez Servín

Morelia, Michoacán. Agosto del 2021.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

---

---



FACULTAD DE QUÍMICO FARMACOBIOLOGÍA

PROGRAMA INSTITUCIONAL DE MAESTRÍA EN CIENCIA BIOLÓGICAS

**Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado.**

**TESIS**

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

Presenta:

M.V.Z. Isaí Pérez Servín

Director de tesis:

Dra. Rosa Elena Pérez Sánchez

Co director:

Dra. Georgina Carbajal de la Torre

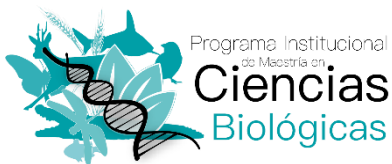
Comité tutorial:

Dr. Héctor Eduardo Martínez Flores

M.C. Ruy Ortiz Rodríguez

Dr. Juan José Valdez Alarcón

Morelia, Michoacán. Agosto del 2021.



## Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por brindarme el apoyo económico durante el proceso, y por promover la investigación e innovación científica.

Agradezco a los doctores y profesores investigadores, así como a los técnicos por compartir su conocimiento, por su interés y disposición que mostraron al colaborar para llevar a cabo el trabajo de investigación y la elaboración del presente documento.

A la Facultad de Químico Farmacobiología, Medicina Veterinaria y Zootecnia y al Instituto de Investigaciones de Metalurgia y Materiales por brindarme el espacio, equipo y material para el desarrollo de este proyecto.

## ÍNDICE

<b>Resumen .....</b>	<b>1</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>2</b>
<b>Introducción general.....</b>	<b>3</b>
<b>Hipótesis .....</b>	<b>5</b>
<b>Objetivo general.....</b>	<b>5</b>
<b>Objetivos particulares.....</b>	<b>5</b>
<b>Metodología general.....</b>	<b>6</b>
<b>Cinética de secado del nopal forrajero (<i>opuntia ficus-indica</i>) deshidratado a diferentes temperaturas. ....</b>	<b>7</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>7</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>8</b>
<b>Material y métodos .....</b>	<b>9</b>
<b>Resultados y discusión .....</b>	<b>12</b>
<b>Conclusión .....</b>	<b>16</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>16</b>
<b>Cambios en los grupos funcionales y compuestos cristalinos del nopal (<i>opuntia ficus-indica</i>) deshidratado a diferentes temperaturas .....</b>	<b>18</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>18</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>19</b>
<b>Material y métodos .....</b>	<b>20</b>
<b>Resultados y discusión .....</b>	<b>21</b>
<b>Conclusión .....</b>	<b>26</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>26</b>

<b>Composición química del nopal forrajero (<i>opuntia ficus-indica</i>) deshidratado a diferentes temperaturas .....</b>	<b>28</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>28</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>29</b>
<b>Materiales y métodos.....</b>	<b>30</b>
<b>Resultados y discusión .....</b>	<b>32</b>
<b>Conclusión .....</b>	<b>40</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>40</b>
<b>Caracterización de la fibra dietética total del nopal forrajero (<i>opuntia ficus-indica</i>) deshidratado a diferentes temperaturas. ....</b>	<b>44</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>44</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>45</b>
<b>Material y métodos.....</b>	<b>46</b>
<b>Resultados y discusión .....</b>	<b>48</b>
<b>Conclusión .....</b>	<b>57</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>58</b>
<b>Caracterización de mucílago del nopal forrajero (<i>opuntia ficus-indica</i>) deshidratado a diferentes temperaturas.....</b>	<b>61</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>61</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>62</b>
<b>Material y métodos.....</b>	<b>63</b>
<b>Resultados y discusión .....</b>	<b>66</b>
<b>Conclusión .....</b>	<b>71</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>71</b>
<b>Caracterización de la lignina del nopal forrajero (<i>opuntia ficus-indica</i>) deshidratado a diferentes temperaturas.....</b>	<b>73</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>73</b>

<b>Introducción .....</b>	<b>74</b>
<b>Material y métodos .....</b>	<b>75</b>
<b>Resultados y discusión .....</b>	<b>77</b>
<b>Conclusiones .....</b>	<b>81</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>81</b>
<b>Cuantificación de los componentes antioxidantes del nopal forrajero (<i>opuntia ficus-indica</i>) deshidratado a diferentes temperaturas. ....</b>	<b>83</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>83</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>84</b>
<b>Material y métodos .....</b>	<b>85</b>
<b>Resultados y discusión .....</b>	<b>88</b>
<b>Conclusión .....</b>	<b>93</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>93</b>
<b>Discusión general .....</b>	<b>96</b>
<b>Conclusión general.....</b>	<b>103</b>
<b>Bibliografía general .....</b>	<b>104</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>108</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<b>Capítulo I.</b>	
Tabla 1. Modelos matemáticos de las curvas de secado.	11
Tabla 2. Valores de los coeficientes de la regresión, coeficiente de determinación y Chi cuadrada de cada modelo matemático y por tratamiento.	13
<b>Capítulo III.</b>	
Tabla 1. Estadística descriptiva para las variables morfológicas de los cladodios de nopal forrajero ( <i>O. ficus-indica</i> ) de 3.5 meses de edad.	33
Tabla 2. Medias de mínimos cuadrados para las variables del análisis químico proximal del nopal forrajero ( <i>O. ficus-indica</i> ) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.	36
Tabla 3. Medias de mínimos cuadrados para las variables pH, sólidos solubles totales y actividad de agua del nopal forrajero ( <i>O. ficus-indica</i> ) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.	38
Tabla 4. Medias de mínimos cuadrados para la variable color de nopal forrajero ( <i>O. ficus-indica</i> ) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.	39
<b>Capítulo IV.</b>	
Tabla 1. Medias de mínimos cuadrados para fibra dietética total, fibra insoluble y fibra soluble del nopal forrajero ( <i>O. ficus-indica</i> ) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.	51
<b>Capítulo V.</b>	
Tabla 1. Medias de mínimos cuadrados para rendimiento y extracción de mucílago de nopal forrajero ( <i>O. ficus-indica</i> ) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.	66
<b>Capítulo VI.</b>	
Tabla 1. Medias de mínimos cuadrados para rendimiento y extracción de lignina de nopal forrajero ( <i>O. ficus-indica</i> ) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.	78
<b>Capítulo VII.</b>	
Tabla 1. Medias de mínimos cuadrados para polifenoles, flavonoides y capacidad antioxidante del nopal forrajero ( <i>O. ficus-indica</i> ) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.	88
Tabla 2. Compendio de valores promedios para polifenoles, flavonoides, carotenoides y capacidad antioxidante del nopal <i>Opuntia ficus-indica</i> reportados en investigaciones previas.	91

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>Capítulo I.</b>	
Figura 1. Comportamiento de la pérdida de peso (%) en relación al tiempo (h) de deshidratación del nopal forrajero ( <i>O. ficus-indica</i> ) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.	12
Figura 2. Modelación de la cinética de secado del nopal forrajero ( <i>O. ficus-indica</i> ) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.	14
<b>Capítulo II.</b>	
Figura 1. Calorimetría de barrido diferencial (DSC) y análisis termogravimétrico (TGA) del nopal forrajero ( <i>Opuntia ficus-indica</i> ) de acuerdo al tratamiento.	21
Figura 2. Espectro infrarrojo del nopal forrajero <i>O. ficus-indica</i> de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.	23
Figura 3. Patrones de digraccion de rayos X del nopal forrajero <i>O. ficus-indica</i> de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.	25
<b>Capítulo III.</b>	
Figura 1. Estructura macroscópica del nopal forrajero ( <i>O. ficus-indica</i> ) de 3.5 meses de edad deshidratado a 50 °C (a), 60 °C (b) y liofilizado (c).	39
<b>Capítulo IV.</b>	
Figura 1. Espectro infrarrojo de la fibra dietética insoluble de nopal forrajero ( <i>O. ficus-indica</i> ) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.	52
Figura 2. Espectro infrarrojo de la fibra dietética soluble de nopal forrajero ( <i>O. ficus-indica</i> ) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.	54
Figura 3. Patrones de digraccion de rayos X de la fibra dietética insoluble de nopal forrajero ( <i>O. ficus-indica</i> ) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.	55
Figura 4. Patrones de digraccion de rayos X de la fibra dietética soluble del nopal forrajero ( <i>O. ficus-indica</i> ) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.	56
<b>Capítulo V.</b>	
Figura 1. Espectro infrarrojo del mucílago de nopal forrajero ( <i>O. ficus-indica</i> ) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.	68
Figura 2. Patrones de digraccion de rayos X del mucílago de nopal forrajero ( <i>O. ficus-indica</i> ) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.	70
<b>Capítulo VI.</b>	
Figura 1. Espectros de masas de la lignina de nopal forrajero ( <i>O. ficus-indica</i> ) de 3.5 meses de edad. Lado izquierdo corresponde al T1, lado derecho corresponde al T2.	80

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

## **CARACTERIZACIÓN DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES DEL NOPAL FORRAJERO (*Opuntia ficus-indica*) DESHIDRATADO.**

### **RESUMEN**

El objetivo fue caracterizar los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado. La investigación se realizó en los laboratorios de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH): Investigación y Análisis de Alimentos (LIDA)-Facultad de Químico Farmacobiología (FQFB); Laboratorio de Nutrición y Fisiología Animal- Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IIAF); Laboratorio de Análisis Químico y en el Laboratorio de Difracción de Rayos X-Instituto de Investigaciones de Metalurgia y Materiales (IIMM). Se utilizaron 30 cladodios de *O. ficus-indica* de 3.5 meses edad, los cuales fueron fraccionados en cubos de 2x2x2 para formar un pool, con el cual se conformaron tres tratamientos (T) con 3.0 kg de nopal/T: T1, proceso de deshidratación (PD) mediante aire caliente a 50 °C; T2, PD a 60 °C y T3, PD por liofilización, este último tratamiento fue el referente de los cambios del nopal sometido a PD a 50 y 60 °C. En cada PD se determinó: pérdida de peso, cinética de secado (CS), humedad (H), proteína (P), extracto etéreo (EE), cenizas (C), fibra dietética total (FDT), fibra soluble (FS), fibra insoluble (FI) extracto libre de nitrógeno (ELN), pH, color, mucílago, lignina, polifenoles totales (PT), flavonoides (F), capacidad antioxidante (CA); así como, los grupos funcionales y compuestos cristalinos. La CS se determinó a través del logaritmo Levenberg-Marquardt; el análisis químico proximal se realizó bajo los criterios de la AOAC; la determinación de PT, F y CA fue mediante espectrometría (UV-vis); la detección de grupos funcionales (GF) fue por espectroscopía infrarroja (FT-IR); los compuestos cristalinos (CC) se detectaron a través de difracción de rayos X (DRX). Se encontró que, los promedios de FS, mucílago y PT fueron mayores ( $p<0.05$ ) en el nopal bajo PD/liofilización. Los valores de P, FDT, FI y pH fueron mayores ( $p<0.05$ ) en el PD a 50 °C vs. PD a 60°C; los valores de lignina y CA fueron mayores ( $p<0.05$ ) en el PD a 60 °C vs. PD a 50 °C. El análisis de FT-IR mostró: mayor presencia de GF (% transmitancia) en nopal liofilizado; en FI y FS, se observó mayor presencia de GF en el PD a 50 °C; en el mucílago, el número de GF fue similar en los tres tratamientos. Los resultados de DRX revelaron que, en el PD a 60 °C se presentó mayor cristalinidad en CC en FI y mucílago vs. PD a 50 °C. En los PD a 50 °C y PD/liofilización los CC se presentaron de forma amorfa. Se logró establecer que, el PD a 50 °C es la estrategia más viable para que los productores de nopal puedan conservarlo, almacenarlo y se implemente en la alimentación animal.

**Palabras clave:** cactácea, liofilización, conservación, cristalización, alimentación.

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

**ABSTRACT**

The objective was to characterize the main components of dehydrated forage cactus (*Opuntia ficus-indica*). The research was carried out in the laboratories of the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH): Investigación y Análisis de Alimentos (LIDA)-Facultad de Químico Farmacobiología (FQFB); Laboratorio de Nutrición y Fisiología Animal- Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IIAF); Laboratorio de Análisis Químico and Laboratorio de Difracción de Rayos X-Instituto de Investigaciones de Metalurgia y Materiales (IIMM). Thirty cladodes (3.5-month-old) of *O. ficus-indica* were used, which were fractionated in 2x2x2 cubes to form a pool, with which three treatments (T) were formed with 3.0 kg of forage cactus·T<sup>-1</sup>: T1, dehydration process (DP) by hot air at 50 °C; T2, DP at 60 °C and T3, DP by freeze-drying, this last treatment was the referent of the changes of the cactus subjected to DP at 50 and 60 °C. In each DP, were determined: weight loss, drying kinetics (DK), moisture (M), protein (P), ethereal extract (EE), ash, total dietary fiber (TDF), soluble fiber (SF), insoluble fiber (IF), nitrogen-free extract (NFE), pH, color, mucilage, lignin, total polyphenols (TP), flavonoids (F), antioxidant capacity (AC), functional groups and crystalline compounds. The DK was determined through the Levenberg-Marquardt logarithm; the proximate chemical analysis was under the AOAC method; the determination of TP, F and AC was by spectrometry (UV-vis); the detection of functional groups (FG) was by infrared spectroscopy (FT-IR); the crystalline compounds (CC) were detected by X-ray diffraction (XRD). It was found that, the averages of SF, mucilage and PT were higher ( $p<0.05$ ) in cactus under DP/ freeze-drying. P, TDF, IF and pH values were higher ( $p<0.05$ ) in DP at 50 °C vs. DP at 60 °C; lignin and AC values were higher ( $p<0.05$ ) in DP at 60 °C vs. DP at 50 °C. FT-IR analysis showed: higher presence of FG (% transmittance) in freeze-dried cactus; in IF and SF, higher presence of FG was observed in DP at 50 °C; in mucilage, the number of FG was similar in the three treatments. XRD results revealed that, in the DP at 60 °C, greater crystallinity was present in CC in IF and mucilage vs. DP at 50 °C. In the DP at 50 °C and DP/lyophilization the CC were presented in an amorphous form. It was established that DP at 50 °C is the most viable strategy for cactus producers to conserve and store it and to implement it in animal feed.

**Key words:** cactus, freeze-drying, conservation, crystallization, feeding.

## INTRODUCCIÓN GENERAL

El nopal (*Opuntia ficus-indica*), se encuentra distribuido en diferentes partes del mundo de forma silvestre y cultivada (Sáenz *et al.*, 2006), debido a que, es una cactácea que tiene características de adaptabilidad en su anatomía, morfología y fisiología que hacen que pueda sobrevivir, crecer y reproducirse en diferentes zonas agroclimáticas (Castillo *et al.*, 2013). Respecto a su anatomía Torres *et al.* (2015) establecen que, el nopal es una planta de tipo arbustivo y cuando su tallo es cilíndrico se considera arborescente; sus ramas están formadas por cladodios, los cuales reciben el nombre de “nopalito” (cladodio para consumo humano no mayor a 1 mes de edad) o “penca” (cladodio en etapa de madurez normalmente mayor a 1.5 meses) (Hernández *et al.*, 2011). En relación a la fisiología se ha descrito que, presenta un metabolismo ácido Crasuláceo, dicho metabolismo acumula el CO<sub>2</sub> de noche en las vacuolas del ácido málico y, en presencia de luz difunde pasivamente el CO<sub>2</sub> al ciclo de Calvin para sintetizar carbohidratos (Osorio *et al.*, 2011).

Esta cactácea se considera endémica del continente americano, se estima que en México se encuentran 100 de las especies existentes, las cuales ocupan una extensión de terreno de 77,878 ha, de las cuales 65,079 se encuentran de forma silvestre; a pesar de las condiciones agroecológicas en donde se desarrolla el nopal, la producción de biomasa de *O. ficus-indica* es de 71 toneladas de materia seca/año/ha(SIAP, 2020), este potencial agrotecnológico de la cactácea es utilizado en la industria alimenticia, farmacéutica, médica, cosmética, de construcción y agropecuaria (Torres *et al.*, 2015). Stintzing y Carle (2005) establecen que el consumo del nopal y su fruta (tuna) se han extendido en varios países. En cuanto a la industria cosmetológica y médica, Guevara (2009) establece que el nopal se utiliza como agente hipoglucemiante, además de su efecto hipocolesterolémico, antimicrobiano y antioxidante.

Finalmente, en la industria agropecuaria, el nopal se implementa como cultivo destinado a la producción de tuna y “nopalito” para consumo humano y como forraje para los animales; el nopal utiliza 267 litros de agua/kg de materia seca comparados con 500, 666 y 1000 litros que usan la cebada, el sorgo y la alfalfa respectivamente (Flores Reveles, 2010), lo que lo convierte en una estrategia de alimentación viable, especialmente en un contexto de producción animal sostenible, y para el productor, lo anterior podría ser atractivo desde el

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

punto de vista económico, ya que el nopal crece todo el año y podría utilizarse en zonas donde el forraje convencional es limitado (Aguilar *et al.*, 2011).

Las investigaciones sobre la aplicación del nopal (*O. ficus-indica*) como forraje para la alimentación animal, han arrojado evidencias sobre los beneficios en el metabolismo de los animales que consumen esta cactácea (Pérez *et al.*, 2015b; Ordaz *et al.*, 2017), y que se reflejan en el incremento de: consumo de alimento (Ortiz *et al.*, 2017), ganancia de peso, conversión alimenticia (Aranda *et al.*, 2008; Gaytán *et al.*, 2017) y en la calidad de la carne (Aranda y Flores, 2011). Las mejoras antes mencionadas pueden explicarse, en parte, a través de ciertas propiedades del nopal, como lo es su actividad hipoglucémica, hipocolesterolémica, capacidad antioxidante y reducción de la velocidad del tránsito gastrointestinal, por mencionar algunos (Martínez *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2017; Bonilla *et al.*, 2017). No obstante, el mecanismo de acción del nopal sobre los cambios que ejerce en el organismo aún no está del todo establecido (Núñez *et al.*, 2013).

Es bien sabido que, la composición de los cladodios de *O. ficus-indica* depende de las condiciones ambientales en las que se desarrolla, además, de la etapa de crecimiento en la que es cosechada y del tratamiento que se le da postcosecha (Betancourt *et al.*, 2006; Rodríguez *et al.*, 2007). Cabe mencionar que, también hay investigaciones orientadas a la caracterización del nopal en cuanto a su estructura, componentes, biodisponibilidad de compuestos y aislamiento de determinado elemento de interés para su análisis, sin embargo, van orientadas especialmente al nopal (*O. ficus-indica*) para consumo humano, el cual cuenta con una edad no mayor a los 30 días (Medina *et al.*, 2011; Figueroa *et al.*, 2018; De Santiago *et al.*, 2018). Lo cual ocasiona que la información sobre las características del nopal forrajero sea escasa, lo que imposibilita en cierta parte la asociación de consumo-efecto que presentan los animales al ser alimentados con dicha cactácea. Es por ello que, el objetivo de la presente investigación es, caracterizar los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado.

## **HIPÓTESIS**

Los principales componentes del nopal forrajero (*O. ficus-indica*) son afectados por la temperatura de deshidratación, así, una temperatura  $>60$  °C mantiene o evita cambios en los componentes de los cladodios de nopal forrajero durante el proceso de deshidratación. Ya que, una mayor temperatura aumenta las reacciones químicas, mediante las cuales se pierden o se modifican las estructuras, aspecto que, impacta en la viabilidad del nopal para ser aplicado en la alimentación animal.

## **OBJETIVO GENERAL**

Determinar y caracterizar los cambios de los principales componentes que presenta el nopal forrajero (*O. ficus-indica*), sometido a deshidratación por aire caliente a 50° y 60° C.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

- Determinar la cinética de secado del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado a diferentes temperaturas (50 °C, 60 °C y liofilizado).
- Establecer los cambios en los grupos funcionales y compuestos cristalinos del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado a diferentes temperaturas.
- Determinar la composición química del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado a diferentes temperaturas (50 °C, 60 °C y liofilizado).
- Extracción y caracterización de la fibra dietética total del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado a diferentes temperaturas (50 °C, 60 °C y liofilizado).
- Extracción y caracterización de mucilago del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado a diferentes temperaturas (50 °C, 60 °C y liofilizado).
- Extracción y caracterización de la lignina del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado a diferentes temperaturas (50 °C, 60 °C y liofilizado).
- Cuantificación de los componentes antioxidantes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado a diferentes temperaturas (50 °C, 60 °C y liofilizado).

## **METODOLOGÍA GENERAL**

Se utilizaron 30 cladodios de nopal forrajero (*O. ficus-indica*) los cuales se obtuvieron de una parcela perteneciente a la unidad Posta Zootécnica de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), ubicada entre las coordenadas geográficas 19° 46' latitud norte y entre 101° 10' longitud oeste, a una altura promedio de 1,855 metros sobre el nivel del mar, con una temperatura media anual es de 21 °C y con una humedad media de 62% (INEGI 2010).

La recolección de los cladodios (n= 30) se realizó a las 7:00 h en el periodo febrero-abril del 2020. La edad de los cladodios fue de 3.5 meses. Inmediatamente después de la recolecta, se lavaron y se desinfectaron con solución de hipoclorito de sodio 3% por 10 min. Después, se fraccionaron en cubos de aproximadamente de 2x2x2 cm; el total de cubos fueron mezclados para hacer una muestra homogénea (pool), con la cual se conformaron tres tratamientos (T) de 3.0 kg/T: T1, nopal deshidratación mediante aire caliente a temperatura de 50 °C; T2, proceso de deshidratación por aire caliente a 60 °C y T3, nopal liofilización.

Los proceso de secado (por aire caliente), análisis químico proximal, determinación de antioxidantes, extracción de fibra (insoluble y soluble) y mucílago se realizaron en el laboratorio de investigación y análisis de alimentos (LIDA) perteneciente a la Facultad de Químico Farmacobiología (FQFB) de la UMSNH, mientras que el proceso de liofilización se realizó en el laboratorio de nutrición y fisiología animal perteneciente al Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IIAF)-UMSNH .

La caracterización de las muestras de nopal deshidratado, fibra insoluble y soluble y mucílago se realizaron mediante las técnicas de análisis de espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier (FT-IR) y análisis de difracción de rayos X (Drx). Los cuales se realizaron en el laboratorio de análisis químico (espectroscopia de infrarrojo) y laboratorio de difracción de rayos X, ambos pertenecientes al Instituto de Investigaciones de Metalurgia y Materiales (IIMM)-UMSNH. Las particularidades referentes al aparato de material y métodos para cada objetivo establecido, se abordarán en los siguientes capítulos.

## Capítulo I

### CINÉTICA DE SECADO DEL NOPAL FORRAJERO (*Opuntia ficus-indica*) DESHIDRATADO A DIFERENTES TEMPERATURAS.

#### RESUMEN

El nopal forrajero (*O. ficus-indica*) tiene un contenido de humedad mayor al 90%, aspecto que lo convierte en un alimento altamente perecedero y además dificulta su almacenaje por largo tiempo, en consecuencia, se ha optado por realizar en el nopal tratamientos postcosecha, para su conservación, almacenaje y comercialización, dentro de los cuales se encuentra el proceso de deshidratación. El objetivo fue determinar la cinética de secado y ajustar un modelo matemático en la deshidratación del nopal forrajero (*O. ficus-indica*) a diferentes temperaturas. Se utilizaron 30 cladodios de nopal de 3.5 meses de edad, los cuales fueron fraccionados en cubos para la deshidratación; los procesos de secado fueron: a) aire caliente a dos temperaturas: 50 °C y 60 °C para cada tratamiento (T), 1 y 2 respectivamente y b) liofilización (T3). El peso constante del nopal se alcanzó a las 48 y 24 h para T1 y T2 respectivamente, por lo que, la pérdida de peso (agua) fue más rápida en T2 ya que el proceso solo duró 32 h en comparación con T1 y T3 que duró 72 h para ambos. Sin embargo, la pérdida de humedad < 7% fue a las 30 h (T1), 24 h (T2) y 48 h (T3), este porcentaje de humedad evita el crecimiento bacteriano. Para los tres tratamientos, el modelo logarítmico fue el que explicó mejor el comportamiento de la deshidratación, con una  $R^2 \geq 0.99$ . La razón de humedad (RM) fue diferente para c/tratamiento: T1, RM= 0.1 a 1170 min; T2, RM= 0.1 a 1033 min y T3, RM= 0.1 a 1764 min. La pérdida de humedad del nopal forrajero es mayor a 60 °C; además, esta temperatura reduce el tiempo de deshidratación, aspecto que se corrobora con la cinética de secado.

**Palabras clave:** cactácea, secado, modelación, cinética

## INTRODUCCIÓN

Actualmente la especie de nopal *Opuntia ficus-indica*, se encuentra distribuido en diversos ecosistemas del mundo, por lo que se reporta en climas donde las temperaturas ascienden a más de 40 °C y descienden hasta los -40 °C; las características de esta cactácea que le permiten adaptarse a este tipo de climas son: su anatomía y fisiología (Saénz y Berger 2006). Se ha propuesto que las raíces de *O. ficus-indica* son superficiales, lo que le permite aprovechar y captar de mejor manera el agua en lluvias esporádicas, y en el periodo de sequía las raíces se modifican de tal forma que impiden la pérdida del líquido vital (Nobel 1998) y, además, los cladodios del nopal cuentan con una cutícula gruesa (13-20 µm) y un parénquima de varias capas, lo cual le permite el almacenamiento de grandes cantidades de agua (Ventura *et al.*, 2017).

La capacidad del nopal de almacenar grandes cantidades de agua lo ha posicionado como una fuente de este líquido en lugares donde es escaso y por ello, se ha implementado como suplemento a la dieta de animales para cubrir o disminuir la ingesta de líquido (Andrade *et al.*, 2011; Costa *et al.*, 2012); además, se ha documentado que el uso de *O. ficus-indica* como forraje en base fresca (BF), incrementa el consumo de alimento (Ordaz *et al.*, 2017), la ganancia de peso (Ortiz *et al.*, 2017), calidad de la carne (Aranda y Flores, 2011), entre otros aspectos.

Aunque los cladodios de nopal en BF son utilizados por sus beneficios, presentan la desventaja de ser altamente perecederos, ya que su contenido de humedad ( $\geq 90\%$ ) (Ventura *et al.*, 2017), provoca una rápida descomposición microbiológica; factor que limita su comercialización o almacenaje en BF durante largo tiempo. Aspectos considerados como una desventaja al momento de implementarlo en los sistemas de producción animal como parte de los insumos de la dieta de los animales. Por lo tanto, una alternativa para el almacenaje del nopal postcosecha ha sido la deshidratación, puesto que, lo que convierte en un producto de fácil transporte y almacenaje, ya que, el deshidratado hace del nopal un producto ligero y prolonga su vida de anaquel (Contreras *et al.*, 2012).

La deshidratación ha sido desde tiempos remotos una alternativa de conservación, pero en la actualidad, el principal objetivo de la eliminación de agua en alimentos, se enfoca en la

preservación de nutrientes, propiedades químicas y compuestos nutraceuticos presentes en el alimento sometido a deshidratación (Karam *et al.*, 2016). Existen diversos métodos para llevar a cabo la desecación, los cuales se engloban en métodos mecánicos y físico-químicos. La evaporación superficial (deshidratación por aire caliente) es el más usado en la industria alimenticia, debido a que la técnica es económica; contrario a éste, el proceso de liofilización es considerado un método de conservación costoso (4-8 veces más que deshidratación por aire caliente), debido al tiempo y la energía que se requiere durante todo el proceso, por lo que está conceptualizado su uso para productos de alto valor, ya que está catalogado como el método por el cual los productos conservan su calidad intacta (Fito *et al.*, 2016; Karam *et al.*, 2016).

Un gran número de investigaciones se han dedicado a realizar estudios sobre la cinética de secado del nopal (Martínez *et al.*, 2010) a diferentes edades (Hernández *et al.*, 2011) a diferentes temperaturas (Núñez *et al.*, 2013) y procesos de deshidratación (Martínez *et al.*, 2015). Cabe mencionar que la mayor parte de dichas investigaciones se han enfocado al nopal para consumo humano, mismo que presenta una edad promedio de 15 días. Es por ello que, el objetivo de la presente investigación fue: determinar la cinética de secado y seleccionar el mejor modelo matemático que se ajuste a las curvas de secado en el nopal forrajero (*O. ficus-indica*) deshidratado mediante horno de aire caliente y liofilizado.

## **MATERIAL Y MÉTODOS**

### ***Preparación de la muestra***

Se utilizaron 30 cladodios de nopal forrajero (*O. ficus-indica*) de 3.5 meses de edad de una parcela perteneciente a la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), ubicada entre las coordenadas geográficas 19° 46' latitud norte y entre 101° 10' longitud oeste, a una altura promedio de 1,855 metros sobre el nivel del mar, con una temperatura media anual es de 21 °C y la humedad media es de 62% (INEGI 2010).

Los cladodios se cosecharon en el periodo de febrero-abril 2020, el corte se realizó por la mañana (7:00 h), después se lavaron y desinfectaron para posteriormente fraccionarlos en

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

cubos de aproximadamente 2 x 2 x 2 centímetros para obtener un pool de muestra, la cual se fraccionó en tres partes; del pool de nopal se tomó una fracción (50 g) para determinar la humedad inicial, de acuerdo al método del manual de la AOAC (1998).

***Proceso de secado de las muestras***

Se llevaron a cabo dos procesos de deshidratación: a) deshidratación por convección y b) proceso de liofilización. La deshidratación por convección se realizó con un horno de secado de aire forzado (Ecoshel®); se utilizaron 6 kg de nopal, con los cuales se formaron dos tratamientos T1 (n= 3 kg) y T2 (n=3 kg) sometidos a temperaturas de secado de 50 °C y 60 °C respectivamente. Para el proceso de liofilización(T3), se utilizaron 3 kg de nopal, los cuales se dividieron en porciones de aproximadamente 70 g, que fueron congelados en nitrógeno líquido y almacenados en un ultra congelador (-70 °C), posteriormente las porciones congeladas se colocaron en la cámara de un equipo Freezone 4.5 LABCONCO™ bajo condiciones de  $-50 \pm 3$  °C de temperatura y 0.110 mBar de vacío.

***Comportamiento de la pérdida de peso de acuerdo a los tratamientos***

Las fracciones del nopal (cubos) del T1 y T2, previo a ser introducidas al horno para iniciar el proceso de secado, se registró el peso (g; h “0”). Una vez iniciada la deshidratación la muestra de nopal se pesó (g) cada h; el proceso de deshidratación concluyó una vez alcanzado el peso constante de las muestras/tratamiento; además, se registró el tiempo que duró dicho proceso/tratamiento. En el caso de T3 el nopal en cubos se pesó previo a ser congelado en nitrógeno. Una vez liofilizado el nopal, se registró el peso a las 24, 48 y 72 h.

***Cinética de secado y modelación matemática***

Las curvas de secado para cada tratamiento (T1, T2 y T3) se construyeron al graficar la razón de humedad (RM) de las muestras de nopal en base seca (BS) vs. el tiempo (min) invertido en cada proceso de deshidratación. RM durante el proceso de secado fue determinada mediante la siguiente ecuación:

$$RM = (M - Me)/(Mo - Me)$$

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

Donde M fue el contenido de humedad en un tiempo específico; Me fue el contenido de humedad en equilibrio y Mo fue el contenido inicial de humedad.

Para la selección del modelo matemático que predijera mejor el comportamiento de la cinética de secado de los datos experimentales se utilizaron tres modelos previamente establecidos para secado de alimentos y usados en previas investigaciones del secado de nopal (Tabla 1).

Tabla 1. Modelos matemáticos de las curvas de secado.

No.	Nombre del modelo	Ecuación del modelo	Referencia
1	Henderson y Pabis	$MR = a * \exp(-b * t)$	Touil <i>et al.</i> (2010)
2	Potencia	$MR = a * t^b$	Martínez <i>et al.</i> (2010)
3	Logarítmico	$MR = a * \exp(-b * t) + c$	Lahsasni <i>et al.</i> (2004)

**Análisis estadístico**

La información recabada se analizó a través de la metodología mediciones repetidas mediante los modelos de efectos fijos (Littell *et al.*, 2002). El modelo matemático para la determinación de pérdida de peso por deshidratación de las muestras de nopal fue el siguiente:

$$y_{ijk} = \mu + T_i + H_j + T(H)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

$Y_{ijk}$ =Variable respuesta (peso en g y porcentaje).

$\mu$ = Promedio general.

$T_i$ = Tratamiento con i ésimo tratamiento = T1, T2 y T3.

$H_j$ = Horas con j ésima= 0, 24, 48 y 72.

$T(H)_{ij}$ = Anidación de tratamiento dentro de hora con el i ésimo tratamiento dentro de la j ésima hora.

$\varepsilon_{ijk}$ = Efecto aleatorio asociado con cada observación ( $\sim NID = 0, \sigma^2_e$ ).

Las diferencias entre tratamientos se obtuvieron a través de medias de mínimos cuadrados (LsMeans) a un  $\alpha=0.05$  (Littell *et al.*, 2002).

Para la cinética de secado y modelación matemática, la información recabada fue analizada a través de tres diferentes modelos matemáticos (Tabla 1). Dichos modelos fueron programados en el módulo de ajuste de curvas del software Origin®, a través del logaritmo

Levenberg-Marquardt, para determinar el modelo que mejor explicara el comportamiento de secado del nopal de cada tratamiento se usó ( $R^2$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### *Comportamiento de la pérdida de peso de acuerdo a los tratamientos*

De acuerdo con la Figura 1, se observa que, a las 24 h post – inicio de la deshidratación de las muestras de nopal, T2 mostró 93.2% de pérdida de peso. Mientras que, el T1 solo presentó un 88.4% de pérdida de peso en el mismo tiempo (24 h); por consiguiente, se llegó a peso constante en diferentes tiempos en ambos tratamientos, en el caso de T1 a las 48 h (5.4 %) y para T2 a las 24 (6.8 %). En relación al T3, su comportamiento fue, a las 24 h posteriores al inicio del proceso, el nopal pierde más del 80% de su peso, pero no es hasta las 72 h que logra la mayor pérdida de peso. En relación a los tiempos de deshidratación independientemente del método, se observa una igualdad entre los tratamientos 1 y 3. Por otro lado, si se toma en cuenta la pérdida de peso en los tres tratamientos, a las 24 h, el T2 es el que se comporta de una mejor manera, con una pérdida mayor al 94%.

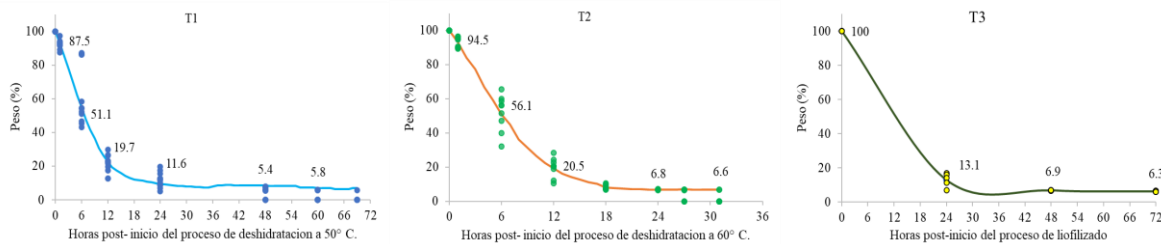


Figura 1. Comportamiento de la pérdida de peso (%) en relación al tiempo (h) de deshidratación del nopal forrajero (*O. ficus-indica*) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.

En el comportamiento de la pérdida de peso durante el secado, T3 desde la hora 33 llega a un valor bajo, al parecer cercana al 6.3% de peso (5.9 % humedad), pero tiende a subir la humedad a la hora 48 (6.4 % humedad) y posteriormente hay un descenso hasta la hora 72. Contrario a ello, en los T1 y T2 la pérdida de peso es muy clara, donde se observa una tendencia a ir disminuyendo hasta que la recta se vuelve asintótica, y se obtiene el peso constante de la muestra de nopal. Por lo tanto, de acuerdo con la Figura 1, una humedad <7% se logra para el T1 a las 33 h, para T2 se logró a las 22 h y finalmente para T3 se logró a las 48 h.

Por su parte, Martínez *et al.* (2015), reportan una humedad de, 6.5% (deshidratación por túnel), 5.2% (deshidratación por lecho fluidizado) y 5.0% (proceso de liofilizado), valores de humedad que, son mayores a los reportados en los tratamientos analizados, sin embargo, los procesos y los tiempos utilizados por dichos autores son diferentes a los de la presente investigación, ya que los tiempos usados dependieron de la obtención del peso contante del nopal en cada tratamiento. No obstante, la pérdida de peso en porcentaje es diferente para cada tratamiento, lo cual indica que, tanto el proceso de deshidratación como la temperatura, influyen en la eliminación de humedad de la muestra de nopal, lo cual se debe tomar en cuenta, ya que, un inadecuado proceso de secado puede impactar negativamente al degradar compuestos y/o afectar en las propiedades del nopal.

### ***Cinética de secado y modelación matemática***

De acuerdo a los valores obtenidos (Tabla 2) en cada modelo matemático, se observó que, dos de los modelos utilizados describen satisfactoriamente el comportamiento del secado del nopal, con un valor de  $R^2 > 0.98$  Henderson y Pabis y el Logarítmico. No obstante, la regresión no lineal usada para estimar los coeficientes (a, b y c) del modelo logarítmico, además, del valor de  $R^2 \geq 0.99$ , por tratamiento, mostró la mejor predicción del fenómeno de deshidratación, por lo que, las cinéticas de secado por cada tratamiento, se establecieron a partir de dicho modelo.

Tabla 2. Valores de los coeficientes de la regresión, coeficiente de determinación y Chi cuadrada de cada modelo matemático y por tratamiento.

Modelo	Tratamiento	Coeficientes			$R^2$	$\chi^2$
Henderson y Pabis	T1	a= 1.22187	b= 0.00218		0.98524	8.06399 e <sup>-4</sup>
	T2	a= 1.25293	b= 0.00241		0.98938	9.82361 e <sup>-4</sup>
	T3	a= 0.9986	b= 0.00133		0.9904	0.00301
Potencia	T1	a= 26.36196	b= -0.73019		0.81603	0.01005
	T2	a= 21.75767	b= -0.6919		0.79532	0.01893
	T3	a= 31.01402	b= -0.75431		0.96185	1.06916 e <sup>-4</sup>
Logarítmico	T1	a= 1.22546	b= 0.00235	c= 0.02153	0.99047	5.28458 e <sup>-4</sup>
	T2	a= 1.25383	b= 0.00232	c= -0.01403	0.98991	9.65557 e <sup>-4</sup>
	T3	a= 0.937	b= 0.001828	c= 0.06299	1.0	1.0

$R^2$ = coeficiente de determinación.  $\chi^2$ = Chi-cuadrada.

Es importante señalar que, la RM es un parámetro adimensional, el cual indica la pérdida de humedad del nopal durante el tiempo de duración del deshidratado, la cual toma valores dentro de la escala del 1 al 0; donde 1 es el contenido de humedad del nopal previo al secado,

y 0 es el valor que indica el contenido de humedad en equilibrio (Blanco 2016). En este sentido, el contenido de humedad inicial de las muestras de nopal de los tres tratamientos fue de 93.7 %/100 g BF y posterior al proceso de deshidratación el contenido de humedad fue de 4.59, 3.43 y 0.04 %/100 g BS para T1, T2 y T3.

Para el caso de las cinéticas de secado del nopal forrajero (*O. ficus-indica*) por tratamiento (T1: 50 °C; T2: 60 °C y T3: liofilizado) la RM, mostró un decremento con forme avanza el proceso de deshidratación. Sin embargo, en la deshidratación mediante aire caliente (T1 y T2), se redujo el tiempo de secado al aumentar la temperatura; así, cuando se deshidrató a 50 °C se requirieron de 4320 min para alcanzar el peso contante del nopal, mientras que con la temperatura de 60 °C se requirieron de 1920 min para lograr el peso constante. Por su parte, la curva de secado, correspondiente a los datos experimentales del T3, se observó un comportamiento lineal y descendente de la RM, (0 a 1440 min). Además, el tiempo requerido para alcanzar un peso constante de la muestra de nopal fue a los 4320 min (Figura 2).

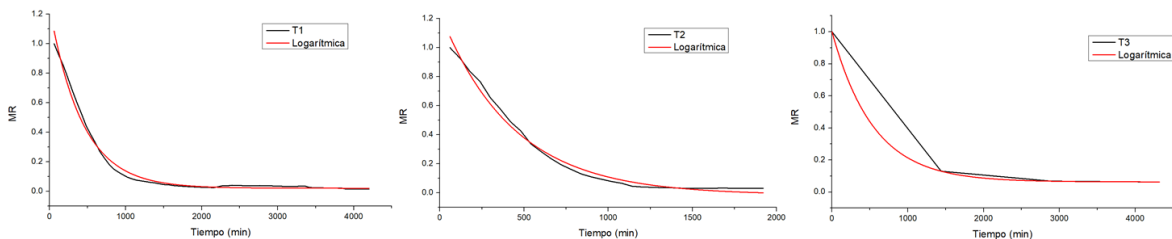


Figura 2. Modelación de la cinética de secado del nopal forrajero (*O. ficus-indica*) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.

El tiempo en el que las muestras de nopal alcanzaron el valor de 0 (humedad en equilibrio) en RM fue diferente en cada tratamiento, así para el T1 RM= 0.1 fue a los 1170 min, mientras que, para T2 se presentó a los 1033 min, finalmente en T3 fue hasta los 1764 min; aspecto que debe tomarse en cuenta para futuras investigaciones, debido a que, al llegar al valor 0 en RM, se optimiza el proceso en cuanto a energía. Este valor (RM= 0.1) indica que la velocidad a la que se reduce el contenido de humedad en la muestra disminuye considerablemente, ya que la humedad presente ésta es considerada como humedad residual, por lo que, la exposición a las condiciones de secado establecidas, supone un gasto de energía innecesario, además de someter a la muestra a daño de la estructura y pérdida de componentes, ya que, con un RM= 0.1 se considera que el producto se encuentra seco (García 2019).

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

De acuerdo con los resultados obtenidos en la presente investigación y con los resultados consultados en las demás investigaciones, se puede establecer que, la selección del modelo que mejor ajuste y prediga el comportamiento de secado del nopal, depende en gran medida de los datos experimentales (RM) obtenidos en cada prueba. Al respecto Lahsasni *et al.*, (2004) determinaron el efecto que tiene la temperatura y el flujo de aire sobre la cinética de secado, y concluyen que, la temperatura del aire es el principal factor que influye en la cinética de secado; por lo que, se puede establecer que, el comportamiento de la cinética de secado de los cladodios de nopal, en cada investigación dedicada a ello, será diferente la ecuación que describa o ajuste mejor a los datos experimentales. Ya que factores externos y que, además, no se toman en cuenta durante la modelación (temperatura, velocidad de aire, proceso de secado, dimensiones del alimento, entre otros), influyen en el comportamiento de secado (Onwude *et al.*, 2016).

Ejemplo de lo anterior, Touil *et al.* (2010) aplicaron cinco ecuaciones diferentes en sus datos experimentales de deshidratación (por infrarrojo) de cladodios de nopal (cubos 10 mm), a diferentes temperaturas (40, 50 y 60 °C); los autores concluyen que, la ecuación de Midilli fue la que mostró una descripción satisfactoria del fenómeno. Por otro lado (Martínez *et al.* (2010) señalan que, los modelos de Page y Peleg, explicaron de forma más adecuada el comportamiento de secado (por lecho fluidizado) del nopal (cubos de 20 x 20 x 3 mm) a diferentes temperaturas (50, 60, 70 y 80 °C) y velocidades de aire (0 y 13 m/s). Condiciones que son diferentes entre ellas, y entre las aplicadas a los tratamientos de esta investigación, por ende, para cada base de datos (RM) generada bajo ciertas condiciones, se obtendrá un ajuste diferente para cada ecuación de cinética de secado.

Aunado a lo anterior, Ventura *et al.* (2017) mencionan que, las aplicaciones tecnológicas postcosecha, como lo es la deshidratación, modifica compuestos presentes en el nopal; específicamente la temperatura a la cual se someten los cladodios de nopal, en el siguiente capítulo (II) se aborda dicho tema, enfocado principalmente a como la temperatura modifica los grupos funcionales y las estructuras cristalinas en el nopal forrajero.

## CONCLUSIÓN

La pérdida de humedad del nopal forrajero durante el proceso de deshidratación mediante aire caliente, es mayor a 60 °C y, además, esta temperatura reduce el tiempo del proceso; aspecto que se corrobora con la cinética de secado, ya que, durante la deshidratación, la humedad en equilibrio de las fracciones de *O. ficus-indica* se logra en menor tiempo al implementar la temperatura de 60 °C; sin embargo, dentro de la deshidratación no solo es importante la eficiencia del proceso en cuanto a pérdida de humedad, por lo que es necesario investigar cómo se modifican los principales componentes del nopal forrajero sometido a deshidratación con temperatura de 60° C.

## BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, M. H. M., Córdova, T. A. V., Aguilar, B. A., García, C. T. y Kawas, R. J. (2011). Caracterización química y degradabilidad ruminal del nopal (*Opuntia ficus-indica*) y de variedades silvestres de *Opuntia* como alternativa en la suplementación de caprinos. *IX Simposium-Taller Nacional y II Internacional de “Producción del Nopal y Maguey*. RESPYN “Revista Salud Pública y Nutrición” Edición Especial No. 5 pp. 153-168.
- AOAC (1998) Official Method of Analysis. 15th Edition, Association of Official Analytical Chemists, Washington DC.
- Aranda, O. G. y Flores, V. C. A. (2011). Calidad de la carne de animales suplementados con nopal. *IX Simposium-Taller Nacional y II Internacional sobre “Producción y Aprovechamiento del Nopal y Maguey*, 12-13.
- Blanco Cano, L. (2016). *Modelling and experimental investigation on the processes involved in the indirect solar drying of Granny Smith apples*. Tesis doctoral. Universidad Carlos III de Madrid.
- Contreras, P. M., Gutiérrez, C. E., Valderrama, B. M. del C., Rojas, M. I., Espinosa, A. D. G., Suárez, V. R., & Rodríguez, G. M. E. (2012). Effects of drying process on the physicochemical properties of nopal cladodes at different maturity stages. *Plant foods for Human Nutrition*, 67(1), pp. 44-49.
- Costa, R. G., Beltrão Filho, E. M., de Medeiros, A. N., Givisiez, P. E. N., do Egypto, R. D. C. R., & Melo, A. A. S. (2009). Effects of increasing levels of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. Miller) in the diet of dairy goats and its contribution as a source of water. *Small Ruminant Research*, 82(1), pp. 62-65.
- Fito, P., A. Andrés, J.M. Barat y A. Albors. (2016). Introducción al secado por aire caliente. Editorial Universidad Politécnica de Valencia, España. Capítulo 1 “Deshidratación de alimentos: generalidades” pp. 5-13.
- García, S. S. (2019). *Estudio experimental de la cinética de secado empleando un secadero solar* (Bachelor's thesis). Universidad Carlos III de Madrid.
- Hernández, U. M. I., Pérez, T. E., & Rodríguez, G. M. E. (2011). Chemical analysis of nutritional content of prickly pads (*Opuntia ficus indica*) at varied ages in an organic

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

- harvest. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(5), pp. 1287-1295.
- INEGI: Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Anuario Estadístico del Estado de Michoacán. (2010). pp.127–142.
- Karam, M. C., Petit, J., Zimmer, D., Djantou, E. B., & Scher, J. (2016). Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review. *Journal of Food Engineering*, (88), pp. 32-49.
- Littell, C. R., Stroup, W. W., Freund, R. J. (2002). *SAS for linear models*. SAS institute.
- Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., & Jaouhari, J. T. (2004). Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering*, 61(2), pp. 173-179.
- Martínez, S. G.; Ortega, A. F., Flores, J. M. y Orozco, M. L. (2010). Características de secado de nopal (*Opuntia ficus-indica*) por lecho fluidizado. *Acta Universitaria*, 20(4), pp. 70-76.
- Martínez, S. G., Celis, F. F., Hernández, P. T., & Paredes, L. O. (2015). Effect of drying methods on the nutraceutical potential of cactus cladodes (*Opuntia spp.*). *International Journal of Food and Nutritional Science / Volume*, 2(6), pp. 1.
- Nobel, P. S.1998. Los incomparables ágaves y cactus. Ed. Trillas. México.
- Núñez, L. M. A., Paredes, L. O., & Reynoso, C. R. (2013). Functional and hypoglycemic properties of nopal cladodes (*O. ficus-indica*) at different maturity stages using in vitro and in vivo tests. *Journal of agricultural and food chemistry*, 61(46), pp. 10981-10986.
- Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N. M., & Abdan, K. (2016). Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 15(3), pp. 599-618.
- Ordaz, O. G., Juárez, C. A., Pérez, S. R. E., Román, B. R. M., & Ortiz, R. R. (2017). Effect of spineless cactus intake (*Opuntia ficus-indica*) on blood glucose levels in lactating sows and its impact on feed intake, body weight loss, and weaning-estrus interval. *Tropical animal health and production*, 49(5), pp. 1025-1033.
- Ortiz, R. R., Orozco, G. A., Val, A. D., Portillo, M. L., & Pérez, S. R. E. (2017). Efecto de la adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) a la dieta de cerdas lactantes sobre la producción y calidad de la leche. *Nova scientia*, 9(18), pp. 290-312.
- Sáenz, C., & Berger, H. (2006). *Utilización agroindustrial del nopal* (Vol. 162). Food & Agriculture Org.
- Touil, A., Chemkhi, S., & Zagrouba, F. (2010). Modelling of the drying kinetics of *Opuntia ficus indica* fruits and cladodes. *International journal of food engineering*, 6(2), pp 1-15.
- Ventura, A. R. I., Bosquez, M. E., Bautista, B. S., & Rivera, C. F. (2017). Cactus stem (*Opuntia ficus-indica* Mill): Anatomy, physiology and chemical composition with emphasis on its biofunctional properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(15), pp. 5065-5073.

## Capítulo II

### CAMBIOS EN LOS GRUPOS FUNCIONALES Y COMPUESTOS CRISTALINOS DEL NOPAL (*Opuntia ficus-indica*) DESHIDRATADO A DIFERENTES TEMPERATURAS

#### RESUMEN

El nopal forrajero (*O. ficus-indica*) ha sido considerado para la alimentación animal, sin embargo, una limitante para su conservación e implementación pecuaria es la cantidad de agua con la que cuenta, aspecto que genera la necesidad de procesar los cladodios postcosecha para su almacenamiento. Se ha optado por los procesos de deshidratación, no obstante, para mantener la calidad del nopal forrajero se deben tomar en cuenta las fluctuaciones de los componentes que lo integran y que se modifican durante el secado. Es por ello que, en la presente investigación se analizaron los cambios en los grupos funcionales y compuestos cristalinos del nopal forrajero *O. ficus-indica*, deshidratado a diferentes temperaturas. De acuerdo a el análisis de FT-IR se encontró que, el porcentaje de transmitancia disminuye en el nopal deshidratado por aire caliente a 60 °C vs. 50 °C, por lo que se supone que la presencia de grupos funcionales disminuye o se ve afectado. Referente al análisis de DRX se encontró que, la cristalinidad de los compuestos presentes en las muestras de nopal es mayor para el nopal deshidratado mediante aire caliente a 60 °C vs. 50 °C, ya que el difractograma correspondiente a este último se muestra con menor intensidad en los picos, lo que indica la presencia de los compuestos en fase amorfa. No obstante en ambas muestras de nopal se logró identificar los mismos compuestos. Por lo que, para evitar cambios en la presencia de grupos funcionales que forman parte de diversas moléculas del nopal, y evitar la disminución o modificación de éstas, se debe implementar un proceso de deshidratación en *O. ficus-indica* forrajero  $\leq 50$  °C.

**Palabras clave:** cladodios, liofilización, aire caliente, FT-IR, DRX.

## INTRODUCCIÓN

La producción de biomasa del nopal *Opuntia ficus-indica* es de 71 toneladas de materia seca/año/hectárea (SIAP, 2020), aspecto que, lo convierte en una estrategia de alimentación viable para los animales al ser usado como cultivo forrajero; además, las características de adaptabilidad que presenta la cactácea para crecer y desarrollarse son aprovechadas en zonas donde la producción de forraje tradicional es limitada (Aguilar *et al.*, 2011); otro fundamento viable es, la cantidad de agua que contienen los cladodios forrajeros en base fresca (BF), mismos que se implementan como sustituto del líquido vital en animales alojados en zonas áridas (Urrutia *et al.*, 2014).

Por otro lado, se han documentado beneficios en el metabolismo, de los animales que consumen esta cactácea que se reflejan en el incremento del consumo de alimento (Ortiz *et al.*, 2017), ganancia de peso (Gaitán *et al.*, 2017), conversión alimenticia y calidad de la carne (Aranda y Flores, 2011), mantenimiento de producción de leche en época de estiaje (García *et al.*, 2013). Este último punto, refuerza las cualidades del nopal forrajero antes mencionadas, por lo cual se torna como una opción viable para emplear en el rubro agropecuario, ya que el punto de, la productividad en el sistema, como la rentabilidad y la economía, podría ser atractivo para el productor.

A pesar de las ventajas que presenta el nopal forrajero y de los beneficios que conlleva su utilización en la alimentación de los animales, *Opuntia ficus-indica*, presenta desventajas al momento de querer implementar su administración como alimento en producciones pecuarias debido a que el manejo en presentación fresca conlleva mano de obra extra y se complica el traslado del forraje a distancias, aunado a ello, el alto contenido de humedad en dicha cactácea provoca que se presente una rápida descomposición microbiológica, lo que limita una comercialización fresca, y, por lo tanto, imposibilita su almacenaje durante largo tiempo. Por lo tanto, la deshidratación se ha considerado como un método para la conservación del nopal (Contreras *et al.*, 2012), sin embargo, es indispensable que durante la deshidratación no se modifiquen en gran medida los compuestos contenidos en la cactácea. Es por ello que, se analizaron los cambios en los grupos funcionales y compuestos cristalinos del nopal forrajero *O. ficus-indica*, deshidratado a diferentes temperaturas.

## **MATERIAL Y MÉTODOS**

Se utilizaron cladodios de nopal forrajero de 3.5 meses de edad cultivados en el Sector de cerdos perteneciente a la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), ubicado en el municipio de Tarímbaro Michoacán, México.

Los cladodios se colectaron a las 7:00 am en el periodo de febrero-abril 2020, los cuales se lavaron y desinfectaron, para después ser fraccionados en cubos de 2x2x2. La muestra de los cladodios fraccionados se dividió en tres tratamientos (T) para su deshidratación: T1= deshidratación mediante aire caliente a 50 °C/ 72 h (n=3 kg), T2= deshidratación mediante aire caliente a 60 °C/32 h (n=3 kg) y T3= muestra de nopal liofilizado (n=3 kg). Una vez terminados los procesos de secado, las muestras se pulverizaron y almacenaron a temperatura ambiente de forma individual hasta su análisis.

### ***Análisis de calorimetría diferencial de barrido/ análisis termogravimétrico (DSC-TGA)***

El estudio de DSC/TGA se realizó en un equipo SDT Q600. El peso de la muestra de nopal deshidratado fue  $26 \pm 5$  mg, misma que se colocó en un crisol de alúmina bajo una atmósfera de gas Argón con un flujo de 100 ml/min. La muestra fue calentada desde los 25 °C hasta los 600 °C, con una rampa de 20 °C/min. Con los resultados obtenidos (base de datos) se procedió a graficar las curvas mediante el programa informático Origin®.

### ***Análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)***

Se utilizó un espectrofotómetro de Infrarrojo con Transformada de Fourier (Bruker, modelo Tensor 27) que se operó en un rango de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ , con una resolución de 4  $\text{cm}^{-1}$ , a una temperatura de 18.7° C con humedad relativa del 41%. Las muestras de nopal de cada tratamiento ( $300 \pm 10$   $\mu\text{g}$ ) se mezclaron con  $3.5 \pm 0.05$   $\mu\text{g}$  de bromuro de potasio para espectroscopia IR (Uvasol®), para formar una pastilla que después se colocó en el rayo infrarrojo.

### ***Analisis de difraccion de rayos X (DRX)***

Para determinar los compuestos cristalinos, se analizaron tanto las muestras de nopal de cada tratamiento mediante un difractómetro Bruker D8 Advance® con un barrido Bragg-Brentano bajo condiciones de funcionamiento del difractor de 40 kV y 40 mA, con una longitud de onda de 1.5418 Å. Los datos se recolectaron en una escala 2θ de 5° a 85° a 0.02°/segundos con 4000 segundos de duración. Para el análisis de los difractogramas se utilizó el software X'Pert HighScore Plus®.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### ***Análisis de calorimetría diferencial de barrido/ análisis termogravimétrico (DSC-TGA)***

La Figura 1 muestra la gráfica correspondiente al comportamiento del nopal de los tres tratamientos durante en análisis de DSC-TGA. En general, las tres muestras presentaron similitud durante su evaluación, donde el nopal de los T1 y T2 son los que presentan curvas similares, en las transiciones correspondientes para ambos análisis. En las curvas (TGA verde, rosa y amarilla) de pérdida de peso del nopal deshidratado se puede observar que esta, ocurrió en varias etapas, lo cual se puede atribuir a la complejidad de la muestra.

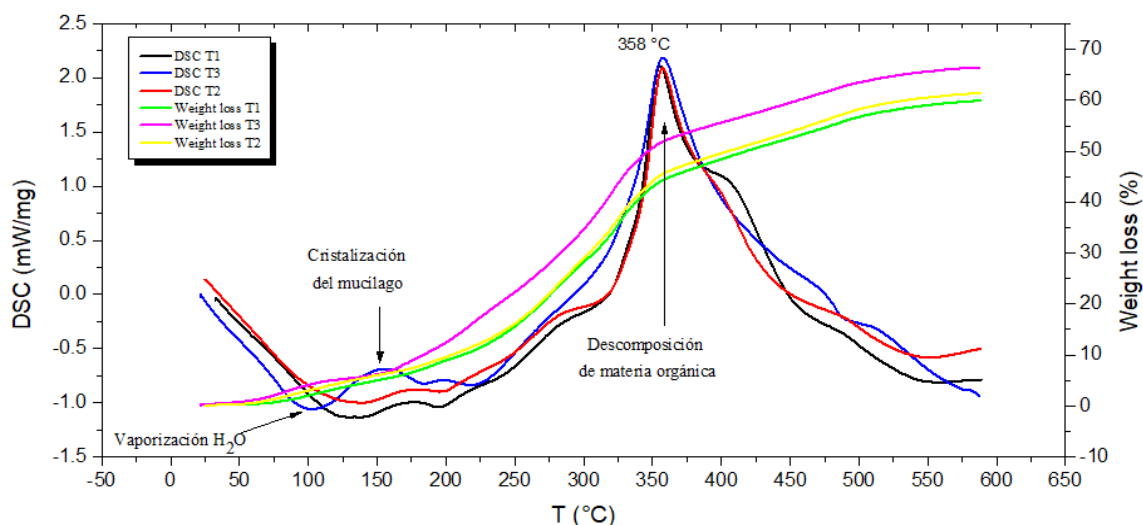


Figura 1. Calorimetría de barrido diferencial (DSC) y análisis termogravimétrico (TGA) del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) de acuerdo al tratamiento.

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

Se puede observar (Figura 1) que las curvas calorimétricas (negra, azul y roja) de los tres tratamientos, presentan tres picos importantes. El primero inicia con un comportamiento endotérmico, mismo que puede asociarse al proceso de vaporización de agua, por lo que se observa la pérdida de humedad del nopal, de tal forma que, se refleja la pérdida del peso inicial aproximadamente de 4.59, 5.62 y 4.43 % (T1, T2 y T3 respectivamente); la temperatura a la cual se presentó el pico endotérmico y donde se ve reflejada de dicha pérdida de peso para T1 fue a 134 °C, para el T2 a 132 °C y para el T3 a 101 °C.

El segundo pico fue de naturaleza exotérmica, este se ubicó a temperaturas de 174 °C para T1, 173 °C para T2 y 150 °C para T3; mismo que puede asociarse a la cristalización del mucílago contenido en el nopal. El tercer pico, también es exotérmico, se presentó para los tres tratamientos a una temperatura de 358 °C, y se relaciona con la descomposición de la materia orgánica del nopal a dicha temperatura; la pérdida de peso de la muestra de nopal fue del 44.3 % para T1, de 45.5 % para T2 y de 51.82 % para T3. Resultados consistentes, ya que en su mayoría los compuestos del nopal son de naturaleza orgánica (polisacáridos y carbohidratos), es decir, la mayor pérdida de peso se observó a 385 °C temperatura a la cual se da la eliminación de la materia orgánica (Madera *et al.*, 2018). Al finalizar de la evaluación de TGA, la pérdida de peso en las muestras de nopal fue de 61.8 % para T1, 61.8 % para T2 y 60.1 % para T3. Valores que indican que, la pérdida de peso en el T1 y T2 tienden a ser mayores en comparación con el nopal de T3.

***Análisis mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)***

En la Figura 2 se presentan los espectros correspondientes a los cladodios de nopal forrajero deshidratados. En la cual se observó que, las muestras de los tres tratamientos tuvieron el mismo patrón en las bandas, pero cambia la intensidad de cada pico. De tal forma que, el nopal liofilizado presentó mayor transmitancia, seguido del deshidratado a 50 °C y finalmente el de menor transmitancia fue el deshidratado a 60 °C; En este sentido, se puede establecer que, los principales cambios observados en los espectrogramas del nopal forrajero deshidratado a diferentes temperaturas fue el porcentaje de transmitancia.

El pico registrado de 3600 a 3100  $\text{cm}^{-1}$  fue el que mostró mayor amplitud, y corresponde a una vibración de estiramiento del grupo hidroxilo (OH) el cual se atribuye a la presencia de

agua en las muestras de nopal, Vishali y Karthikeyan (2014) agregan que en dicha banda hay vibraciones de estiramiento de las aminas; lo anterior concuerda con Betatache *et al.* (2014) y Gorgulu *et al.* (2007), quienes señalan que la banda ubicada a dicho número de onda es el resultado de la vibración de estiramiento de grupos OH y NH los cuales atribuyen a carbohidratos y proteínas.

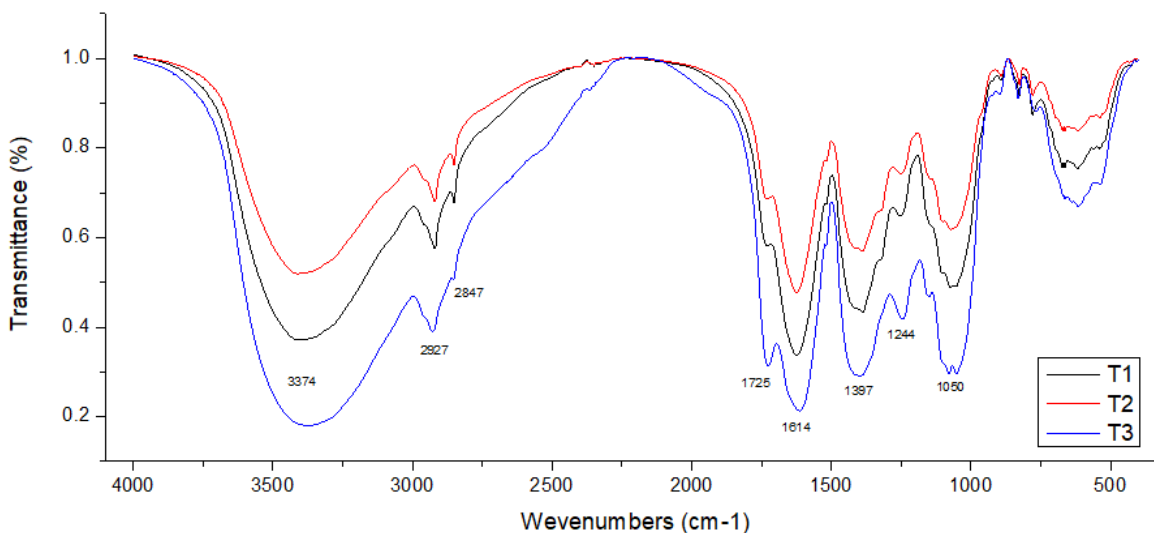


Figura 2. Espectro infrarrojo del nopal forrajero *O. ficus-indica* de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.

Por su parte, Contreras *et al.* (2016) reportan que, entre 3500 y 3200  $\text{cm}^{-1}$ , se atribuye al grupo hidroxilo perteneciente a diferentes moléculas de la muestra, mientras que el pico a 2927  $\text{cm}^{-1}$  lo atribuyen al estrechamiento del grupo carbonilo (C-H<sub>3</sub>) de los grupos de piranosa; pero también este grupo funcional podría pertenecer a macromoléculas como lípidos o carbohidratos, ya que la señal ubicada a 1725  $\text{cm}^{-1}$  (estiramiento de C=O) confirma la presencia de lípidos, mientras que señales entre 1400 y 800  $\text{cm}^{-1}$  (estiramiento y balanceo C-O y C-C) confirma la presencia de carbohidratos; mismas que se observan en la Figura 2.

En relación al pico 2847  $\text{cm}^{-1}$ , éste, se observó más definido en el nopal forrajero del T1 y T2, en comparación con T3, mismo que se asocia a la tensión del C-H<sub>2</sub>, mismo que podría pertenecer a estructura de la celulosa (Mejías *et al.*, 2012; Tejeda *et al.*, 2018). Contrario a lo anterior, el pico a 1725  $\text{cm}^{-1}$  fue más definido para T3 vs. T1 y T2, se asoció a C=O los cuales están presentes en las moléculas de los grupos acetil ésteres, que indican la presencia de

ácidos en la estructura del nopal como el ferúlico y el *p*-cumárico. Los picos ubicados a 1244 y 1614  $\text{cm}^{-1}$  son asociados al estrechamiento de C=O perteneciente a estructuras de las proteínas (amida I), que forman parte de la pectina (Gorgulu *et al.*, 2007). Las bandas a 1300 y 1050  $\text{cm}^{-1}$  indican la presencia de unidades de carbohidratos, mientras que los picos  $<1000 \text{ cm}^{-1}$  son flexiones de enlaces OH posiblemente pertenecientes a la celulosa (Mejías *et al.*, 2012).

### ***Analisis de difraccion de rayos X (DRX)***

De acuerdo al análisis de difracción de rayos X se obtuvieron los siguientes patrones (Figura 3) para las muestras de nopal forrajero deshidratado, en los cuales se observa que, las tres muestras comparten picos característicos, sin embargo, el T2 es quien mostró mayor definición de los picos a lo largo de todo el difractograma. En las tres muestras se localizó la presencia de 7 compuestos cristalinos.

En cuanto a la presencia de oxalatos de calcio (Co), los picos más característicos se ubicaron en 15.0 y 24.4° a un ángulo de  $2\theta$ , el mismo compuesto es reportado como wheddellite por Rojas *et al.* (2015), sin embargo, estos investigadores la encontraron en la fibra dietética insoluble del nopal. Los mismos autores reportan la presencia de oxalatos de calcio monohidratado (whewellite) en la estructura de nopal, a 15, 25 y 30° en un ángulo de  $2\theta$ , mismos que coinciden con los de las muestras de nopal de la presente investigación, los cuales se reportaron a 14.9, 24.4, 30.0 y 38.2° en ángulo de  $2\theta$ , los cuales son los más característicos para dicho compuesto, Contreras *et al.* (2015) también reportan la presencia de whewellite en la estructura del nopal ( $\sim 15, 24$  y  $30^\circ$  ángulo  $2\theta$ ).

El carbonato de calcio o calcita (como lo identificó la base de datos) se presentó a 29.6, 39.3 y 48.3° en ángulo de  $2\theta$ , Contreras *et al.*, (2016) reportan dicho compuesto en la estructura del mucílago de nopal; por su parte, Rojas *et al.* (2015) reportan los mismos picos característicos para el patrón de difracción de calcita, solo que ellos la encontraron en la fibra dietética soluble extraída el nopal. En cuanto al patrón de difracción de silvina (Sy) el cual es cloruro de potasio se localizaron picos en 28.3, 40.5 y 50.2 (ángulo  $2\theta$ ), en relación a dicho compuesto, ya se había reportado previamente por Rodríguez *et al.* (2007).

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

En las muestras de nopal, se identificaron otras estructuras cristalinas, las cuales fueron dolomita (Dlt; carbonato de calcio y magnesio), este compuesto mostró picos en 21.6, 24.2 y 31.0° en ángulo de 2θ; glicilglicina (Gg) se encontraron picos a 15.0, 21.0 y 27.7° (ángulo de 2θ) y finalmente fairchildite (Ft; carbonato de potasio y calcio) que mostró picos a 19.3, 27.9 y 33.9° en ángulo de 2θ. Al respecto, Contreras *et al.* (2015) reportan la presencia de dolomita (~15, 29, 30 y 31° ángulo 2θ) y Fairchildite (~19, 20, 27 y 33° en ángulo 2θ), sin embargo, este último compuesto los autores establecen que, solo se encuentra en muestra de nopal incineradas.

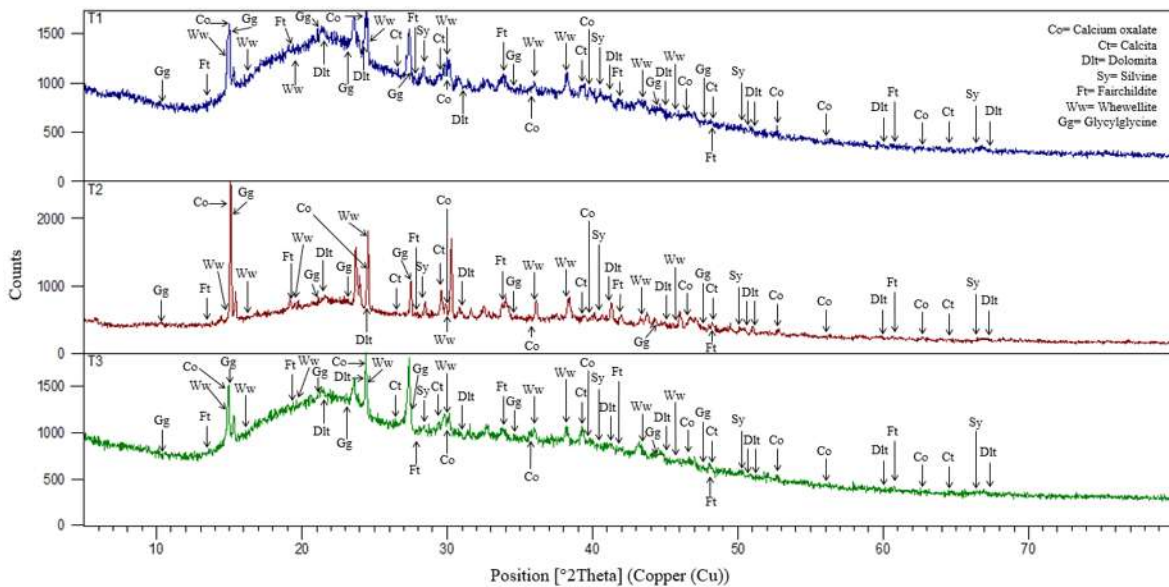


Figura 3. Patrones de digracción de rayos X del nopal forrajero *O. ficus-indica* de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.

Los picos más fuertes de cada compuesto antes mencionado se superponen entre ellos como en el caso de Ww con Co (30.0° ángulo 2θ) y ello pudiera influenciar en la detección de otros compuestos con menor intensidad de picos. Sin embargo, los patrones reportados coinciden con lo mencionado previamente por la literatura. La diferencia en los difractogramas de las muestras de nopal forrajero (Figura 3) indican que, la presencia de los compuestos puede ser de forma cristalina o amorfa tanto para T1, T2 y T3, ello debido a que, los picos en las tres muestras son diferentes en intensidad y definición. Al respecto, se ha informado que, la cristalinidad de los compuestos está determinada por factores como el tratamiento químico en la muestra previo al análisis de difracción de rayos X (Johar *et al.*, 2012); por lo que, en

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

el presente estudio este cambio en los patrones de T1, T2 y T3 pudiera estar determinado por el proceso y temperatura de deshidratación del nopal forrajero.

En este sentido, Martínez *et al.* (2015) señalan que, el tratamiento térmico durante la deshidratación del nopal, tienden a aumentar la cantidad de algunos compuestos como por ejemplo la FDT. Por lo que en el siguiente capítulo (III) se abordan dichos aspectos, es decir, cómo los compuestos presentes en el nopal forrajero se modifican de acuerdo a los procesos y temperatura de deshidratación.

## CONCLUSIÓN

Para evitar la pérdida de grupos funcionales que forman parte de los compuestos del nopal, la temperatura de deshidratación mediante aire caliente a 50 °C es la alternativa viable; ya que a temperaturas mayores (60 °C) los grupos funcionales disminuyen. Además, la deshidratación mediante aire caliente a 60 °C del nopal, incrementa la cristalinidad de los compuestos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, Y. M. I., Hernández, M. O., Guerrero, L. I., Ramírez, B. J. E., Aranda, O. G., & Crosby, G. M. M. (2011). Productive response of lambs fed with fresh or dehydrated spineless cactus (*Opuntia ficus-indica* L.). *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 13, pp. 23-35.
- Aranda, O. G. y Flores, V. C. A. (2011). Calidad de la carne de animales suplementados con nopal. *IX Simposium-Taller Nacional y II Internacional sobre “Producción y Aprovechamiento del Nopal y Maguey*, pp. 12-13.
- Betatache, H., Aouabed, A., Drouiche, N., & Lounici, H. (2014). Conditioning of sewage sludge by prickly pear cactus (*Opuntia ficus Indica*) juice. *Ecological Engineering*, 70, pp. 465-469.
- Contreras, P. M., Gutiérrez, C. E., Valderrama, B. M. del C., Rojas, M. I., Espinosa, A. D. G., Suárez, V. R., & Rodríguez, G. M. E. (2012). Effects of drying process on the physicochemical properties of nopal cladodes at different maturity stages. *Plant Foods for Human Nutrition*, 67(1), pp. 44-49.
- Contreras, P. M., Rivera, M. E. M., Gutiérrez, C. E., Del López, A. R. & Rodríguez, G. M. E. (2015). Characterization of crystalline structures in *Opuntia ficus-indica*. *Journal of biological physics*, 41(1), pp. 99-112.
- Contreras, P. M., Rodríguez, G. M. E., Gutiérrez, C. E., Valderrama, B. M. del C., Rojas, M. J. I., & Rivera, M. E. M. (2016). Physicochemical and rheological characterization of *Opuntia ficus mucilage* at three different maturity stages of cladode. *European Polymer Journal*, 78, pp. 226-234.

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

- Gaitán, L. S. B., Ordaz, O. G., Val, A. D., Martínez, F. H. E., Pérez, S. R. E. y Ortiz, R. R. (2018). Dieta suplementada con nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) modifica el comportamiento productivo y perfil sanguíneo en cerdos. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 17(1), pp. 39-50.
- García, G. R. A., Román, B. R. M., Val, A. D., Pérez, S. R. E. y Ortiz, R. R. (2013). Caracterización y modelación de la curva de lactancia de vacas holstein complementadas con nopal (*Opuntia ficus-indica*) durante la época seca. *Revista Científica*, 23(5), pp. 426-433.
- Gorgulu, S. T., Dogan, M., & Severcan, F. (2007). The characterization and differentiation of higher plants by Fourier transform infrared spectroscopy. *Applied spectroscopy*, 61(3), pp. 300-308.
- Johar, N., Ahmad, I., & Dufresne, A. (2012). Extraction, preparation and characterization of cellulose fibres and nanocrystals from rice husk. *Industrial Crops and Products*, 37(1), pp. 93-99.
- Madera, S. T. J., Vargas, R. L., Núñez, C. C. A., González, G. G., Peña, C. V., Núñez, G. J. A., & Rodríguez, N. J. R. (2018). Mucilage from cladodes of *Opuntia spinulifera* Salm-Dyck: chemical, morphological, structural and thermal characterization. *CyTA-Journal of Food*, 16(1), pp. 650-657.
- Martínez, S. G., Celis, F. F., Hernández, P. T., & Paredes, L. O. (2015). Effect of drying methods on the nutraceutical potential of cactus cladodes (*Opuntia* spp.). *International Journal of Food and Nutritional Science / Volume*, 2(6), pp. 1.
- Mejías, D. K. D., Flores, R. T., Poonce, C. L., Domínguez, S. M., Arronte, G. M. & de Posada, P.E. (2013). Characterization of laser-treated *Opuntia* using FT-IR spectroscopy and thermal analysis. *Applied Physics A*, 112(1), pp. 221-224.
- Rodríguez, G. M. E., De Lira, C., Hernández, B. E., Cornejo, V. M. A., Palacios, F. A. J., Rojas, M. I., & Muñoz, T. C. (2007). Physicochemical characterization of nopal pads (*Opuntia ficus indica*) and dry vacuum nopal powders as a function of the maturation. *Plant Foods for Human Nutrition*, 62(3), pp. 107-112.
- Ortiz, R. R., Orozco, G. A., Val, A. D., Portillo, M. L. y Pérez, S. R. E. (2017). Efecto de la adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) a la dieta de cerdas lactantes sobre la producción y calidad de la leche. *Nova Scientia*, 9(18), pp. 290-312.
- Rojas, M. I., Gutiérrez, C. E., Bah, M., Rojas, M. A., Ibarra, A. C., Rivera, M. E., & Aguilera, B. M. A. (2015). Characterization of calcium compounds in *Opuntia ficus indica* as a source of calcium for human diet. *Journal of Chemistry*, 2015, pp. 1-15.
- SIAP: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2020). Online: <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/crece-en-mexico-el-consumo-y-produccion-de-nopal-agricultura?idiom=es>
- Tejada, T. C., Paz, A. I., Villabona, O. A., Espinosa, F. M., & López, B. del C. (2018). Aprovechamiento del Jacinto de Agua (*Eichhornia crassipes*) para la síntesis de carboximetilcelulosa. *Revista Cubana de Química*, 30(2), pp. 211-221.
- Urrutia, M. J., Gámez, V. H. G., Beltrán, L. S. y Díaz, G. M. O. (2014). Utilización de *Atriplex canescens* y *Opuntia ficus indica* en la alimentación de cabras lactantes durante la sequía. *Agronomía Mesoamericana*, 25(2), pp. 287-296.
- Vishali, S., & Karthikeyan, R. (2015). Cactus *opuntia (ficus-indica)*: an eco-friendly alternative coagulant in the treatment of paint effluent. *Desalination and Water Treatment*, 56(6), pp. 1489-1497.

### Capítulo III

#### COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL NOPAL FORRAJERO (*Opuntia ficus-indica*) DESHIDRATADO A DIFERENTES TEMPERATURAS

##### RESUMEN

La presencia de *O. ficus-indica* se extiende en varias partes del mundo, se destina principalmente como alimento humano y en las últimas décadas se ha implementado como forraje para animales. Las investigaciones sobre los beneficios que proporciona el consumo de nopal fresco a la salud humana y animal ocasionaron que la investigación se centrara en los componentes que integran el nopal, por lo que el objetivo de la presente investigación fue determinar la composición química del nopal forrajero (*O. ficus-indica*) sometido a diferentes temperaturas de deshidratación. Se cosecharon 30 cladodios de *O. ficus-indica* de 3.5 de edad de una parcela con prácticas culturales, los cuales se fraccionaron en cubos de 2x2x2 para formar tres tratamientos: T1 nopal deshidratado a 50 °C/72 h, T2 nopal deshidratado a 60 °C/32 h y T3 nopal liofilizado/72 h. Posteriormente, se realizó un análisis químico proximal (AQP), medición de pH, sólidos solubles totales (SST), actividad de agua (Aw) y color a la muestra/tratamiento. Los valores mayores de la variable humedad, proteína, extracto etéreo, ceniza, fibra dietética total y fibra insoluble fueron de 4.59, 16.05, 2.18, 26.06, 34.85 y 27.51 g/100 g base seca (BS), respectivamente, los cuales corresponden al T1; mientras que los valores mayores para fibra soluble y extracto libre de nitrógeno fueron de 17.69 y 39.87 g/100 g BS, los cuales pertenecieron al nopal del T3. Los resultados de pH fueron de 4.35 (T1), 4.65 (T2) y 3.92 (T3); para SST el valor más elevado fue para el nopal de T3 con 6.78 °Brix; en cuanto a los valores de Aw estos fueron de 0.29, 0.25 y 0.25 para T1, T2 y T3. Finalmente, los valores de color para T1, T2 y T3 fueron: L\*= 34.54, 25.97 y 26.32; a\*= -1.47, -2.15 y -5.64; b\*= 11.47, 9.51 y 13.5. El AQP del nopal forrajero se vio afectado por efecto de la temperatura de deshidratación de tal manera que, la temperatura a 50 °C es mejor.

**Palabras clave:** cladodios, análisis químico, liofilización, proteína.

## INTRODUCCIÓN

El nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) presenta una alta variabilidad genética que, junto a sus características anatómicas y fisiológicas, le permiten la adaptación a diversos climas y ubicaciones geográficas (Flores *et al.*, 2016). La gran mayoría de especies de *Opuntia* se encuentran en México, de donde se considera que es nativo, sin embargo y debido a su gran adaptabilidad, en las últimas décadas ha sido introducido en regiones africanas y asiáticas (Aruwa *et al.*, 2018).

La creciente influencia sobre la distribución y uso del nopal en diferentes partes del mundo, va enfocada a varias cuestiones, dentro de las cuales se puede citar, el papel ecológico que promueve al frenar la erosión de suelos, se emplea también como ornamento, en países donde la sequía es muy marcada se usa como fuente de agua (Sáenz y Berger 2006), pero en la mayoría de los casos su uso va dirigido a la producción y obtención de alimento, tanto para humanos como animales. Su amplio uso tecnológico, industrial y alimenticio, propició que se ahondara aún más en su investigación, por ende, al estudiar al nopal *O. ficus-indica* se ha esclarecido no solo su composición físico-química, fitoquímica y biofuncional, sino que además se le han atribuido propiedades benéficas para la conservación de la salud (Ventura *et al.*, 2017).

Diversas investigaciones dan referencia y establecen los componentes principales del nopal *O. ficus-indica*, así mismo, para establecer los beneficios en la salud, se ha sometido a experimentación animales alimentados o suplementados con nopal, sin embargo, en la mayoría de las investigaciones el nopal *O. ficus-indica* cuenta con edad temprana, es decir, nopal dirigido al consumo humano (Stizing y Carle, 2005; Santos *et al.*, 2017). Varios autores señalan que, la composición de los cladodios depende en gran medida por factores edáficos, como clima, ubicación del cultivo, y prácticas culturales (Rodríguez *et al.*, 2007); además hay efecto en la cantidad de componentes presentes en nopal causados por la especie, la edad y también la presentación, es decir, si fue procesado previo a su análisis (Hernández *et al.*, 2011).

Otra de las ventajas importantes que presenta el nopal, es la idoneidad de reproducción que va de la mano como la producción de biomasa por hectárea, el bajo costo de producción y la

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

baja inversión de mano de obra en el plantío (Flores y Reveles, 2010; Torres *et al.*, 2015), que aunado a sus propiedades nutricionales lo convierten en un forraje, económico y óptimo para la suplementación animal, principalmente en zonas donde la producción de insumos para alimento es limitada y el uso de agua se ve condicionado para el riego (Vázquez *et al.*, 2008).

En general el nopal forrajero *O. ficus-indica* es caracterizado principalmente por la edad, de tal forma que, los cladodios maduros con edades de tres meses en adelante, que no son aptos para el consumo humano, son destinados como forraje para la alimentación animal (Méndez *et al.*, 2015); pero aún falta mucho por investigar para lograr establecer que características presentan los cladodios considerados como forraje, más aún si se toma en cuenta la cuestión antes mencionada sobre el cambio en los valores de cada componente respecto a la edad y al procesamiento postcosecha, por ello el objetivo fue determinar la composición química del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) sometido a diferentes temperaturas de deshidratación.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### ***Preparación de la muestra***

Se utilizaron 30 cladodios de nopal *O. ficus-indica* los cuales se obtuvieron de una parcela (bajo prácticas culturales) perteneciente al Unidad Posta Zootécnica de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ) Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), ubicada en el municipio de Tarímbaro Michoacán, México, el cual se encuentra a una altura promedio de 1,855 metros sobre el nivel del mar, se localiza entre las coordenadas geográficas 19° 46' latitud norte y entre 101° 10' longitud oeste, cuenta con un clima templado por lo que su temperatura media anual es de 21 °C y la humedad media es de 62% ya que presenta solo lluvias en verano (INEGI 2010).

La recolección de los cladodios (n= 30) se realizó a las 7:00 h en el periodo febrero-abril del 2020, únicamente se recolectaron cladodios cuya edad promedio fuera de 3.5 meses. Cada cladodio colectado se pesó (g), se midió el largo (cm), ancho (cm) y grueso (mm). El peso de los cladodios se obtuvo con una báscula digital, (TORREY® Modelo BTN20), mientras que, el largo y ancho se determinó por medio de un flexómetro y el grueso se determinó con un

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

vernier. Para la determinación de pH en campo, se realizó el procedimiento colorimétrico con tiras reactivas (MQuant®).

Inmediatamente después de obtener los indicadores morfológicos de los cladodios, estos se lavaron con agua simple y se desinfectaron con solución de hipoclorito de sodio 3% en agua destilada durante 10 min para eliminar microorganismos. Posteriormente, cada cladodio se fraccionó en cubos de 2 x 2 x 2 cm, para hacer una muestra homogénea (pool).

***Procesamiento (deshidratación) de las muestras***

Se realizaron dos procesos de deshidratación: 1) deshidratación por convección y 2) proceso de liofilización. Para la deshidratación por convección se utilizó un horno de secado de aire forzado (Ecoshel®), con el pool de nopal fraccionado se formaron dos tratamientos: T1 (n= 3 kg) nopal deshidratado a 50 °C y T2 (n=3 kg) nopal deshidratado a 60 °C. Para el proceso de liofilización, se destinaron 3 kg de nopal (T3), los cuales se congelaron en nitrógeno líquido y se almacenaron, el nopal congelado se procesó en un equipo Freezone 4.5 LABCONCO™, se establecieron condiciones de  $-50 \pm 3$  °C de temperatura y 0.110 mBar de vacío. El nopal seco/tratamiento (1, 2 y 3) se pulverizó y tamizó (250  $\mu$ m); posteriormente se almacenó en bolsas herméticas en desecadores hasta su previo análisis.

***Análisis Químico Proximal (AQP)***

Se determinó el AQP para los tres tratamientos; la humedad (H), se determinó por secado a 105 °C durante 3 h, el contenido de nitrógeno se obtuvo por el método Kjeldahl en 0.7 g de nopal/tratamiento y para determinar proteína (P) se multiplicó por el factor 6.25; la determinación del contenido de cenizas (C) fue por incineración en la mufla a 550 °C durante 3 h en 3.0 g de nopal/tratamiento; el extracto etéreo (EE) se determinó mediante el método Soxhlet en 3.0 g de nopal/tratamiento; el extracto libre de nitrógeno (ELN) se realizó por diferencia (fibra dietética + P + EE + C), lo anterior de acuerdo a los métodos del manual de la AOAC (1998). Para la determinación de fibra soluble (FS) y fibra insoluble (FI) se realizó mediante el kit comercial (Sigma-Aldrich), cada determinación se realizó por sextuplicado. Los resultados se expresaron como g/100 g base seca (BS).

***Determinación de sólidos solubles totales (SST), actividad de agua (Aw) color y pH***

La determinación de sólidos solubles se realizó mediante un refractómetro ABBE® digital a 22 °C, se utilizó 0.1 g de nopal/tratamiento el cual se diluyó en agua destilada (1:10). La actividad de agua (Aw) se determinó en un instrumento Novasina® portátil en nopal (5 g) de cada tratamiento (1, 2 y 3) a 22 °C. Respecto a la medición del color, se utilizó un espectrofotómetro a color BYK-Gardner® en 5 g de nopal/tratamiento el cual registra las coordenadas L\*, a\* y b\*, con las cuales se determinó el índice de color para cada tratamiento y la diferencia de color entre el nopal/tratamiento; finalmente el pH se midió por medio de un potenciómetro Hanna® a 22 °C en 1 g de nopal/tratamiento diluido en 10 ml de agua destilada. Las determinaciones anteriores se realizaron por sextuplicado para cada tratamiento.

***Análisis estadístico***

El modelo matemático para el AQP, SST, AA y pH fue el siguiente:

$$y_{ij} = \mu + T_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

$Y_{ij}$ = Variable respuesta (H, P, EE, C, ELN FDT, FI, FS, SST, AA y pH).

$\mu$ = Promedio general.

$T_i$ = Tratamiento con  $i$  éximo tratamiento = T1, T2 y T3.

$\varepsilon_{ijk}$ = Efecto aleatorio asociado con cada observación ( $\sim NID = 0, \sigma^2_e$ ).

Las diferencias entre tratamientos se obtuvieron a través de medias de mínimos cuadrados (LsMeans) a un  $\alpha=0.05$  (Littell *et al.*, 2002).

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

***Indicadores morfológicos de los cladodios***

De acuerdo con los resultados de morfología, la Tabla 1 muestra el peso, largo, ancho grueso así como el pH de los cladodios analizados (n=30). Se observó que el coeficiente de variación para el peso de los cladodios fue mayor al 30%, aspecto que determina que, existió

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

heterogeneidad en dicha variable: cladodios de 3.5 meses de edad, con un peso de 375 g hasta 1.830 g. Mientras que, el resto de las variables, se comportaron de manera más homogénea.

Tabla 1. Estadística descriptiva para las variables morfológicas de los cladodios de nopal forrajero (*O. ficus-indica*) de 3.5 meses de edad.

	Peso (g)	Largo (cm)	Ancho (cm)	Grueso (mm)			pH
				Base	Centro	Ápice	
Media	823.1	38.3	19.4	40.0	16.2	16.0	4.7
DE ±	265.6	5.6	2.6	5.3	4.8	4.3	0.6
CV (%)	32.3	14.7	13.3	13.3	29.8	26.7	12.7

DE = Desviación estándar CV = Coeficiente de variación

Los resultados anteriores difieren con los reportados por Contreras *et al.* (2012), quienes reportan pesos de  $405.78 \pm 4.33$  g y  $602.30 \pm 1.01$  g para cladodios de 3.3 y 5 meses de edad, respectivamente. Rodríguez *et al.* (2007) reporta que el peso de cladodios de 3 meses se encuentra entre 375 g mientras que los de 3.3 meses llegan a pesar 400 g; ambos autores reportan valores menores a los encontrados en esta investigación (Tabla 1). En contraste, Méndez *et al.* (2015) registraron pesos  $941 \pm 218$  g, en cladodios con una edad promedio de 7 meses, valor que es cercano al observado en esta investigación ( $823.1 \pm 265.6$  g).

La diferencia observada entre los pesos de los cladodios analizados y los referenciados por Contreras *et al.* (2012) y Rodríguez *et al.* (2007), puede deberse a la época de cosecha, nivel del cladodio, o tipo de la parcela (Pérez *et al.*, 2015). Sin embargo, no se descarta que dichas diferencias también estén asociadas a la genética de los cladodios analizados *vs.* los estudiados por los investigadores citados (Flores *et al.*, 2016).

Para la variable largo, se encontró que el valor fue de  $38.3 \pm 5.6$  cm (Tabla 1) promedio similar al reportado por Pérez *et al.* (2015) de 37.0 cm. Sin embargo, este valor corresponde a cladodios de 4<sup>to</sup> nivel y cosechado en época de lluvias; a la par, reportan valores mayores a los 40 cm, tanto en nopales de 3<sup>re</sup> como de 4<sup>to</sup> nivel cosechados en época de estiaje. Los mismos autores reportan el ancho del cladodio, mismo que oscila entre 13.0 a 16.7 cm; mismos que son bajos al compararlos con los valores de la Tabla 1 ( $19.4 \pm 2.6$  cm). Del mismo modo Contreras *et al.* (2012), reporta valores menores tanto para la variable largo

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

( $22.12 \pm 0.45$  cm) como en el ancho ( $13.22 \pm 0.62$  cm) en cladodios de edad similar (3.3 meses) a los de esta investigación. Aun y cuando la edad de los cladodios reportada por Contreras *et al.* (2012) fue similar a la edad de los cladodios de la presente investigación, las diferencias en las variables (largo y ancho) pudieron deberse a: la variabilidad genética de la nopales y a las condiciones ambientales de crecimiento.

Con relación al pH de los cladodios analizados, el valor (pH promedio 4.7, Tabla 1) se encuentra dentro de lo reportado por Méndez *et al.* (2015) quienes encontraron valores de  $4.64 \pm 0.4$  en cladodios de 7 meses de edad, mientras que Ramírez *et al.* (2013) reportan un valor de 4.62 en cladodios de 1 mes de edad; lo anterior permite señalar que, el valor de pH no varía con la edad.

***Análisis Químico Proximal (AQP):***

En cuanto al AQP, Rodríguez *et al.* (2007) señalan que, la composición química del cladodio cambia de acuerdo a su estado de madurez, de aquí que, los resultados obtenidos, fueron comparados con investigaciones donde la edad del cladodio sea de 3 a 4 meses. Se encontró que, existieron cambios en las variables por efecto de tratamiento. Los valores de EE y FS del T1 y T2 fueron estadísticamente iguales ( $p > 0.05$ ), mientras que para los T1 y T2 el único valor similar fue el de la variable FDT, finalmente al comparar T1 con T3 los valores de todas las variables son diferentes ( $p < 0.05$ ).

Respecto a la humedad (H) contenida en las muestras de nopal deshidratadas (Tabla 2) fueron diferentes entre sí ( $p < 0.05$ ), para los tres tratamientos (4.59, 3.43 y 0.04% de H para T1, T2 y T3 respectivamente). Estos valores son menores al valor que reportan Hernández *et al.*, (2010) de 4.81 g/100g BS (nopal de 100 días de edad). Sáenz (2000) establece que, un porcentaje de humedad  $< 7\%$  en harinas o polvos de nopal, es el porcentaje adecuado para prevenir la proliferación de microorganismos en el producto, lo cual, permite su almacenaje. De acuerdo a lo anterior, el porcentaje de H que presentó el nopal de los tres tratamientos analizados en la presente investigación, puede catalogarse como H óptima para su almacenaje.

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

En cuanto a proteína (P) los resultados mostraron diferencias ( $p < 0.05$ ) entre los tres tratamientos analizados (Tabla 2) y en donde la mayor cantidad de P ( $16.05 \pm 0.10$  g/100g BS) se encontró en el T1 (50 °C). Investigaciones previas (Hernandez *et al.*, 2011) sobre procesos de deshidratación en el nopal, señalan que la temperatura óptima para evitar daño a las proteínas es  $< 45$  °C; sin embargo, si se toma en cuenta que la temperatura a la cual se sometió el nopal en la presente investigación los contenidos de P no son bajos (13.07 g/100g BS; T3) en comparación con otros autores que reportan 7.78 g/100g BS (Hernandez *et al.*, 2010) y 10.4 g/100g BS (Pinos *et al.*, 2010).

El valor de P más bajo (13.07 g/100g BS) reportado en la Tabla 2 corresponde a la muestra de nopal liofilizada. Al respecto, Contreras *et al.*, (2012), reportan valores de P para nopal liofilizado mayores (7-8 g/100g BS) en comparación con métodos de deshidratación de aire caliente y secado en túnel (4-5 g/100g BS). Estos investigadores asocian el aumento de P en el nopal liofilizado con el contenido de H, proponen que, pudo haber una concentración aparente de P. No obstante, el valor de P para T3 (nopal liofilizada) fue menor en comparación con T1 y T2, posiblemente la reducción de P presentada se deba a que, en el proceso de liofilización no hay formación de productos provenientes de reacciones químicas derivadas por la temperatura, a diferencia de la deshidratación mediante aire caliente, donde la influencia del calor genera reacciones de activación para formar o conjugar nuevos compuestos como en el caso de los grupos amino (proteínas) con el grupo carbonilo (azúcares) (Lund y Ray, 2017).

El extracto etéreo (EE) también fue afectado por el tratamiento ( $p < 0.05$ ), T1 (2.18 g/100g BS) y T2 (1.90 g/100g BS) son estadísticamente iguales, pero estos, a su vez fueron mayores ( $p < 0.05$ ), a T3 (1.49 g/100g BS). La cantidad de EE reportadas por Hernández *et al.* (2010) de 1.5 g/100g BS, en cladodios de 3 meses es similar al valor de T3 (Tabla 2). Como se ha venido mencionando, las propiedades químicas del nopal, tienden a depender de factores como edad, y se ha comprobado que, conforme aumenta la edad, el valor de EE disminuye, en este sentido, se encuentra una mayor cantidad de EE en nopales de 22 días 3.00 g/100g BS en comparación con nopales de 64 días 1,96 g/100g BS de EE (Rodríguez *et al.*, 2007).

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

Tabla 2. Medias de mínimos cuadrados para las variables del análisis químico proximal del nopal forrajero (*O. ficus-indica*) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.

Variable	Tratamiento 1		Tratamiento 2		Tratamiento 3	
	Media	EE	Media	EE	Media	EE
Humedad*	4.59 <sup>a</sup>	0.15	3.43 <sup>b</sup>	0.15	0.04 <sup>c</sup>	0.15
Proteína*	16.05 <sup>a</sup>	0.10	14.09 <sup>b</sup>	0.10	13.07 <sup>c</sup>	0.26
Extracto Etéreo*	2.18 <sup>a</sup>	0.13	1.90 <sup>a</sup>	0.13	1.49 <sup>b</sup>	0.13
Cenizas*	26.06 <sup>a</sup>	0.32	22.89 <sup>b</sup>	1.32	18.67 <sup>c</sup>	0.32
Fibra dietética total*	34.85 <sup>a</sup>	1.50	27.62 <sup>b</sup>	1.50	26.94 <sup>b</sup>	1.50
Fibra insoluble*	27.51 <sup>a</sup>	0.78	21.40 <sup>b</sup>	0.78	9.24 <sup>c</sup>	0.78
Fibra soluble*	7.34 <sup>b</sup>	1.05	6.22 <sup>b</sup>	1.05	17.69 <sup>a</sup>	1.05
ELN*	20.87 <sup>c</sup>	1.54	33.50 <sup>b</sup>	1.54	39.87 <sup>a</sup>	1.54

Literales diferentes en filas indican diferencia estadística ( $p < 0.05$ ). \* = g/100g BS (%). EE = Error estándar

En relación a la variable cenizas (C) (Tabla 2) el valor más bajo (18.67 %/100g BS) fue el de T3, pero aun así se reportan valores más bajos ( $17.83 \pm 0.88$  %/100g BS) por Hernández (2010). Hernández *et al.* (2011) sugieren que los componentes que integran las cenizas varían en cuanto a factores como la composición de suelo donde crece el nopal y la disponibilidad de agua, aspecto que no pudo afectar en la diferencia que se presentó, ya que, en los tres tratamientos, la muestra de nopal fue homogénea en cuanto a dichas características, no obstante, muestran diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) entre ellos para dicha variable (cenizas). Por otra parte, Siti *et al.* (2018) en su estudio reportan que el contenido de C en la albaca liofilizada es menor en comparación la albaca deshidratada mediante horno de vacío, resultados que son similares a los obtenidos en los tres tratamientos, en el sentido que la cantidad menor se obtuvo en la albaca liofilizada.

La variable FDT se comportó de manera diferente ( $p < 0.05$ ) en el T1 (34.85 % /100g BS) respecto al T2 (27.62 % /100g BS) y T3 (26.94 % /100g BS); se observa que la muestra de nopal deshidratada a 50 °C (T1) contiene un valor mayor en FDT y FI (34.85 y 27.51 g/100g BS, respectivamente) respecto al deshidratado a 60 °C (T2) y al nopal liofilizado (T3). En el caso de la FI, el valor más bajo es de 9.24 g/100g BS y para la variable FS, el más alto es de 17.69 g/100g BS los cuales corresponden a T3. Celis (2009) reporta valores para FI y FS de 37.94 y 25.26 %/100g BS en cladodios de 2 meses de edad. Mientras que, Rojas *et al.* (2015) reportan 43.44 y 2.53 %/100g BS en cladodios de 3.3 meses de edad, valores que, se

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

encuentran por arriba de los reportados en la Tabla 2 y que pudieron deberse a factores como el riego y precipitación (Martínez *et al.*, 2015).

Finalmente, en cuanto al análisis químico proximal se refiere, los valores de extracto libre de nitrógeno (ELN), fueron estadísticamente diferentes ( $p < 0.05$ ) entre tratamientos, y su comportamiento fue a la inversa que la mayoría de las variables de la Tabla 2, de tal manera que, el valor más alto de ELN (39.87 g/100g BS) le corresponde al T3 seguido de T2 (33.50 g/100g BS) y T1 (20.87 g/100g BS). Hernández *et al.*, (2011) y Pérez *et al.* (2015) reportan 55.15 g/100g BS y 40.64 g/100g BS de ELN, respectivamente; estos valores, son mayores a los encontrados en la Tabla 2.

Las diferencias en los valores de las variables ELN pueden ser explicadas a través del rompimiento de enlaces, provocado lo anterior por el tratamiento térmico, lo cual se ve reflejado en el incremento de carbohidratos en las muestras analizadas (De Santiago *et al.*, 2018). No obstante, se han reportado valores mayores de ELN en muestras liofilizadas que en deshidratadas por algún otro método (Siti *et al.*, 2018).

#### ***Determinación de sólidos solubles totales, actividad de agua, color y pH***

De acuerdo con los resultados obtenidos en las muestras deshidratadas de nopal de los tres tratamientos, para la variable pH (4.35, 4.65 y 3.92 para T1, T2 y T3, respectivamente), se encontró que fueron estadísticamente diferentes ( $p < 0.05$ ). Ayadi *et al.* (2009), Méndez *et al.* (2015) y Andreu *et al.* (2017) reportan valores de pH similares a los encontrados en la Tabla 3 (pH entre 3.84 y 6.02).

El parámetro de sólidos solubles totales (SST) principalmente ha sido usado como indicativo de calidad y madurez de frutas y verduras, y está constituido por aquellas sustancias que se disuelven en agua, principalmente azúcares (Li *et al.*, 2016). En cuanto a los valores de SST, de las muestras de *O. ficus-indica* el valor mayor (6.78 °Brix) es para el nopal liofilizado (T3), mientras que en el nopal de T1 y T2, son estadísticamente iguales ( $p > 0.05$ ). Al respecto Méndez *et al.* (2015) reportan valores menores en SST (4.11 °Brix) en cladodios de 8 meses de edad.

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

Esta variable, al igual que las correspondientes al AQP, está determinada por factores como la especie y la época y hora de cosecha, Jiménez (2017). Sin embargo, y como ya se mencionó anteriormente, las muestras de nopal en los tres tratamientos de la presente investigación, fueron homogéneas en cuanto a edad, por lo que la diferencia encontrada en el T3 respecto al T1 y T2, pudo deberse a una mayor concentración de SST en la nopal de nopal liofilizada (T3), debido a que, ésta tiene una humedad menor en comparación con el nopal deshidratado por aire caliente, lo que provoca que la muestra liofilizada al ser pesada, contenga mayor volumen.

Tabla 3. Medias de mínimos cuadrados para las variables pH, sólidos solubles totales y actividad de agua del nopal forrajero (*O. ficus-indica*) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.

Variable	Tratamiento 1		Tratamiento 2		Tratamiento 3	
	Media	EE	Media	EE	Media	EE
pH	4.35 <sup>b</sup>	0.01	4.65 <sup>a</sup>	0.01	3.92 <sup>c</sup>	0.01
SST (°Brix)	5.23 <sup>b</sup>	0.14	5.43 <sup>b</sup>	0.14	6.78 <sup>a</sup>	0.14
Actividad de agua	0.29 <sup>a</sup>	0.1	0.25 <sup>b</sup>	0.1	0.25 <sup>b</sup>	0.1

Literales diferentes en filas indican diferencia estadística ( $p < 0.05$ ). EE = Error estándar

En relación con la  $A_w$ , se encontró efecto de tratamiento ( $p < 0.05$ ), así el valor mayor, corresponde al T1 (0.29) en comparación con T2 y T3 (0.25 para ambos), mismos que son estadísticamente iguales ( $p > 0.05$ ). De acuerdo con los resultados anteriores se puede establecer que, el nopal deshidratado de los tres tratamientos es óptimo para su almacenaje por largo tiempo; puesto que, un valor de  $AA \leq 0.61$  no permite el desarrollo y proliferación de microorganismos ni reacciones enzimáticas (Martínez *et al.*, 2015; Tapia *et al.* 2020).

En el caso del color del nopal, los valores del T1 fueron:  $L^*$  34.54,  $a^*$  -1.47 y  $b^*$  11.47; mientras que para el T2 los valores fueron de  $L^*$  25.97  $a^*$  -2.15 y  $b^*$  9.51; y T3 fueron  $L^*$  26.32  $a^*$  -5.64 y  $b^*$  13.50 (Tabla 4); valores que son menores a los reportados por Ramírez *et al.* (2013) en nopales de 1 mes de edad deshidratados por liofilización ( $L^*$  65.21,  $a^*$  -10.11 y  $b^*$  18.10). No obstante, se encuentran diferentes valores para el color de los cladodios de nopal deshidratados, como en el caso de Ayadi *et al.* (2009) quienes reportan valores de  $L^*$  73.53,  $a^*$  -8.45 y  $b^*$  25.53, para cladodios de nopal de entre 2 y 3 años de edad, valores que, son mayores a los de la presente investigación.

Tabla 4. Medias de mínimos cuadrados para la variable color de nopal forrajero (*O. ficus-indica*) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.

Variable de color	Tratamiento 1		Tratamiento 2		Tratamiento 3	
	Media	DE	Media	DE	Media	DE
L*	34.54	5.82	25.97	5.01	26.32	3.66
a*	-1.47	0.46	-2.15	0.49	-5.64	0.82
b*	11.47	1.48	9.51	0.95	13.50	1.56
IC	-3.61 <sup>c</sup>	0.24	-8.72 <sup>b</sup>	0.67	-16.01 <sup>a</sup>	1.55

Diferencia de color para el nopal/tratamiento			
Variable	Media	DE	
T1 vs. T2	8.86 <sup>ab</sup>	4.69	
T2 vs. T3	4.74 <sup>a</sup>	1.63	
T3 vs. T1	9.78 <sup>b</sup>	4.03	

Literales diferentes en filas indican diferencia estadística ( $p < 0.05$ ). DE = Desviación estándar IC = Índice de Color.

Al comparar los valores referidos en la Tabla 4, el T3 fue el que mostró un color más verde en relación al T2 y T1, lo que concuerda con Contreras *et al.* (2012), que también reportan un color más verde para el nopal liofilizado en comparación con otros procesos de deshidratación. Aspecto que se corroboró mediante el índice de color (IC); en este sentido, los valores fueron diferentes ( $p < 0.05$ ) entre las muestras de nopal analizadas, por lo que se pudo observar que estas se encuentran entre el verde profundo hasta el verde amarillento (Vignoni *et al.*, 2006).

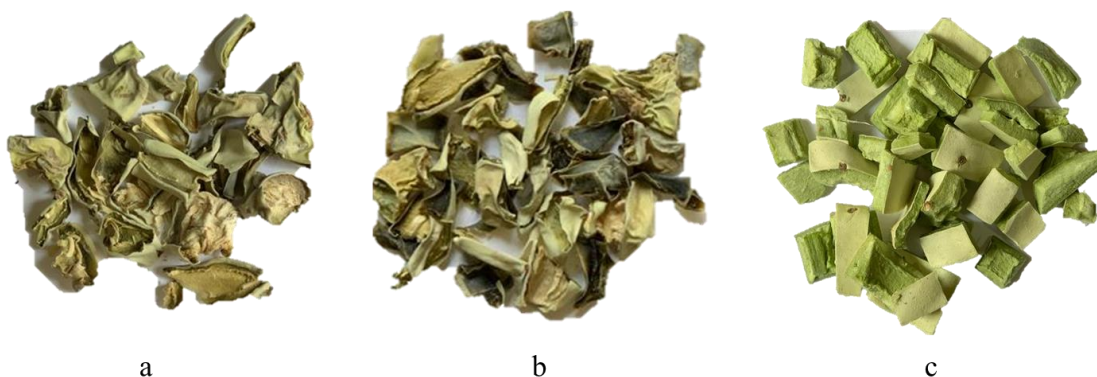


Figura 1. Estructura macroscópica del nopal forrajero (*O. ficus-indica*) de 3.5 meses de edad deshidratado a 50 °C (a), 60 °C (b) y liofilizado (c).

El color marrón observado en el nopal del T1 y T2 (Figura 1), es indicativo de la producción de reacciones de pardeamiento no enzimático (reacciones Maillard), las cuales se producen durante la deshidratación a elevadas temperaturas o por periodos largos de exposición al calor (Palzer *et al.*, 2012); el color marrón en los alimentos deshidratados indica la formación de compuestos (melanoidinas) mismos que influyen en la composición, estructura y

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

funcionamiento de los componentes que integran el alimento (Lund y Ray, 2017); además, se observa que, el nopal del T1 y T2, sufrió cambios macroscópicos, es decir, al extraer el agua, la estructura colapsó. Contrario a ello, en el nopal liofilizado, no hubo presencia de pardeamiento ni colapso en la estructura (Figura 1).

Se ha señalado que, el nopal *O. ficus-indica* tiene potencial de alimento funcional debido a su contenido de FDT (Ventura *et al.*, 2017), elemento que, es esencial dentro de la alimentación humana y animal. En la presente investigación se analizó dicha variable, en la cual, se observaron diferencias ( $p < 0.05$ ) para sus valores promedio de acuerdo al tratamiento (T1= 50 °C; T2= 60 °C y T3= liofilización), en donde el nopal del T1 fue en el cual se logró una mayor extracción de FDT; esta variable se analiza más a detalle en los siguientes capítulos (IV, V y VI) y se complementa con análisis de espectroscopía y difracción de rayos X, para observar si se genera un cambio en su estructura por efecto de la temperatura.

## CONCLUSIÓN

Previamente (Capítulo I) se señaló que, en la deshidratación del nopal forrajero mediante aire caliente, se logra mayor eficiencia del proceso al implementar una temperatura de 60 °C; sin embargo, en la presente investigación se establece que, dicho proceso, provoca disminución de proteína, fibra dietética y fibra insoluble presentes en la cactácea. Por lo que, la deshidratación mediante aire caliente a 50 °C, es la mejor alternativa para la conservación e implementación pecuaria del nopal forrajero en la dieta de los animales, debido a que, con esta temperatura de deshidratación, se aumenta la cantidad de proteína, fibra dietética total y fibra insoluble en relación con 60 °C.

## BIBLIOGRAFÍA

- Andreu, L., Nuncio-Jáuregui, N., Carbonell-Barrachina, Á. A., Legua, P., & Hernández, F. (2018). Antioxidant properties and chemical characterization of Spanish *Opuntia ficus-indica* Mill. cladodes and fruits. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(4), pp. 1566-1573.
- Aruwa, C. E., Amoo, S. O., & Kudanga, T. (2018). *Opuntia* (Cactaceae) plant compounds, biological activities and prospects—A comprehensive review. *Food Research International*, 112, pp. 328-344.

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

- Ayadi, M. A., Abdelmaksoud, W., Ennouri, M., & Attia, H. (2009). Cladodes from *Opuntia ficus indica* as a source of dietary fiber: Effect on dough characteristics and cake making. *Industrial Crops and Products*, 30(1), pp. 40-47.
- AOAC (1998) Official Method of Analysis. 15th Edition, Association of Official Analytical Chemists, Washington DC.
- Celis, F. E. F. (2009). Potencial nutracéutico de cladodios de nopal (*Opuntia spp*). Ms dissertation. Posgrado en Alimentos del Centro de la República: Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro México.
- Contreras, P. M., Gutiérrez, C. E., Valderrama, B. M. del C., Rojas, M. I., Espinosa, A. D. G., Suárez, V. R., & Rodríguez, G. M. E. (2012). Effects of drying process on the physicochemical properties of nopal cladodes at different maturity stages. *Plant Foods for Human Nutrition*, 67(1), pp. 44-49.
- De Santiago, E., Domínguez, F. M., Cid, C., & De Peña, M. P. (2018). Impact of cooking process on nutritional composition and antioxidants of cactus cladodes (*Opuntia ficus-indica*). *Food Chemistry*, 240, pp. 1055-1062.
- Flores, H. A., Peña, V. C. B., Hernández, M. L., Ramírez, S. R., Trejo, C. R., Meza, H. C. A., & Murillo, A. B. (2016). Caracterización isoenzimática de cultivares de nopal (*Opuntia spp.*). *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 3(7), pp. 75-89.
- Flores, O. M. A. y Reveles, H. M. (2010). Producción de nopal forrajero de diferentes variedades y densidades de plantación. *RESPYN. Edición Especial*, (5), pp. 198-210.
- Hernández, G. E., Ramírez, O. M. y de Mex, E. (2010). Efecto del estado de madurez sobre la composición química del nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) var. Milpa alta. Congreso Nacional de Ingeniería Bioquímica.
- Hernández, U. M. I., Contreras, P. M., Pérez, T. E., Hernández, Q. G., Rojas, M. J. I., Cortes, M. E., & Rodríguez, G. M. E. (2010). Study of nutritional composition of nopal (*Opuntia ficus indica* cv. Redonda) at different maturity stages. *The Open Nutrition Journal*, 4(1) pp. 11-16.
- Hernández, U. M. I., Pérez, T. E., & Rodríguez, G. M. E. (2011). Chemical analysis of nutritional content of prickly pads (*Opuntia ficus indica*) at varied ages in an organic harvest. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(5), pp. 1287-1295.
- INEGI: Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Anuario Estadístico del Estado de Michoacán. 2010. pp.127–142.
- Jimenez, J. J. 2017. Determinación de la hora óptima del día para la cosecha del nopal de verdura (*Opuntia ficus-indica*). Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Navarro, Unidad laguna, División de carreras Agronómicas. Torreón, Coahuila, México. pp. 1-40.
- Li, J. L., Sun, D. W., & Cheng, J. H. (2016). Recent advances in nondestructive analytical techniques for determining the total soluble solids in fruits: a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(5), pp. 897-911.
- Littell, C. R., Stroup, W. W., Freund, R. J. (2002). *SAS for linear models*. SAS institute.
- Lund, M. N., & Ray, C. A. (2017). Control of Maillard reactions in foods: Strategies and chemical mechanisms. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(23), pp. 4537-4552.

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

- Martínez, S. G.; Ortega, A. F., Flores, J. M. y Orozco, M. L. (2010). Características de secado de nopal (*Opuntia ficus-indica*) por lecho fluidizado. *Acta Universitaria*, 20(4), pp. 70-76.
- Martínez, S. G., Celis, F. F., Hernández, P. T., & Paredes, L. O. (2015). Effect of drying methods on the nutraceutical potential of cactus cladodes (*Opuntia spp.*). *International Journal of Food and Nutritional Science / Volume*, 2(6), pp. 1.
- Medina, T. L., Vernon, C. E. J., Gallegos, I. J. A., Rocha, G. N. E., Herrera, V. E. E., Calderas, F., & Jiménez, A. R. (2011). Study of the antioxidant properties of extracts obtained from nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) cladodes after convective drying. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(6), pp. 1001-1005.
- Méndez, L. P., Flores, F. T., Martín, J. D., Rodríguez, E. M. R., & Romero, C. D. (2015). Physicochemical characterization of cactus pads from *Opuntia dillenii* and *Opuntia ficus indica*. *Food Chemistry*, 188, pp. 393-398.
- Palzer, S., Dubois, C., & Gianfrancesco, A. (2012). Generation of product structures during drying of food products. *Drying Technology: An International Journal*. 30(1), pp. 97-105.
- Pérez, S. R. E., Delgado, S. L. A., García, S. P. A., Pulido, J. y Ortiz, R. R. (2015). Caracterización, modelación morfológica y análisis proximales de *Opuntia ficus-indica* y *O. atropes* durante las épocas de estiaje y lluvias. *Nova Scientia*, 7(15), pp. 133-152.
- Pinos, R. J. M., Velázquez, J. C., González, S. S., Aguirre, J. R., García, J. C., Álvarez, G., & Jasso, Y. (2010). Effects of cladode age on biomass yield and nutritional value of intensively produced spineless cactus for ruminants. *South African Journal of Animal Science*, 40(3), pp. 245-250.
- Rodríguez, G. M. E., De Lira, C., Hernández, B. E., Cornejo, V. M. A., Palacios, F. A. J., Rojas, M. I., & Muñoz, T. C. (2007). Physicochemical characterization of nopal pads (*Opuntia ficus indica*) and dry vacuum nopal powders as a function of the maturation. *Plant Foods for Human Nutrition*, 62(3), pp. 107-112.
- Rojas, M. I., Gutiérrez, C. E., Bah, M., Rojas, M. A., Ibarra, A. C., Rivera, M. E., & Aguilera, B. M. A. (2015). Characterization of calcium compounds in *Opuntia ficus indica* as a source of calcium for human diet. *Journal of Chemistry*, 2015, pp. 1-8.
- Sáenz, C. (2000). Processing technologies: an alternative for cactus pear (*Opuntia spp.*) fruits and cladodes. *Journal of Arid Environments*, 46(3), pp. 209-225.
- Sáenz, C., & Berger, H. (2006). *Utilización agroindustrial del nopal* (Vol. 162). Food & Agriculture Org.
- Santos, D. M. del S., Barba de la Rosa, A. P., Héliès-Toussaint, C., Guéraud, F., & Nègre-Salvayre, A. (2017). *Opuntia spp.*: Characterization and benefits in chronic diseases. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2017, pp. 1-17.
- Siti, M. Y., Rabeta, M. S., & Antora, R. A. (2018). Effects of different drying methods on the proximate composition and antioxidant activities of *Ocimum basilicum* leaves. *Food Research*, 2(5), pp. 421-428.
- Stintzing, F. C., & Carle, R. (2005). Cactus stems (*Opuntia spp.*): A review on their chemistry, technology, and uses. *Molecular Nutrition & Food Research*, 49(2), pp. 175-194.

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

- Tapia, M. S., Alzamora, S. M., & Chirife, J. (2020). Effects of water activity (aw) on microbial stability as a hurdle in food preservation. *Water activity in foods: Fundamentals and Applications*, pp. 323-355.
- Torres, P. R. L., Morales, C. D., Ballinas, C. M. D. L. y Nevárez, M. G. V. (2015). El nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(5), pp. 1129-1142.
- Vázquez, A. R. E., Valdez, C. R., Gutiérrez, O. E. y Blanco, M. F. (2008). Caracterización e identificación de nopal forrajero en el noreste de México. *Revista Salud Pública y Nutrición*, 14, pp. 21-36.
- Ventura, A. R. I., Bosquez, M. E., Bautista, B. S., & Rivera, C. F. (2017). Cactus stem (*Opuntia ficus-indica* Mill): anatomy, physiology and chemical composition with emphasis on its biofunctional properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(15), pp. 5065-5073.
- Vignoni, L. A., Césari, R. M., Forte, M., & Miráble, M. L. (2006). Determinación de índice de color en ajo picado. *Información Tecnológica*, 17(6), pp. 63-67.

## Capítulo IV

### CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA DIETÉTICA TOTAL DEL NOPAL FORRAJERO (*Opuntia ficus-indica*) DESHIDRATADO A DIFERENTES TEMPERATURAS.

#### RESUMEN

Existe una amplia gama de plantas medicinales, dentro de las cuales se encuentra *O. ficus-indica* que, la cual, proporciona beneficios a la salud al ser consumida, por efecto de los componentes que la constituyen, dentro de los cuales destaca la fibra dietética. Dicho componente de los cladodios destaca por sus propiedades funcionales; además, la fibra se aprovecha para formulación de raciones o alimentos tanto para humanos como animales. Por ello el objetivo del estudio fue extraer y caracterizar la fibra dietética total (FDT) del nopal forrajero (*O. ficus-indica*) sometido a diferentes temperaturas de deshidratación. Se recolectaron 30 cladodios de una parcela con prácticas culturales, mismos que fueron fraccionados en cubos de 2x2x2 para su deshidratación. Se formaron tres tratamientos: T1= nopal deshidratado a 50 °C, T2= nopal deshidratado a 60 °C y T3 nopal liofilizado. En promedio se obtuvo de FDT 34.85, 27.62 y 26.94 g/100 g base seca (BS) para T1, T2 y T3 respectivamente, donde el valor de T1 fue estadísticamente diferente ( $p<0.05$ ) a los valores de T2 y T3. Respecto a los valores promedio de fibra insoluble (FI), estos fueron diferentes ( $p<0.05$ ) en cada tratamiento, T1 con 27.51 g/100 g BS, T2 21.40 g/100 g BS y T3 9.24 g/100 g BS. Finalmente los valores de fibra soluble (FS) fueron 7.34, 6.22 y 17.69 g/100 g BS para T1, T2 y T3 respectivamente. El análisis de espectroscopía FT-IR en la muestra de FI, reveló la presencia de grupos OH y CH que son atribuibles a la lignina y celulosa, mientras que en el espectro de FS mostró la presencia de los grupos hidroxilo y carboxilo asociados a los carbohidratos presentes en la fracción soluble de la fibra. En el análisis de difracción de rayos X para la FI se encontró la presencia de celulosa, whewellite, dolomita y oxalato de calcio hidratado, en cambio, para FS solo se encontraron 5 compuestos: xilosa, wheddellita, deoxi-d-ribosa, glauberita y spurrita. La cantidad de FI y FS es afectada por el proceso y temperatura de deshidratación, por lo que a 50 °C se permite un mayor aprovechamiento de la fibra dietética total.

**Palabras clave:** cladodios, fibra, FT-IR, DRX.

## INTRODUCCIÓN

En años recientes, se ha potenciado el uso de plantas medicinales a nivel mundial, la causa principal ha sido el auge y desarrollo acelerado de las enfermedades crónicas (Kaur *et al.*, 2012). México es un país catalogado por contar con una gama amplia de plantas medicinales dentro de las cuales, el género *Opuntia* (*spp*) es de los que destaca en su uso por los beneficios a la salud que genera al ser consumido, pero, también por su potencial biotecnológico (Santos *et al.*, 2017); *Opuntia ficus-indica* es una de las especies mayormente cultivada, no solo en México, sino que, en más partes del mundo (Saénz y Berger 2006), debido a su adaptabilidad en diferentes condiciones ambientales y, por su descubrimiento en la prevención y tratamiento de enfermedades como obesidad, arterosclerosis y diabetes (El-Mostafa *et al.*, 2014).

En la presencia de enfermedades o alteraciones metabólicas, la composición de la dieta es un factor determinante para el estado de salud, por ello, la dieta debe fungir como coadyuvante a preservar o reestablecer el estado homeostático en el ser vivo (Zaid *et al.*, 2015). Esto ha provocado que, se incursione en la búsqueda de alimentos que contengan compuestos bioactivos y propiedades funcionales que brinden ventajas al ser consumidos y que, además, sean de fácil acceso (Medina *et al.*, 2008); tal como, el nopal *O. ficus-indica* la cual ha sido propuesta como alimento esencial en la dieta, debido a los componentes que lo constituyen (Ayadi *et al.*, 2009; Bensadón *et al.*, 2010; El-Mostafa *et al.*, 2014; Rouhou *et al.*, 2018).

Las propiedades funcionales del nopal comprenden, capacidad antioxidante, antiinflamatoria (El-Mostafa *et al.*, 2014), actividad hipoglucémica (Kaur *et al.*, 2012), además, reduce los niveles de colesterol y triglicéridos (Muñoz *et al.*, 2014). Sin embargo, aún no se ha logrado establecer del todo, que componentes presentes en el nopal, son responsables de estas actividades (Méndez *et al.*, 2015); en la mayoría de las investigaciones se propone a la fibra como el principal agente de dichos efectos en la salud humana y animal, (Ventura *et al.*, 2017).

Santos *et al.* (2017) en su revisión, destacan la importancia de la fibra dietética (contenida en el nopal) en la alimentación tanto en humanos como animales, la cual se centra en, ayudar a reducir el peso corporal del individuo, al unirse dicha fibra a la grasa de la dieta y aumentar

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

su excreción, además, la fibra puede ralentizar la absorción de glucosa al aumentar la viscosidad de los alimentos en el intestino. Por su parte, Ordaz *et al.* (2017) reportan que el consumo de la fibra dietética contenida en el nopal reduce los niveles séricos de glucosa en cerdas lactantes.

Así pues, la fibra dietética contenida en el nopal en base fresca y seca (BF y BS) ha sido utilizada como ingrediente en la conformación de alimentos funcionales, para humanos (Bensadón *et al.*, 2010) y animales (Ortiz *et al.*, 2017). Sin embargo, en la alimentación animal, se busca obtener una fuente de fibra con alto rendimiento en producción y que además sea de bajo costo. No obstante, deben tomarse en cuenta los cambios (estructura, rendimiento y composición) que pueda llegar a ocasionar el proceso de deshidratación del nopal previo a la extracción de la fibra; es por ello que, el objetivo de la presente investigación fue caracterizar la fibra dietética del nopal forrajero *Opuntia ficus-indica* sometido a diferentes temperaturas de deshidratación.

## **MATERIAL Y MÉTODOS**

### ***Preparación de la muestra***

Se utilizaron cladodios de nopal forrajero nopal (*O. ficus-indica*) de 3.5 meses de edad cultivados en el Sector de cerdos perteneciente a la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), ubicado en el municipio de Tarímbaro Michoacán, México. Los cladodios se colectaron a las 7:00 am en el periodo de febrero-abril 2020, los cuales se lavaron y desinfectaron, para después ser fraccionados en cubos de 2x2x2 para formar una muestra homogénea (pool).

Una porción del pool (3 kg) conformó el tratamiento 3 (T3), el cual se liofilizó en un equipo Freezone 4.5 LABCONCO™ bajo condiciones de  $-50 \pm 3$  °C de temperatura y 0.110 mBar de vacío. El resto del pool, conformó los T1 y T2, las condiciones de deshidratación para T1 fueron 50 °C y T2 60 °C, con un tiempo de secado de 72 y 48 h respectivamente, se utilizó un horno de aire forzado (Ecoshel®); una vez finalizados los procesos para cada tratamiento (T1, T2 y T3) el nopal se trituró y tamizó a 250  $\mu$ m, se almacenaron de forma independiente en bolsas herméticas y se colocaron en un desecador a 25 °C.

### ***Determinación de la Fibra Dietética Total, Soluble e Insoluble.***

La cantidad de fibra dietética total (FDT), se determinó por la suma de la fibra soluble (FS) y la fibra insoluble (FI). La determinación se realizó mediante el método enzimático-gravimétrico, con el Kit FDT-100A el cual se obtuvo de Sigma (St. Louis, MO, USA), con ligeras modificaciones; al nopal (1 gramo/T) libre de grasa (técnica por soxhlet) se le añadió 50 ml de buffer fosfato (pH 6) mas 100  $\mu$ l de  $\alpha$ -amilasa, y se mantuvo en un termo-baño a 95 °C durante 30 minutos (se agitó la mezcla cada 5 minutos). Posteriormente, se ajustó el pH a 7.5 con hidróxido de sodio (NaOH) a una temperatura de 28 °C; inmediatamente después se agregaron a la mezcla 100  $\mu$ l de proteasa (diluida en buffer fosfato), se homogenizó la mezcla y se procedió a colocar nuevamente en un termo-baño a 60 °C (la mezcla se agitó cada 5 minutos); una vez cumplidos 30 minutos, se dejó enfriar (28 °C) para nuevamente ajustar el pH a 4.5 con ácido clorhídrico (HCl), por último se agregaron 100  $\mu$ l de amilogucosidasa se colocó en el termo-baño (60 °C /30 minutos y agitación cada 5 minutos).

Una vez terminado el proceso anterior, se procedió a filtrar (Whatman 1) la muestra tratada (FI); se recuperó el líquido filtrado y se precipitó con 500 ml de etanol (96%), se dejó reposar a 4 °C durante 24 h, para después filtrar (Whatman 2) la solución precipitada (FS). Cada papel filtro con la muestra se lavó tres veces, con 30 ml de etanol (78%), 30 ml de etanol (96%) y finalmente con acetona (30 ml). Al terminar los lavados, los papeles se colocaron a peso constante durante 1 hora a 105 °C. La mitad de los papeles de cada T se destinó para corrección de ceniza y la otra mitad a corrección de proteína; los cálculos se realizaron de acuerdo a como se indica el kit. La determinación se realizó por sextuplicado en cada tratamiento.

### ***Análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)***

Se utilizó un espectrofotómetro de Infrarrojo con Transformada de Fourier (Bruker, modelo Tensor 27) que se operó en un rango de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ , con una resolución de 4  $\text{cm}^{-1}$ , a una temperatura de 18.7 °C con humedad relativa del 41%. Las muestras de FI y FS de cada tratamiento (300  $\pm$  10  $\mu$ g) se mezcló con 3.5  $\pm$  0.05  $\mu$ g de bromuro de potasio para espectroscopia IR (Uvasol®), para formar una pastilla que después se colocó en el rayo infrarrojo.

### ***Analisis de difraccion de rayos X (DRX)***

Para determinar las estructuras cristalinas, se analizaron tanto las muestras de fibra soluble como insoluble (FS-FI) extraídas de nopal, mediante un difractor Bruker D8 Advance® con un barrido Bragg-Brentano bajo condiciones de funcionamiento del difractor de 40 kV y 40 mA, con una longitud de onda de 1.5418 Å. Los datos se recolectaron en una escala 2θ de 5° a 85° a 0.02°/segundos con 4000 segundos de duración. Para el análisis de los difractogramas se utilizó el software X'Pert HighScore Plus®.

### ***Análisis de datos***

Los datos obtenidos, se analizaron a través de la metodología mediciones repetidas mediante los modelos de efectos fijos (Littell *et al.*, 2002). El modelo matemático fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

$Y_{ij}$ = Variable respuesta (FDT, FS, FI).

$\mu$ = Promedio general.

$T_i$ = Tratamiento con  $i$  ésimo tratamiento = T1, T2 y T3.

$\varepsilon_{ij}$ = Efecto aleatorio asociado con cada observación ( $\sim NID = 0, \sigma^2_e$ ).

Las diferencias entre tratamientos se obtuvieron a través de medias de mínimos cuadrados (LsMeans) a un  $\alpha=0.05$  (Littell *et al.*, 2002).

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### ***Determinación de fibra dietética total, soluble e insoluble.***

En el ámbito alimenticio se ha clasificado la fibra dietética como la suma de la fibra insoluble (celulosa, hemicelulosa, hemicelulosas neutras y lignina) y la fibra soluble (mucílago, gomas, almidón resistente, pectinas y hemicelulosas ácidas) (De Santiago *et al.*, 2018), es por ello que, en la presente investigación se determinaron y evaluaron ambas fibras obtenidas del nopal (*O. ficus-indica*) deshidratado mediante diferentes procesos. De acuerdo con los resultados obtenidos a través de estadística descriptiva para las variables analizadas en esta investigación se encontró que, la FDT presentó mayor homogeneidad en T1 (6.4 %) y T2

(6.8 %) vs. T3 (21.0 %) al comparar los CV de cada tratamiento analizado. Sin embargo, T1 fue quien mostró mayor ( $p<0.05$ ) cantidad promedio de FDT ( $34.9 \pm 2.2$  g/100g BS) en comparación con el resto de los tratamientos evaluados (Tabla 1). No obstante, dicho promedio fue menor al reportado por Rojas *et al.* (2015) en cladodios de 3.3 meses de edad y deshidratados a 50 °C (FDT = 45.97 g/100g BS). Por otra parte, cuando se compara la cantidad de FDT del T1 con el valor promedio de FDT determinado por Núñez *et al.* (2013) (33.7 g/100g BS) en cladodios más jóvenes (1 mes) y deshidratados por calor, este es menor al valor en T1.

Jaramillo *et al.* (2003) determinaron que, el proceso térmico aplicado en muestras de *O. ficus-indica*, puede desencadenar un aumento en la FDT debido a que las fracciones solubles (pectina y mucílago) de la fibra pueden formar complejos con otros compuestos. Aspecto que posiblemente influyó en la diferencia ( $p<0.05$ ) entre los valores promedio de FDT de T1 y T2. Puesto que, a pesar de que dichos tratamientos fueron sometidos a diferentes temperaturas, 50 °C (T1) y 60 °C (T2), el tiempo de exposición fue mayor para T1 (72 h) vs. T2 (32 h).

Lo anterior pudiera ofrecer la respuesta a la diferencia entre los valores de la FDT en T1 (34.9 g/100g BS) y T2 (27.6 g/100g BS), puesto que, Martínez *et al.* (2015) también encontraron un aumento de FDT en cladodios de nopal (15 días de edad) sometidos a diferentes procesos de secado. Por otra parte, De Santiago *et al.* (2018), también observaron un incremento en FDT en nopales sometidos a deshidratación por calor en comparación con nopales liofilizados; estos autores atribuyen dicho incremento a la despolimerización y ruptura de enlaces glucosídicos en los polisacáridos de la fibra, provocada por el tiempo de exposición al calor de las muestras deshidratadas.

Los reportes sobre la relación existente entre el valor de FS y FI es muy variable en investigaciones previas; así, Sáenz (1997) reportan una relación de 1:2, Méndez *et al.* (2015) señalan 1:4 y Rodríguez *et al.* (2007) de 1:3, diferencias atribuidas a la edad de los cladodios. En la presente investigación se encontró una relación FS-FI diferente para cada tratamiento, aún y cuando las muestras pertenecían a cladodios de la misma edad, la relación fue: 1:4, 1:3 y 2:1 para T1, T2 y T3 respectivamente.

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

Las relaciones antes mencionadas exhiben que, la diferencia entre tratamientos puede explicarse a través de la variación de temperatura, tiempo y proceso de deshidratación a la cual fue sometido cada uno de estos. En este sentido, T1 y T2 comparten el mismo proceso de deshidratación (secado por condensación) pero, el tiempo y la temperatura de exposición fue diferente en ambos; la relación mayor (1:4) de FS y FI corresponde al nopal deshidratado a 50 °C/72 h (T1), mientras que, la relación 1:3 -que es la más cercana a lo reportado por otros autores- corresponde al nopal deshidratado a 60 °C/32 h (T2). La relación (FS-FI) obtenida del nopal liofilizado (secado por sublimación), se presentó a la inversa (2:1), es decir, se obtuvo un valor mayor para FS que para FI. No obstante, varios autores han demostrado que, en los cladodios de *O. ficus-indica* la cantidad de FI siempre es mayor que la FS, (Celis 2009; Bensadón *et al.*, 2010; Rojas *et al.*, 2015).

Para el caso de FI, se presentó mayor homogeneidad en T1 (CV=7.4 %) en comparación con el T2 (CV=10.1 %) y el T3 (CV=15.3 %). Con respecto a los valores promedio obtenidos para esta variable, estos fueron de  $27.5 \pm 2.0$ ,  $21.4 \pm 2.2$  y  $9.2 \pm 1.4$  g/100g BS de FI para T1, T2 y T3, respectivamente. Promedios que fueron diferentes entre sí ( $p < 0.05$ ) y, en donde el valor mayor de FI fue el T1 ( $27.5 \pm 2.0$ ) mismo que, fue similar al reportado por Núñez *et al.* (2013) en nopales de 1 mes de edad: 27.6 g/100g BS. Por otro lado, Rodríguez *et al.* (2007), reportan valores para FI de 29.87 y 41.65 g/100g BS en nopales de 0.7 y 2.1 meses de edad respectivamente; valores mayores al encontrado en T1 (Tabla 1). Los reportes por parte de Contreras *et al.* (2012) señalan que los procesos de secado en el nopal no afectan la cantidad de FI.

En cuanto a FS se refiere, esta presentó el mismo comportamiento que la FDT y FI, puesto que, el T1 manifestó mayor homogeneidad (CV=10.7 %) en comparación con T2 (CV=13.7 %) y T3 (CV=24.2 %). En lo referente a los valores promedio de FS obtenidos en cada tratamiento, estos fueron de  $7.3 \pm 0.8$ ,  $6.2 \pm 0.9$  y  $17.7 \pm 4.3$  g/100g BS para T1, T2 y T3 respectivamente, siendo el nopal liofilizado (T3) el que presentó mayor ( $p < 0.05$ ) cantidad de FS en comparación con el resto de los tratamientos evaluados (Tabla 1). Rojas *et al.* (2015) reportaron un valor (2.53 g/100g BS) inferior (FS) a los encontrados en esta investigación, en cladodios de 3.3 meses de edad y deshidratado a 50 °C. Por su parte Rodríguez *et al.* (2007) encontraron un valor de 18.21 g/100g BS para FS en cladodios de nopal de 1.3 meses

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

de edad, deshidratado a 40 °C; valor que es mayor a lo observado en los tratamientos analizados (Tabla 1).

Tabla 1. Medias de mínimos cuadrados para fibra dietética total, fibra insoluble y fibra soluble del nopal forrajero (*O. ficus-indica*) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.

Variables	Tratamiento 1		Tratamiento 2		Tratamiento 3	
	Media	E.E.	Media	E.E.	Media	E.E.
Fibra dietética total*	34.9 <sup>a</sup>	1.5	27.6 <sup>b</sup>	1.5	26.9 <sup>b</sup>	1.5
Fibra Insoluble*	27.5 <sup>a</sup>	0.78	21.4 <sup>b</sup>	0.78	9.2 <sup>c</sup>	0.78
Fibra soluble *	7.3 <sup>b</sup>	1.05	6.2 <sup>b</sup>	1.05	17.7 <sup>a</sup>	1.05

Literales diferentes en filas indican diferencia estadística ( $p < 0.05$ ). E. E. = Error estándar. \* = g/100g BS.

Es un hecho que, la FI y la FS tienen una correlación negativa, ello indica que, conforme avanza la edad del cladodio, se eleva la FI, pero tiende a disminuir la FS (Rodríguez *et al.*, 2007). Además, se informa que, factores como las características ambientales donde se desarrolla el nopal, la especie y estación de cultivo (Stintzing y Calé 2005) así como la ausencia o aplicación de prácticas culturales a la planta (Hernández *et al.*, 2010), influyen en la cantidad de fibra tanto soluble como insoluble presente en los nopales.

De acuerdo a lo anterior, cabe señalar que, las muestras de nopal destinadas a cada tratamiento en la presente investigación, contaron con las mismas características de cultivo, especie, prácticas culturales, fecha de corte y edad, lo cual descarta la posibilidad de que la diferencia estadística ( $p < 0.05$ ; Tabla 1) encontrada en los tres tratamientos, para las variables FDT, FI y FS se deba a dichos factores, por lo tanto el proceso de deshidratación es el que determina hasta cierto punto dicha diferencia.

Lo que da cabida a una explicación en base al tratamiento térmico por el cual pasaron las muestras previo a su análisis. En este sentido el T3 (liofilización), al no someterse a un proceso de calor evitó un cambio en la estructura. Es decir, en el liofilizado se da una mayor extracción de agua sin afectar estructuras internas y sin provocar reacciones químicas de los compuestos, por lo que, al momento de la rehidratación del nopal liofilizado, las estructuras de la FS (que son mayormente hidrofílicas), se hidratan en mayor medida, en comparación con el nopal deshidratado por convección (el cual daña la estructura interna de la muestra y provoca reacciones químicas y desnaturalización de compuestos) (Karam *et al.*, 2016; Urs. 2019).

### **Análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)**

En la figura 1 se presentan los espectros de las muestras de FI de *O. ficus-indica* de los tres tratamientos, en los cuales se observa que, reportan el mismo patrón en las bandas, sin embargo, la intensidad del espectro en los tratamientos cambia, así, se observa un mayor porcentaje de transmitancia en espectro correspondiente a la FI del T1, seguido del T3 y finalmente, el espectro con menor índice de transmitancia es el T2. Se reportaron cinco picos característicos ( $3423$ ,  $2917$ ,  $2852$ ,  $1735$  y  $1630$   $\text{cm}^{-1}$ ) los cuales se observan bien definidos.

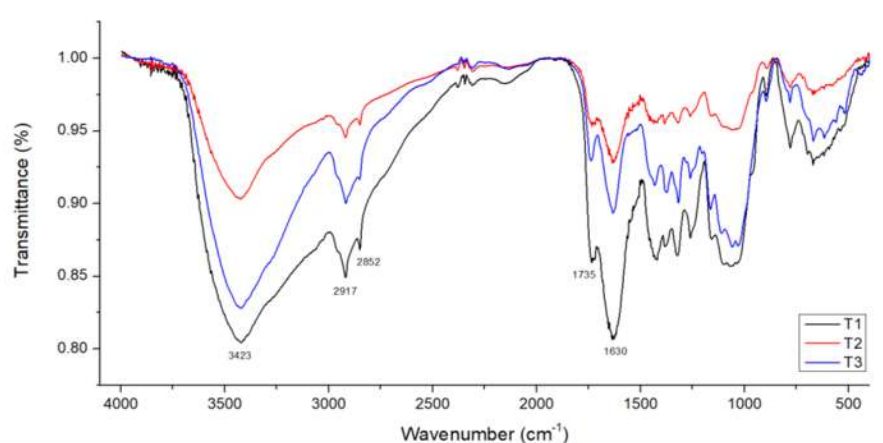


Figura 1. Espectro infrarrojo de la fibra dietética insoluble de nopal forrajero (*O. ficus-indica*) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.

La banda de  $3580$  a  $3110$   $\text{cm}^{-1}$  se atribuye a la vibración del enlace de hidrógeno del grupo funcional hidroxilo (OH), que tentativamente pudiera pertenecer a la estructura de celulosa (Johar *et al.*, 2012), dicha banda, como se observa (Figura 1), es más intensa y ancha en la FI del nopal deshidratado a  $50$   $^{\circ}\text{C}$ , lo que indica una mayor presencia de enlaces vibrando en relación con el T2 y T3. En los picos ubicados en  $2917$  y  $2852$   $\text{cm}^{-1}$  se encuentran con frecuencia vibraciones de tensión de los grupos OH y CH, enlaces que podrían pertenecer a la lignina y celulosa, respectivamente (Tejeda *et al.*, 2018).

El pico localizado en el número de onda a  $1735$   $\text{cm}^{-1}$  expresa la vibración de alargamiento de los grupos carboxilos (C=O), el cual, puede referir grupos acetyl o ésteres pertenecientes a los ácidos ferúlicos y *p*-cumáricos de la lignina y hemicelulosa (Sain y Pantlapulakkal 2006); Por su parte Cheick *et al.* (2018), mencionan que, la presencia de dicho pico pertenece a los ácidos carboxílicos y/o ésteres del xilano presente en la lignina o la hemicelulosa. La

intensidad de este pico se reduce notablemente en el T2, lo cual indica que una temperatura de 60 °C, puede inducir reacciones ente el grupo carboxilo(C=O) y algún otro compuesto que esté presente en la muestra.

El pico ubicado en 1630  $\text{cm}^{-1}$  corresponde al estrechamiento de los enlaces de hidrógeno y la flexión de grupos OH pertenecientes a la estructura de la celulosa, lo anterior señala una absorción de agua en la estructura (celulosa), al respecto, Naranjo *et al.* (2016) también reportan dicha banda en fibra asociada a la absorción de agua, estos autores argumentan que, el agua absorbida en las moléculas de celulosa es muy difícil de extraer debido a la interacción que se genera entre sus enlaces (agua-celulosa), que por lo general son por puentes de hidrógeno. De acuerdo a lo anterior, se puede observar (Figura 1) que el porcentaje de transmitancia en dicha longitud de onda (1630  $\text{cm}^{-1}$ ) en los tres tratamientos es diferente, así, con lo cual se puede establecer que, la deshidratación de los cladodios a 60 °C provoca una mayor eliminación de agua, sin embargo, ello podría implicar la pérdida de celulosa en la fracción insoluble de la fibra. Contrario a lo anterior, Rojas *et al.* (2015), reportan que la banda a 1625  $\text{cm}^{-1}$ , 1312  $\text{cm}^{-1}$  y 750  $\text{cm}^{-1}$  son atribuidas al oxalato de calcio.

En la región de “fingerprint” en los espectros de FI, se destacan nueve picos, dentro de los cuales se encuentra a una longitud de onda de 1428, 1377, 1318, 1256, 1162, 1111, 893, 779 y 666  $\text{cm}^{-1}$ ; para lo cual Rouhou *et al.* (2018) señalan que entre 1450 y 1000  $\text{cm}^{-1}$  se localizan los puntos pertenecientes a la celulosa. La banda a 893  $\text{cm}^{-1}$  corresponde a  $\beta$ -D-glucosa y los picos ubicados en 779 y 666  $\text{cm}^{-1}$  a la vibración fuera de plano de N-H y O-H respectivamente, señalan en su investigación (Monrroy *et al.*, 2017).

En relación al espectrograma de la fibra soluble aislada de *O. ficus-indica*, la Figura 2 muestra el comportamiento de los tres tratamientos, en la cual se observa que, el espectro correspondiente al T3 muestra un menor porcentaje de transmitancia, y esta aumenta en el T2, de modo que el mayor porcentaje de transmitancia corresponde a la FS del T1; lo cual sugiere que, la cantidad de enlaces presentes en cada banda de transmisión fue diferente en los tres tratamientos.

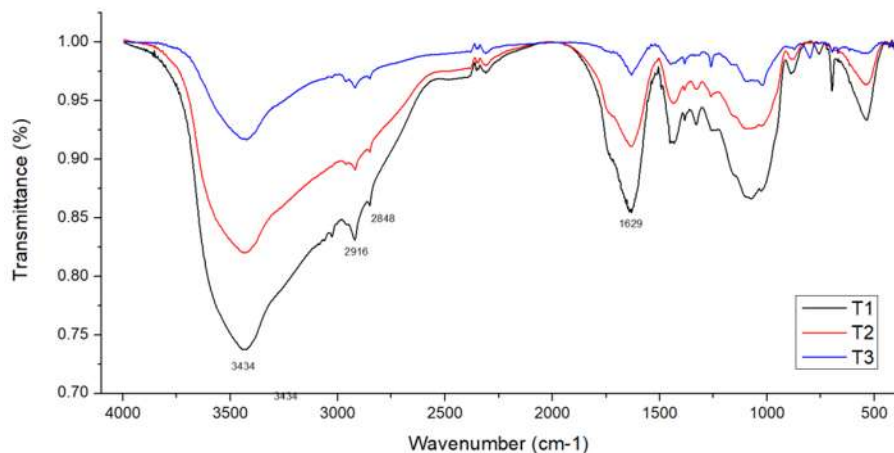


Figura 2. Espectro infrarrojo de la fibra dietética soluble de nopal forrajero (*O. ficus-indica*) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.

En los tres espectros se presentan cuatro picos a una longitud de onda de 3434, 2916, 2848 y 1629  $\text{cm}^{-1}$ . El pico de mayor intensidad y amplitud en los espectros, se localizó a 3434  $\text{cm}^{-1}$ , longitud a la cual se localiza el estiramiento de los grupos hidroxilo (OH), los cuales están vinculados a enlaces de hidrógeno entre las cadenas de polisacáridos y agua que conforman la FS (Guadarrama *et al.*, 2018) además, las bandas ubicadas entre 3500 y 3200  $\text{cm}^{-1}$  son reportadas como enlaces OH pertenecientes a carbohidratos del mucílago (Contreras *et al.*, 2016). El siguiente pico se posiciona a un número de onda de 2916  $\text{cm}^{-1}$  el cual se relaciona con el estiramiento del enlace C-H de los grupos de piranosa, seguida de una banda transmitida a 2848  $\text{cm}^{-1}$  atribuida al estrechamiento de un grupo carboxilo  $-\text{CH}_2$  de la misma piranosa (Contreras *et al.*, 2016). La región del espectrograma entre 1650 y 1600  $\text{cm}^{-1}$  está relacionada con el grupo carboxilo COOH (Madera *et al.*, 2018).

Los puntos ubicados posteriores al número de onda 1500  $\text{cm}^{-1}$  (fingerprint), fueron 1446, 1328, 1259, 1064, 881, 697 y 535  $\text{cm}^{-1}$ ; donde las bandas de 1446 y 1259  $\text{cm}^{-1}$  podrían ser asignadas al estrechamiento de C-O y a la vibración de enlaces O-H (Monrroy *et al.*, 2017). Contreras *et al.* (2016) señalan que las bandas cercanas a 1300 y 1033  $\text{cm}^{-1}$  podrían ser asignadas a la vibración del estrechamiento del anillo de piranosa. La banda a 881  $\text{cm}^{-1}$  corresponde a  $\beta$ -D-glucosa (Monrroy *et al.*, 2017). Por otra parte, Rojas *et al.* (2015), señalan que la presencia de bandas a los picos cercanos a 1420  $\text{cm}^{-1}$  y 875  $\text{cm}^{-1}$  ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) respaldan la presencia de los carbonatos de calcio.

**Analisis de difraccion de rayos X (DRX)**

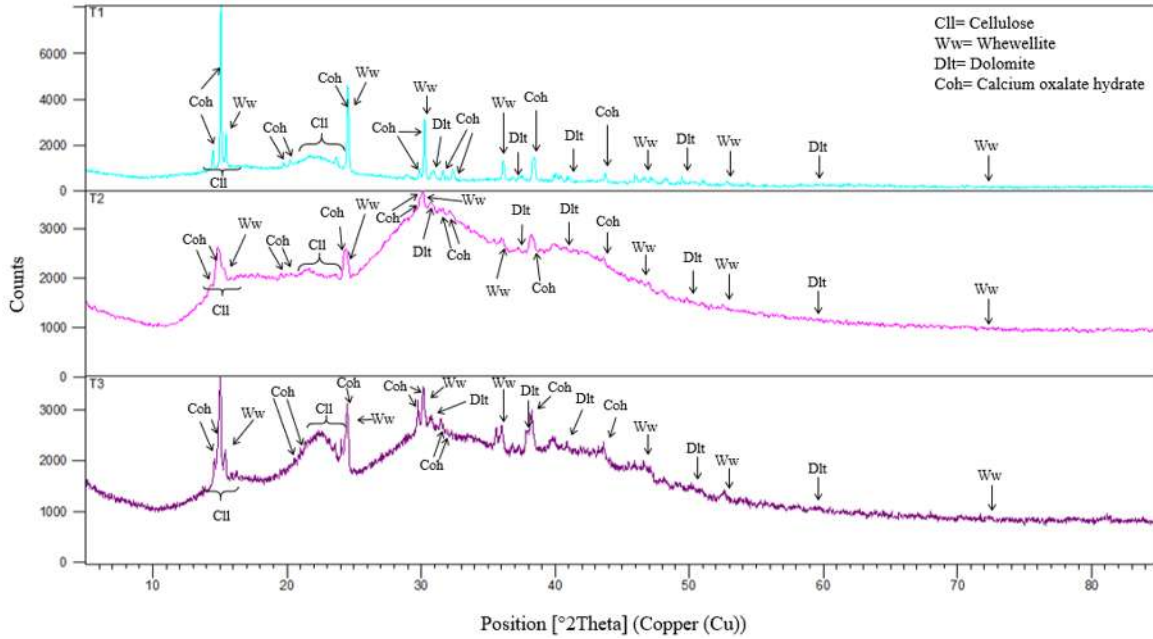


Figura 3. Patrones de difracción de rayos X de la fibra dietética insoluble de nopal forrajero (*O. ficus-indica*) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.

De acuerdo con los difractogramas de la fibra insoluble (FI) de *O. ficus-indica*, (Figura 3), se puede observar la presencia de cuatro compuestos cristaloides, como el oxalato de calcio monohidratado (Whewellite), al cual corresponden 7 picos en las tres muestras de FI, los más característicos ubicados entre 15, 24, 30 y 38° en el ángulo de difracción de 2θ. Rojas *et al.* (2015) reportan la presencia de whewellite en el patrón de difracción del cladodio completo en los mismos rangos que se reportan en la Figura 3 para FI, dichos autores solo reportan la presencia de oxalato de calcio hidratado (Coh) en muestra de FI, sin embargo en la presente investigación se encontraron ambos compuestos en FI. Los picos correspondientes al oxalato de calcio hidratado (Coh) fueron 11 en los tres patrones, donde los más característicos se localizaron en 14.8, 24.3, 29.9 y 38.1° en el ángulo de difracción de 2θ; lo anterior coincide con el patrón de FI de nopal reportado por Rojas *et al.* (2015) quienes señalan la presencia de Coh (wheddellite), aunque solo lo reportan en 14.36 y 32.2° (2θ).

Los picos correspondientes a la celulosa (CII) se localizaron a 15.0, 16.5 y 22.8° (ángulo 2θ) que, de acuerdo con Rouhou *et al.* (2018) dichos picos son característicos de la presencia cristalina de celulosa en cladodios de varios *Opuntias*; en los difractogramas de la Figura 3 se observa una diferencia entre las intensidades y definición de los picos pertenecientes a

celulosa, donde el T2 es el que muestra menos definición de los mismo, en relación con los patrones de T1 y T3. Los picos (Figura 3) que señalan la presencia del compuesto dolomita (Dlt; carbonato de calcio y magnesio) fueron 5 en los tres patrones de FI los cuales no se habían reportado previamente, sin embargo, la base de datos de X’Pert HighScore Plus® señaló una interacción significativa (49 puntos) con el compuesto.

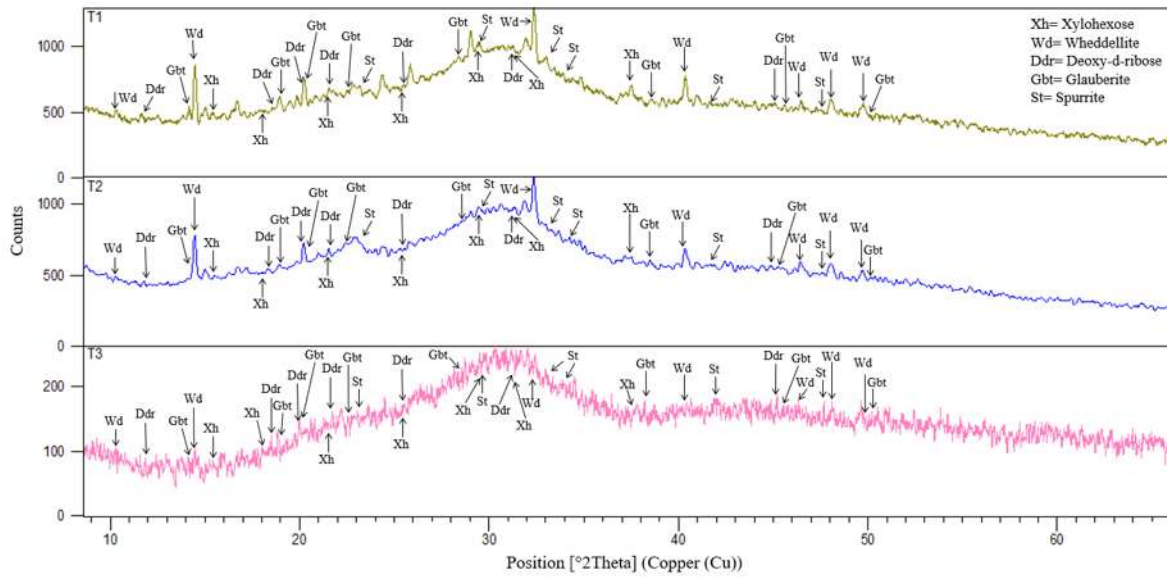


Figura 4. Patrones de digraccion de rayos X de la fibra dietética soluble del nopal forrajero (*O. ficus-indica*) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.

En la Figura 4 se muestran los difractogramas de rayos X de la FS (T1, T2 y T3) aislada de *O. ficus-indica* deshidratado a diferentes temperaturas. En los tres patrones se confirma la existencia del carbohidrato xilohexosa (Xh), donde los principales picos se localizaron a (2 $\theta$ ) 16.5, 21.6, 29.6 y 37.5°; otro carbohidrato referenciado por la base de datos (X’Pert HighScore Plus®) y que coincidió fuertemente con los difractogramas fue la Deoxi-d-ribosa (Ddr) con los picos más intensos en (2 $\theta$ ) 18.5, 20.2, 21.6 y 45.0°.

Rojas *et al.* (2015) reportan la presencia de calcita (C), glauberita (Gbt) y spurrita (St) en la FS de cladodios de nopal, pero en los patrones de FS (Figura 4) del nopal analizado en el presente estudio, solo se evidencian la Gbt y St, además de la wheddellita (Wd), ésta última es reportada por los mismos autores, pero en FI, con la ubicación (2 $\theta$ ) de los picos (Wd) en 14.3 y 32.2° los cuales coinciden con lo reportado en la Figura 4, así los picos más intensos fueron ubicados a (2 $\theta$ ) 14.4, 32.4 y 40.3°. Para los minerales Gbt y St, también hay

coincidencia de los picos entre Rojas *et al.* (2015) y los difractogramas de rayos x (Figura 4), ambos de la FS.

Se observa una diferencia en cuanto a la definición e intensidad de los picos en los patrones de cada tratamiento (Figura 4), lo anterior es más notable en el T3 donde hay ausencia de picos o baja intensidad con respecto a los T1 y T2, con ello se indica la presencia de otros compuestos o posible presencia amorfa de los mismo. En contraste, los difractogramas de T1 y T2 son más similares, a pesar de que la intensidad de los picos no es la misma, se observan más definidos. La diferencia encontrada, se atribuye al proceso de secado de los cladodios de nopal previo a la extracción de la fibra.

En la deshidratación del nopal forrajero, tanto el proceso como la temperatura generan diferencias en el contenido y en la estructura de la FS y FI de dicha cactácea. Sin embargo, los cambios en el mucílago y en la lignina se analizan en los siguientes capítulos (V y VI), en donde se determina la fluctuación de estos por efecto del proceso y temperatura de deshidratación del nopal.

## **CONCLUSIÓN**

La fibra dietética total, específicamente ambas fracciones, insoluble y soluble se incrementan con el proceso de deshidratación mediante aire caliente a 50 °C *vs.* 60 °C; además, mediante esté proceso y temperatura, la presencia de grupos funcionales y la cristalinidad de los elementos es mayor en los contenidos de ambas fracciones. No obstante, la fibra soluble disminuye con el proceso de aire caliente respecto al liofilizado. A pesar de que, se incrementa la cantidad de fibra soluble con el liofilizado, la presencia de grupos de funcionales y la cristalinidad de los elementos en ésta disminuyen. Por lo anterior, la deshidratación a 50 °C del nopal forrajero permite un mayor aprovechamiento de su contenido de fibra dietética total.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ayadi, M. A., Abdelmaksoud, W., Ennouri, M., & Attia, H. (2009). Cladodes from *Opuntia ficus indica* as a source of dietary fiber: Effect on dough characteristics and cake making. *Industrial Crops and Products*, 30(1), pp. 40-47.
- Bensadón, S., Hervert-Hernández, D., Sáyago-Ayerdi, S. G., & Goñi, I. (2010). By-products of *Opuntia ficus-indica* as a source of antioxidant dietary fiber. *Plant foods for human nutrition*, 65(3), pp. 210-216.
- Celis, F. E.F. (2009). Potencial nutracéutico de cladodios de nopal (*Opuntia* spp). Ms dissertation. Posgrado en Alimentos del Centro de la República: Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro México.
- Contreras, P. M., Gutiérrez, C. E., Valderrama, B. M. del C., Rojas, M. I., Espinosa, A. D. G., Suárez, V. R., & Rodríguez, G. M. E. (2012). Effects of drying process on the physicochemical properties of nopal cladodes at different maturity stages. *Plant Foods for Human Nutrition*, 67(1), pp. 44-49.
- Contreras, P. M., Rodríguez, G. M. E., Gutiérrez, C. E., Valderrama, B. M. del C., Rojas, M. J. I., & Rivera, M. E. M. (2016). Physicochemical and rheological characterization of *Opuntia ficus* mucilage at three different maturity stages of cladode. *European Polymer Journal*, 78, pp. 226-234.
- El-Mostafa, K., El Kharrassi, Y., Badreddine, A., Andreoletti, P., Vamecq, J., El Kebbjaj, M., ... & Cherkaoui-Malki, M. (2014). Nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a source of bioactive compounds for nutrition, health and disease. *Molecules*, 19(9), pp. 14879-14901.
- Guadarrama, L. A. Y., Castaño, J., Velázquez, G., Carrillo, N. H., & Alvarez, R. J. (2018). Effect of nopal mucilage addition on physical, barrier and mechanical properties of citric pectin-based films. *Journal of Food Science and Technology*, 55(9), pp. 3739-3748.
- Hernández, U. M. I., Contreras, P. M., Pérez, T. E., Hernández, Q. G., Rojas, M. J. I., Cortes, M. E., & Rodríguez, G. M. E. (2010). Study of nutritional composition of nopal (*Opuntia ficus indica* cv. Redonda) at different maturity stages. *The Open Nutrition Journal*, 4(1) pp. 11-16.
- Jaramillo, F. M. E., González, C. L., Cornejo, M. M., Dorantes, A. L., Gutiérrez, L. G. F., & Hernandez, S. H. (2003). Effect of thermal treatment on the antioxidant activity and content of carotenoids and phenolic compounds of cactus pear cladodes (*Opuntia ficus-indica*). *Food Science and Technology International*, 9(4), pp. 271-278.
- Johar, N., Ahmad, I., & Dufresne, A. (2012). Extraction, preparation and characterization of cellulose fibres and nanocrystals from rice husk. *Industrial Crops and Products*, 37(1), pp. 93-99.
- Karam, M. C., Petit, J., Zimmer, D., Djantou, E. B., & Scher, J. (2016). Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review. *Journal of Food Engineering*, 188, pp. 32-49.
- Kaur, M., Kaur, A., & Sharma, R. (2012). Pharmacological actions of *Opuntia ficus indica*: A Review. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 2(7), pp. 15-18.
- Littell, C. R., Stroup, W. W., Freund, R. J. (2002). *SAS for linear models*. SAS institute.
- Madera, S. T. J., Vargas, R. L., Núñez, C. C. A., González, G. G., Peña, C. V., Núñez, G. J. A., & Rodríguez, N. J. R. (2018). Mucilage from cladodes of *Opuntia spinulifera*

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero  
(*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

- Salm-Dyck: chemical, morphological, structural and thermal characterization. *CyTA-Journal of Food*, 16(1), pp. 650-657.
- Martínez, S. G., Celis, F. F., Hernández, P. T., & Paredes, L. O. (2015). Effect of drying methods on the nutraceutical potential of cactus cladodes (*Opuntia* spp.). *International Journal of Food and Nutritional Science / Volume*, 2(6), pp. 1.
- Medina, T. L., Gallégo, I. J. A., González, L. R. F. and Rocha, G. N. E. (2008). Drying kinetics of nopal (*Opuntia ficus indica*) using three different methods and their effect on their mechanical properties. *LWT – Food Sci Technol* 41, pp. 1183–1188
- Méndez, L. P., Flores, F. T., Martín, J. D., Rodríguez, E. M. R., & Romero, C. D. (2015). Physicochemical characterization of cactus pads from *Opuntia dillenii* and *Opuntia ficus indica*. *Food Chemistry*, 188, pp. 393-398.
- Monrroy, M., García, E., Ríos, K., & García, J. R. (2017). Extraction and physicochemical characterization of mucilage from *Opuntia cochenillifera* (L.) Miller. *Journal of Chemistry*, 2017.
- Muñoz, L., Díaz, Y., González, C., Medina, E., & Cardona, E. (2014). Efecto de la administración oral de nopal deshidratado sobre el perfil de lípidos en individuos con dislipidemia y sobrepeso/obesidad. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 1(1), pp. 149-160.
- Naranjo, C. D. D., Alamilla, B. L., Gutiérrez, L. G. F., Terres, R. E., Solorza, F. J., Romero, V. S., & Mora, E. R. (2016). Isolation and characterization of cellulose obtained from *Agave salmiana* fibers using two acid-alkali extraction methods. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(1), pp. 31-43.
- Rodríguez, G. M. E., De Lira, C., Hernández, B. E., Cornejo, V. M. A., Palacios, F. A. J., Rojas, M. I., & Muñoz, T. C. (2007). Physicochemical characterization of nopal pads (*Opuntia ficus indica*) and dry vacuum nopal powders as a function of the maturation. *Plant Foods for Human Nutrition*, 62(3), pp. 107-112.
- Núñez, L. M. A., Paredes, L. O., & Reynoso, C. R. (2013). Functional and hypoglycemic properties of nopal cladodes (*O. ficus-indica*) at different maturity stages using in vitro and in vivo tests. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(46), pp. 10981-10986.
- Ordaz, O. G., Juárez, C. A., Pérez, S. R. E., Román, B. R. M., & Ortiz, R. R. (2017). Effect of spineless cactus intake (*Opuntia ficus-indica*) on blood glucose levels in lactating sows and its impact on feed intake, body weight loss, and weaning-estrus interval. *Tropical Animal Health and Production*, 49(5), pp. 1025-1033.
- Ortiz, R. R., Orozco, G. A., Val, A. D., Portillo, M. L., & Pérez, S. R. E. (2017). Efecto de la adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) a la dieta de cerdas lactantes sobre la producción y calidad de la leche. *Nova Scientia*, 9(18), pp. 290-312.
- Rouhou, M. C., Abdelmoumen, S., Thomas, S., Attia, H., & Ghorbel, D. (2018). Use of green chemistry methods in the extraction of dietary fibers from cactus rackets (*Opuntia ficus indica*): *Structural and Microstructural Studies. International Journal of Biological Macromolecules*, 116, pp. 901-910.
- Rojas, M. I., Gutiérrez, C. E., Bah, M., Rojas, M. A., Ibarra, A. C., Rivera, M. E., & Aguilera, B. M. A. (2015). Characterization of calcium compounds in *Opuntia ficus indica* as a source of calcium for human diet. *Journal of Chemistry*, 2015, pp. 1-15.
- Sáenz, C. (1997). Cladodes: a source of dietary fiber. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, pp. 30-46.

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero  
(*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

- Sáenz, C., & Berger, H. (2006). *Utilización agroindustrial del nopal* (Vol. 162). Food & Agriculture Org.
- Sain, M., & Panthapulakkal, S. (2006). Bioprocess preparation of wheat straw fibers and their characterization. *Industrial Crops and Products*, 23(1), pp. 1-8.
- Santos, D. M del S., Barba, de la R. A. P., Héliès, T. C., Guéraud, F. and Nègre, S. A. (2017). *Opuntia spp.: Characterization and Benefits in Chronic Diseases*. Volume 2017, Article ID 8634249, pp 1-17.
- Stintzing, F. C., & Carle, R. (2005). Cactus stems (*Opuntia spp.*): A review on their chemistry, technology, and uses. *Molecular Nutrition & Food Research*, 49(2), pp. 175-194.
- Tejada, T. C., Paz, A. I., Villabona, O. A., Espinosa, F. M., & López, B. del C. (2018). Aprovechamiento del Jacinto de Agua (*Eichhornia crassipes*) para la síntesis de carboximetilcelulosa. *Revista Cubana de Química*, 30(2), pp. 211-221.
- Urs, M. (2019). Study related to the quality of laboratory lyophilized fruits. *Analele Universității din Oradea, Fascicula: Ecotoxicologie, Zootehnie și Tehnologii de Industrie Alimentară*, 18(A), pp. 91-97.
- Ventura, A. R. I., Bosquez, M. E., Bautista, B. S., & Rivera, C. F. (2017). Cactus stem (*Opuntia ficus-indica* Mill): anatomy, physiology and chemical composition with emphasis on its biofunctional properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(15), pp. 5065-5073.
- Zaid, H., Saad, B., Mahdi, A. A., Tamrakar, A. K., Haddad, P. S., & Afifi, F. U. (2015). Medicinal plants and natural active compounds for diabetes and/or obesity treatment. pp. 1-2.

## Capítulo V

### CARACTERIZACIÓN DE MUCÍLAGO DEL NOPAL FORRAJERO (*Opuntia ficus-indica*) DESHIDRATADO A DIFERENTES TEMPERATURAS.

#### RESUMEN

Dentro de los componentes del nopal forrajero (*O. ficus-indica*) se encuentra el mucílago, que por sus cualidades físicas y mecánicas le permite implementarse como recubrimiento y protector de materiales y alimentos, como adhesivo orgánico, agente purificador, entre otros. Sin embargo, la mayor implementación del mucílago está en la alimentación, ya que su función en la salud es relevante, por lo que el objetivo fue extraer y caracterizar el mucílago de nopal forrajero (*O. ficus-indica*) deshidratado a diferentes temperaturas. Se cosecharon 30 cladodios (3.5 meses de edad), los cuales fueron fraccionados en cubos de 2x2x2. Se formaron dos tratamientos para la deshidratación mediante aire caliente: T1= 50 °C y T2= 60 °C, y para el proceso de liofilización solo hubo uno (T3). El rendimiento de mucílago extraído para T1, T2 y T3 fue 8.5%, 8.2% y 13.4%, donde el valor de T3 fue diferente ( $p < 0.05$ ) respecto a T1 y T2 (los cuales fueron iguales). La espectroscopía infrarroja (FT-IR) del mucílago de los tres tratamientos, reveló la presencia de grupos metilo los cuales pertenecen a los carbohidratos presentes en el mucílago. Mientras que en el difractograma (DRX) se encontró la presencia de oxalato de hidrógeno de potasio, el ácido mícico, fairchildite, galactosa, glucosa, calcita y silvina en el mucílago de los tres tratamientos. La cantidad de mucílago extraído del nopal forrajero deshidratado, es mayor mediante el proceso de secado por sublimación (liofilizado), sin embargo la presencia de grupos funcionales es igual tanto para el secado por aire caliente como el liofilizado.

**Palabras clave:** cladodios, fibra soluble, FT-IR, DRX.

## INTRODUCCIÓN

Los cladodios de nopal *Opuntia ficus-indica* en los últimos años han sido objeto de experimentación de varias investigaciones dedicadas a la nutrición humana y animal (Bensadón *et al.*, 2019), medicina (Santos *et al.*, 2017) entre otros; una gran variedad de estas investigaciones ha demostrado el valor nutricional que brinda el consumir el nopal tanto de forma absoluta como en forma aislada, esto quiere decir que, se han aislado ciertos componentes químicos que integran los cladodios, para su implementación como ingrediente en la dieta de algunos alimentos y forrajes (Méndez *et al.*, 2015).

En este sentido, los componentes que integran el nopal a grandes rasgos son: el agua (80–95%), seguido de carbohidratos (3–7%), fibras (12%), y proteínas (0.5–1%) (Santos *et al.*, 2017); de los cuales, el que se aísla con mayor frecuencia para su utilización es la fibra, cuando esta es separada del cladodio para el ámbito alimenticio, es comúnmente llamada fibra dietética que, para fines prácticos se ha dividido fibra soluble que contiene principalmente pectinas y mucílagos y en fibra insoluble que integra a la celulosa, hemicelulosa y lignina (De Santiago *et al.*, 2018). Dentro de la fibra soluble del nopal como se mencionó anteriormente se encuentra el mucílago, que se ha considerado el más relevante, ya que sus cualidades físicas y mecánicas le permite implementarse como recubrimiento y protector de materiales y alimentos, como adhesivo orgánico, agente purificador entre otros (Contreras *et al.*, 2016).

El mucílago de nopal es considerado como un polisacárido complejo integrado principalmente por azúcares como la arabinosa (35-40%), galactosa (20-25%), ramnosa (78%), xilosa (20-25%) y ácidos urónicos (7-8%) (Gibson y Nobel 1990); representa aproximadamente un 14 % de la base seca de los cladodios de *O. ficus-indica* (Ginestra *et al.*, 2009), además en base fresca contiene cerca del 30% del agua total del cladodio (Ventura *et al.*, 2017). Dicha capacidad de retención de agua junto a la mezcla de hidrocoloides heteropolisacáridos producen una sustancia viscosa (Contreras *et al.*, 2016). Por lo tanto, cuando el mucílago es consumido, la viscosidad de este, actúa en el intestino de forma mecánica al disminuir la absorción intestinal de algunas macromoléculas, lo que da como resultado beneficios para la salud (Ventura *et al.*, 2017; Ordaz *et al.*, 2017).

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

Lo anterior es de gran relevancia en el control y sostén de alteraciones metabólicas presentes tanto en humanos, como en animales de producción. En el caso de estos últimos, se ha observado que la ingesta de *O. ficus-indica* no solo mejora y mantiene el estado de salud, sino que también incrementa el desempeño productivo o fin zootécnico del animal. Al respecto Ordaz *et al.* (2017) señala que, la adición de nopal en la dieta de cerdas lactantes reduce los niveles de glucosa durante las primeras semanas de lactación e incrementa el consumo voluntario de alimento de la cerda lactante.

No obstante, la investigación y caracterización de *O. ficus-indica* y sus derivados (compuestos aislados) se ha centrado en edades tempranas del cladodio, es decir el nopal verdura que va dirigido a consumo humano, y se ha dejado de lado la investigación de *O. ficus-indica* forrajero. Por ello, es necesario conocer la composición general del nopal forrajero destinado a la alimentación animal, el cual comprende los cladodios de madurez avanzada (>3 meses de edad). Por lo que el objetivo fue determinar el rendimiento y caracterización de mucílago de nopal forrajero (*O. ficus-indica*) sometido a diferentes temperaturas de deshidratación.

## **MATERIAL Y MÉTODOS**

### ***Preparación de la muestra***

Se obtuvieron cladodios *O. ficus-indica* de una parcela con prácticas culturales ubicada en la unidad Posta de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo localizada en el municipio de Tarímbaro Michoacán México a una altura promedio de 1,855 metros sobre el nivel del mar, entre las coordenadas 19° 46' latitud norte y entre 101° 10' longitud oeste, con un clima templado por lo que su temperatura media anual es de 21 °C y la humedad media es de 62% (INEGI 2010).

Se cosecharon 30 cladodios por la mañana (7:00 h) en el periodo de febrero-abril del 2020, se obtuvieron cladodios de nopal de diferentes plantas madre, donde solo fueron considerados los cladodios que cumplieran con una edad promedio de 3.5 meses, para lo cual, previamente se había datado cada nopal al momento del brote. Inmediatamente después del corte, se lavaron con agua potable, después fueron colocados en agua destilada con solución de

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

hipoclorito de sodio 3% durante 10 min para su desinfección. Posterior a ello, se realizó el fraccionamiento de los cladodios en cubos de aproximadamente 2 x 2 x 2 cm, para formar un pool (9 kg), la cual se dividió en tres tratamientos (n= 3 kg/tratamiento).

El nopal del tratamiento 1 (T1), se sometió a deshidratación por convección a 50 °C durante 70 h, mientras que para el T2 la temperatura de deshidratación fue de 60 °C por 32 h, para ambos tratamientos se utilizó un horno de secado de aire forzado (Ecoshel®), mientras que para el T3 las muestras de nopal fueron liofilizadas, bajo las siguientes condiciones  $-50 \pm 3$  °C y 0.110 mBar de vacío por 72 h, en un equipo Freezezone 4.5 LABCONCO™ con la previa congelación de la muestra a una temperatura de -75 °C durante 24 h.

Después del proceso de deshidratación y liofilización, el nopal seco/tratamiento se pulverizó y tamizó (250 µm), posteriormente se almacenó el nopal en bolsas herméticas etiquetadas (T1, T2 y T3) en desecadores hasta su previo análisis.

### ***Extracción del mucílago***

La extracción de mucílago se realizó bajo la metodología de Rodríguez *et al.* (2014), la cual consistió en mezclar nopal deshidratado con agua destilada (1:8 p/v), mezcla que se colocó en baño de agua a una temperatura de 83 °C durante 2 h, posteriormente la mezcla se centrifugó a 3500 rpm durante 20 min, se recuperó el sobrenadante y se precipitó con etanol al 96% (1:4 sobrenadante-etanol) a temperatura ambiente durante un día. Después se recuperó el mucílago por decantación, el líquido restante se centrifugó a 3500 rpm por 15 min, se recuperó el precipitado del fondo y se colocó con el mucílago recuperado previamente para ser secados a 45 °C durante 6 h.

El proceso anterior se realizó por cuadruplicado para cada tratamiento. El mucílago seco, se colocó en viales y se almacenó a temperatura ambiente en un desecador hasta su previo análisis. Para determinar el rendimiento del mucílago (RM) se utilizó la siguiente fórmula:

$$\% RM = \left( \frac{PN * PM}{PN} \right) 100$$

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

Donde: PN fue el peso del nopal deshidratado usado para la extracción, PM fue el peso del mucílago extraído en base seca (BS). El RM se expresó en porcentaje.

Además de determinar el %RM, también se determinó la cantidad (g) del mucílago extraído en BS de acuerdo con la cantidad de nopal deshidratado que se usó para su extracción, el cual se expresó de la siguiente manera: g ME/g BS.

***Análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)***

Cada muestra de mucílago/tratamiento ( $300 \pm 10 \mu\text{g}$ ) se mezcló con  $3.5 \pm 0.05 \mu\text{g}$  de bromuro de potasio para espectroscopia IR (Uvasol®), mezcla con la cual se formó una pastilla que fue colocada en la placa que atraviesa el rayo infrarrojo, se utilizó un espectrofotómetro de infrarrojo con transformada de Fourier (Bruker®, modelo Tensor 27); el cual se operó en un rango de  $4000$  a  $400 \text{ cm}^{-1}$ , con una resolución de  $4 \text{ cm}^{-1}$ , a una temperatura de  $18.7 \text{ }^\circ\text{C}$  con humedad relativa del 41%.

***Análisis de difracción de rayos X (DRX)***

Las muestras de mucílago/ tratamiento se analizaron mediante un difractómetro Bruker D8 Advance® con un barrido Bragg-Brentano bajo condiciones de funcionamiento del difractor de 40 kV y 40 mA, con una longitud de onda de  $1.5418 \text{ \AA}$ . Los datos se recolectaron en una escala  $2\theta$  de  $5^\circ$  a  $85^\circ$  a  $0.02^\circ/\text{segundos}$  con 4000 segundos de duración. Para el análisis de los difractogramas se utilizó el software X'Pert HighScore Plus®.

***Análisis estadístico***

La información recabada se analizó a través de la metodología mediciones repetidas mediante los modelos de efectos fijos (Littell *et al.*, 2002). El modelo matemático para la determinación de la variable rendimiento y g de mucílago extraído por cada g de nopal seco fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \epsilon_{ij}$$

Donde:

$Y_{ij}$ = Variable respuesta (% RM, g ME/g BS).

$\mu$ = Promedio general.

$T_i$ = Tratamiento con  $i$  ésimo tratamiento = T1, T2 y T3.

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

$\epsilon_{ij}$ = Efecto aleatorio asociado con cada observación ( $\sim NID = 0, \sigma_e^2$ ).

Las diferencias entre tratamientos se obtuvieron a través de medias de mínimos cuadrados (LsMeans) a un  $\alpha=0.05$  (Littell *et al.*, 2002).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La cantidad de mucílago extraíble de los cladodios, se encuentra directamente relacionada con el valor de humedad que presentan los mismos, dado que los complejos que integran el mucílago y la estructura que forman estos en su organización, le proporcionan una capacidad de retención de agua (Monrroy *et al.*, 2017). En la Tabla 1, se registró el rendimiento de mucílago (RM) extraído de los cladodios de nopal, donde el RM más alto fue de 13.4 % el cual correspondió al T3 (nopal liofilizado), porcentaje que fue diferente ( $p<0.05$ ) con respecto a los porcentajes de RM de T1 y T2, mismos que fueron iguales ( $p>0.05$ ) con valores de 8.5 y 8.2 %, respectivamente.

Aun y cuando, los cladodios utilizados en la presente investigación mostraron una humedad de 94.2 % previo a su deshidratación, se pudo observar (Tabla 1) que los valores del RM en los tres tratamientos son menores a los reportados previamente por Sepúlveda *et al.*, 2007 quienes obtuvieron un RM del 17.8 % BS en cladodios que previo a la deshidratación y extracción del mucílago presentaban un 91.9 % de humedad.

Tabla 1. Medias de mínimos cuadrados para rendimiento y extracción de mucílago de nopal forrajero (*O. ficus-indica*) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.

Variable	Tratamiento 1		Tratamiento 2		Tratamiento 3	
	Media	EE	Media	EE	Media	EE
Rendimiento *	8.5 <sup>b</sup>	0.6	8.2 <sup>b</sup>	0.6	13.4 <sup>a</sup>	0.6
Mucílago**	0.09 <sup>b</sup>	0.01	0.09 <sup>b</sup>	0.01	0.13 <sup>a</sup>	0.01

\* (%). \*\* g ME/1 g BS. Literales diferentes en filas indican diferencia estadística ( $p<0.05$ ). EE = Error estándar

Por su parte, Contreras *et al.*, 2016 reportan un rango de 11 a 17 % de RM extraído de cladodios de nopal de 50 a 150 días de madurez, donde el valor de RM más elevado (17 %) corresponde a los cladodios de 50 días de edad; por lo que, los autores establecen que, el contenido de mucílago en el nopal depende de la edad del mismo. Lo anterior también exhibe estrecha relación con la cantidad de fibra soluble e insoluble (FS y FI) presente en el nopal,

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

ya que, conforme aumenta la edad del cladodio, la FS (mucílago) disminuye e incrementa la cantidad de FI (Rodríguez *et al.*, 2007).

Si se toman en cuenta los valores de RM obtenidos por Contreras *et al.* (2016) en comparación con los obtenidos en la presente investigación (Tabla 1) los RM de T1 y T2 (8.5 y 8.2 %) se encuentran por debajo de lo que establecen dichos autores (11-17 %), contrario a ello, el T3 (13.4 %), se encuentra dentro de dicho rango.

En cuanto a la cantidad (g) de mucílago extraído (g ME/g BS) se encontró que los valores fueron: 0.09, 0.09 y 0.13 g ME/g BS, para T1, T2 y T3, respectivamente. Donde los valores de ME para T1 y T2 fueron iguales ( $p > 0.05$ ) y, a su vez diferentes con T3 ( $p < 0.05$ ). Por el contrario, los valores de ME de la presente investigación fueron superiores a lo reportado por Cai *et al.* (2008) (7 g/100 g BS  $\approx$  0.07 g ME/g BS).

Ventura *et al.* (2017) y Rodríguez *et al.* (2014) señalan que el contenido de mucílago depende de varios factores relacionados con las condiciones climáticas, especie del nopal e incluso el cultivar, así dichos autores reportan diferencias en contenido de mucílago relacionado con la especie y el tipo de cultivo. Por su parte, Contreras *et al.* (2016) señalan que el contenido de mucílago varía respecto a la edad, donde los cladodios más jóvenes son los que presentan una mayor cantidad de mucílago en comparación con lo de mayor edad. Además, Guardiola (2018) determina que el contenido de mucílago se ve afectado por la técnica de extracción, edad del cladodio y hora de cosecha. El aumento en el contenido de mucílago puede deberse también, a las condiciones de almacenamiento de la muestra previo a la extracción del mucílago, ya que dichos autores argumentan que las bajas temperaturas hacen que el mucílago se secrete en niveles superiores para evitar que el agua se congele (Ventura *et al.*, 2017).

La diferencia observada en los valores de RM y ME de los tratamientos analizados (Tabla 1), posiblemente se debió al tipo de deshidratación previo a la extracción del mucílago, ya que las condiciones de cultivo, edad, hora de corte y método de extracción fueron similares en las tres muestras de nopal. Si se toma en cuenta que, los procesos de deshidratación fueron diferentes y que estos denotan grandes diferencias, como la cantidad de agua eliminada y la conservación de la estructura de la muestra. Donde, el nopal liofilizado exhibió menor

cantidad de agua y además, la muestra no se colapsó, por lo que su estructura conserva la forma de la matriz sólida, lo que provoca una mayor porosidad, lo cual le permite a la muestra la rápida y completa rehidratación, en comparación con el nopal deshidratado mediante aire caliente. Lo anterior afecta directamente en el rendimiento y obtención del mucílago en el nopal deshidratado.

### ***Análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)***

Los espectros FT-IR del mucílago extraído de nopal en función de la temperatura de deshidratación se muestran en la Figura 1. Las tres muestras exhibieron el mismo comportamiento y presencia de picos, pero se observa una ligera variación en cuanto a la intensidad. Dentro del rango 4000 a 1500  $\text{cm}^{-1}$  solo se observaron tres picos característicos, ubicados a 3398, 2973, 2920 y 1602  $\text{cm}^{-1}$ . En donde la banda ancha (3744-2991  $\text{cm}^{-1}$ ) corresponde al estiramiento del grupo funcional O-H de varios grupos hidroxilo que son característicos en los compuestos orgánicos; región en la cual se observó que el T2 fue el que presentó mayor intensidad.

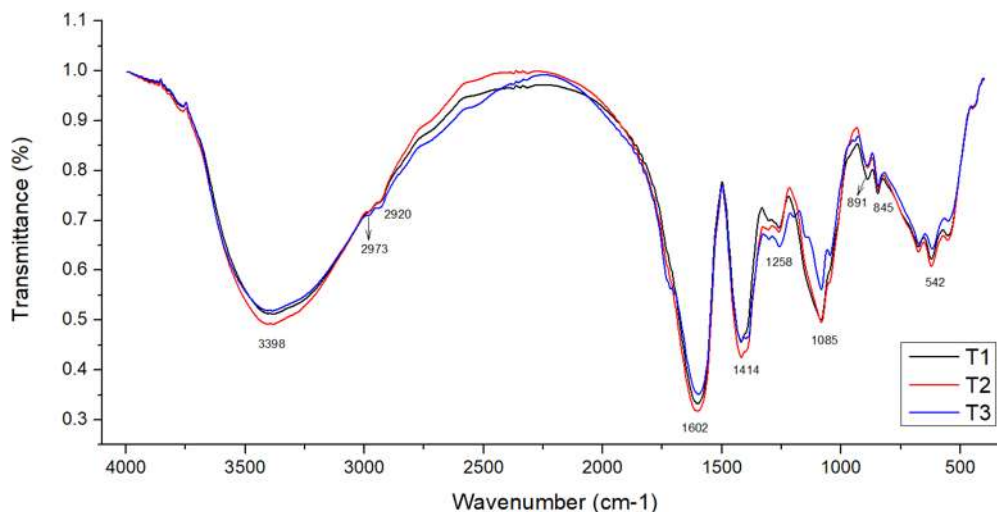


Figura 1. Espectro infrarrojo del mucílago de nopal forrajero (*O. ficus-indica*) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.

Las bandas ubicadas en la región 3600-3200  $\text{cm}^{-1}$  corresponden al estiramiento de C-H, de grupos metilo en la Figura 1 se observa que la intensidad del pico a 2973  $\text{cm}^{-1}$  es ligeramente mayor para el T3, sin embargo, en los tres tratamientos no fue muy intensa la señal, lo cual concuerda con el patrón de FT-IR reportados por Bayar y Kammoun (2016) de la fracción de

mucílago extraído, mismos autores no reportan dicha banda por falta de intensidad. Por su parte, Contreras *et al.* (2016) reportan el estrechamiento del grupo C-H relacionado con la piranosa y el ácido galacturónico a una longitud de onda de  $2919\text{ cm}^{-1}$ , en el espectro de dichos investigadores se observa mayor intensidad del pico, que en el correspondiente a la presente investigación. Rodríguez *et al.* (2014), observaron un pico ubicado a  $2933\text{ cm}^{-1}$  en diferentes especies de nopal, donde la intensidad correspondiente a *O. ficus-indica* fue de menor intensidad en comparación con *O. streptacantha* y *O. tomentosa*, dichos autores atribuyen la vibración de C-H presentes en moléculas de nopal.

En la región ubicada entre  $2900$  y  $2800\text{ cm}^{-1}$  se da el estiramiento de C-H de grupos metoxilo en el mucílago de nopal (Rivera *et al.*, 2014), en la Figura 1 sin embargo, no se muestran picos intensos en dicha rango. Sin embargo se observó un pico ubicado a  $1602\text{ cm}^{-1}$  que coincide con lo reportado por Contreras *et al.* (2016) quien atribuye la presencia de grupo carboxilo (COOH). Además la banda  $1414\text{ cm}^{-1}$  en conjunto con la  $1602\text{ cm}^{-1}$  se asocia al estrechamiento asimétrico y simétrico de COO- representativo de los ácidos carboxílicos presentes en el mucílago, dichos picos coinciden con lo reportado por Rodríguez *et al.* (2014).

Picos cercanos a  $2936$  y  $1602\text{ cm}^{-1}$  se asocian a movimientos en N-H de estiramiento y flexión respectivamente de las proteínas, (Monrroy *et al.*, 2017). En cuanto a las bandas ubicadas entre  $1300$  y  $1000\text{ cm}^{-1}$ , estas corresponden a las vibraciones de estiramiento del anillo de piranosa, mientras que la transmitancia es característica de la configuración  $\beta$  de las subunidades de azúcar (Rivera *et al.*, 2014).

### ***Analisis de difraccion de rayos X (DRX)***

Los DRX del mucílago de nopal deshidratado a diferentes temperaturas (Figura 2) se pudieron observar las estructuras cristalinas, semicristalinas y amorfas. El patrón de rayos X que exhibió mayor intensidad y definición en los picos fue T2, correspondiente al mucílago de nopal deshidratado a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , en comparación con T3 (nopal liofilizado) y T1 (nopal deshidratado a  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Además se confirmó la presencia de siete compuestos en las muestras de mucílago, dentro de las cuales se encuentran el oxalato de hidrógeno de potasio (Pho), el ácido múscico (Am), fairchildite (Ft; carbonato de potasio y calcio), galactosa (Gt), glucosa (Glu), calcita (Cal; carbonato de calcio) y silvina (Sl; cloruro de potasio). De acuerdo a los

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

difractogramas de la Figura 2 se observa que los compuestos con mayor intensidad de los picos para las tres muestras de mucílago (T1, T2 y T3) corresponde a los compuestos Pho, Ft y Gt.

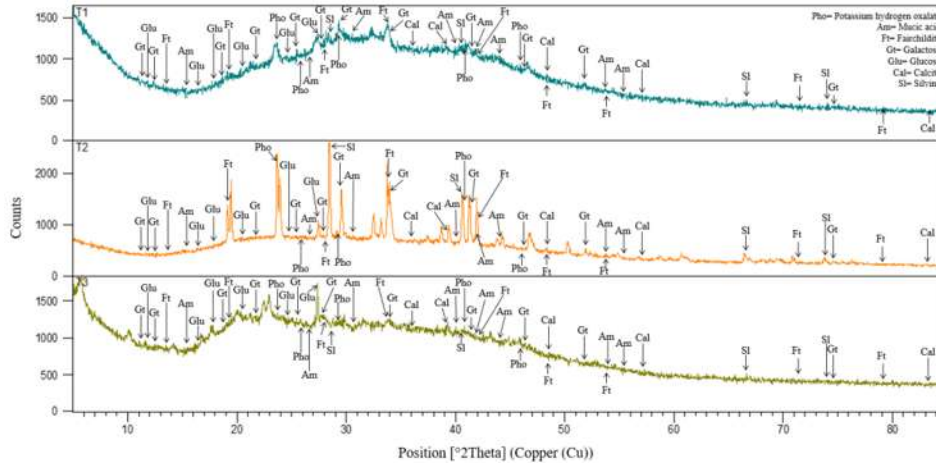


Figura 2. Patrones de digracción de rayos X del mucílago de nopal forrajero (*O. ficus-indica*) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.

Se ha reportado previamente en el mucílago la presencia de carbonato de calcio, el cual se encuentra de forma disponible para el ser humano (Contreras *et al.*, 2016), quienes lo reportan en aproximadamente 23, 29, 36, 39 y 48° en ángulo de  $2\theta$ , mismos que coinciden con los patrones de difracción para Cal en el mucílago analizado en la presente investigación (36.1, 39.2 y 48.5° en ángulo de  $2\theta$ ), los mismos autores reportan la presencia de Ft y Pho, este último compuesto se considera un anti nutriente.

Respecto a los compuestos cristalinos Am, Gt y Glu, no se han mencionado en otras investigaciones, sin embargo, en la presente investigación si se reportan. La Gt (11.1, 21.8, 25.3 y 28.5°  $2\theta$ ) y la Glu (11.8, 17.9, 20.4 y 28.5°  $2\theta$ ) en T3 presentaron picos más intensos, en comparación con T1 y T2; aspecto que se relaciona con la conservación de estructuras de los carbohidratos debido al proceso de liofilización (T3), en comparación con el método se secado mediante aire caliente (T1 y T2). En cuanto a la presencia de Am (26.7, 30.7 y 44.0° a un ángulo de  $2\theta$ ) indica que en alguna parte del proceso de deshidratación hubo oxidación de carbohidratos, ya que, contrario a Gt y Glu, el Am presenta picos más intensos en la muestra de T1 y T2.

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

Como se mencionó anteriormente, el mucílago, es un componente importante en el nopal, puesto que provee beneficios en el organismo que lo consume; no obstante, también es importante señalar a los anti nutrientes contenidos en esta cactácea como es el caso de la lignina, tema que se desarrolla en el siguiente capítulo (VI).

## CONCLUSIÓN

La cantidad de mucílago presente en el nopal forrajero sufre decremento cuando dicha cactácea se somete a deshidratación por procesos de condensación (aire caliente), además, estos procesos provocan mayor cristalinidad de los elementos contenidos en el mucílago, por otro lado, la presencia de grupos funcionales se mantiene sin cambios importantes cuando el nopal se deshidrata a 50 y 60 °C.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bayar, N., Kriaa, M., & Kammoun, R. (2016). Extraction and characterization of three polysaccharides extracted from *Opuntia ficus indica* cladodes. *International Journal of Biological Macromolecules*, 92, 441-450.
- Bensadón, S., Hervert, H. D., Sáyago, A. S. G., & Goñi, I. (2010). By-products of *Opuntia ficus-indica* as a source of antioxidant dietary fiber. *Plant Foods for Human Nutrition*, 65(3), pp. 210-216.
- Cai, W., Gu, X., & Tang, J. (2008). Extraction, purification, and characterization of the polysaccharides from *Opuntia milpa alta*. *Carbohydrate Polymers*, 71(3), pp. 403-410.
- Contreras, P. M., Rodríguez, G. M. E., Gutiérrez, C. E., Valderrama, B. M. del C., Rojas, M. J. I., & Rivera, M. E. M. (2016). Physicochemical and rheological characterization of *Opuntia ficus mucilage* at three different maturity stages of cladode. *European Polymer Journal*, 78, pp. 226-234.
- De Santiago, E., Domínguez, F. M., Cid, C., & De Peña, M. P. (2018). Impact of cooking process on nutritional composition and antioxidants of cactus cladodes (*Opuntia ficus-indica*). *Food Chemistry*, 240, pp. 1055-1062.
- Gibson, C.A. & Nobel, S.P. 1990. Special chemicals. In *The Cactus Primer* pp. 198–199, First Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Ginestra, G., Parker, M. L., Bennett, R. N., Robertson, J., Mandalari, G., Narbad, A., & Waldron, K. W. (2009). Anatomical, chemical, and biochemical characterization of cladodes from prickly pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(21), pp. 10323-10330.
- Guardiola de León, A. J. (2018). *Extracción y caracterización de mucílago del nopal (Opuntia ficus indica (L.) Miller) de cinco cultivares, en tres estados de maduración* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

- INEGI: Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Anuario Estadístico del Estado de Michoacán. 2010, pp. 127–142.
- Littell, C. R., Stroup, W. W., & Freund, R. J. (2002). *SAS for linear models*. SAS institute.
- Méndez, L. P., Flores, F. T., Martín, J. D., Rodríguez, E. M. R., & Romero, C. D. (2015). Physicochemical characterization of cactus pads from *Opuntia dillenii* and *Opuntia ficus indica*. *Food Chemistry*, 188, pp. 393-398.
- Monrroy, M., García, E., Ríos, K., & García, J. R. (2017). Extraction and physicochemical characterization of mucilage from *Opuntia cochenillifera* (L.) Miller. *Journal of Chemistry*, 2017, pp. 1-9.
- Ordaz, O. G., Juárez, C. A., Pérez, S. R. E., Román, B. R. M., & Ortiz, R. R. (2017). Effect of spineless cactus intake (*Opuntia ficus-indica*) on blood glucose levels in lactating sows and its impact on feed intake, body weight loss, and weaning-estrus interval. *Tropical Animal Health and Production*, 49(5), pp. 1025-1033.
- Rivera, C. J. L., Rodríguez, G. F., Rendón, V. R., García, H. E., & Solorza, F. J. (2014). Thermal, structural and rheological properties of sorghum starch with cactus mucilage addition. *LWT-Food Science and Technology*, 59(2), pp. 806-812.
- Rodríguez, G. M. E., De Lira, C., Hernández, B. E., Cornejo, V. M. A., Palacios, F. A. J., Rojas, M. I., & Muñoz, T. C. (2007). Physicochemical characterization of nopal pads (*Opuntia ficus indica*) and dry vacuum nopal powders as a function of the maturation. *Plant Foods for Human Nutrition*, 62(3), pp. 107-112.
- Rodríguez, G. S., Martínez, F. H. E., Chávez, M. C. K., Macías, R. L. I., Zavala, M. E., Garnica, R. M. G., & Chacón, G. L. (2014). Extraction and characterization of mucilage from wild species of *Opuntia*. *Journal of Food Process Engineering*, 37(3), pp. 285-292.
- Sepúlveda, E. S. C. A. E., Sáenz, C., Aliaga, E., & Aceituno, C. (2007). Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia spp.* *Journal of Arid Environments*, 68(4), pp. 534-545.
- Ventura, A. R. I., Bosquez, M. E., Bautista, B. S., & Rivera, C. F. (2017). Cactus stem (*Opuntia ficus-indica* Mill): anatomy, physiology and chemical composition with emphasis on its biofunctional properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(15), pp. 5065-5073.

## Capítulo VI

### CARACTERIZACIÓN DE LA LIGNINA DEL NOPAL FORRAJERO (*Opuntia ficus-indica*) DESHIDRATADO A DIFERENTES TEMPERATURAS.

#### RESUMEN

La utilización del nopal forrajero (*O. ficus-indica*) es destinado en varios sectores tanto de nutrición, medicina, agropecuario e industrial, debido a que su uso no se limita únicamente de forma completa, es decir, que las diversas industrias fraccionan el nopal en componentes o utilizan los “deshechos” posteriores a algún proceso para su reutilización; tal es el caso de la lignina, que se considera como subproducto posterior a la extracción de celulosa o al despulpado del nopal. Por lo que, el objetivo fue realizar la extracción y caracterización del nopal forrajero (*O. ficus-indica*) después de ser sometido a diferentes temperaturas de deshidratación. Para lo cual se utilizaron 30 cladodios de nopal forrajero, los cuales fueron fraccionados en cubos para la deshidratación. El tratamiento 1 (T1) se deshidrató a 50 °C/72 h, el T2 a 60 °C/32 h y el T3 fue liofilizado. Se obtuvo un rendimiento de 11.63, 13.95 y 4.76 % de lignina para T1, T2 y T3, respectivamente; mientras que, la lignina extraída resultó ser óptima para su utilización como resina; el espectro de masas detectó la presencia de azúcares típicos de la estructura de lignina (pentosas y hexosas) así como la presencia de dilignol para T1 y T2, sin embargo, la intensidad de los picos es mayor para T1 respecto a T2. El nopal forrajero podría ser considerado como materia prima en la producción de lignina para la formación de resina con carácter plástico y/o adhesivo.

**Palabras clave:** cladodios, polímero, secado, SM.

## INTRODUCCIÓN

El nopal *Opuntia ficus-indica* se encuentra de forma silvestre y cultivada, en varias partes del mundo (Torres *et al.*, 2015). La producción de cladodios “nopalito” en conjunto con la fruta “tuna” que produce *O. ficus-indica* para consumo humano se remonta a tiempos antiguos (Sáenz y Berger 2006); recientemente se ha destinado su uso en la alimentación animal, donde los forrajes son limitados o hay escasez de alimentos (Ben y Abidi 2009). Debido a la alta capacidad de producción de biomasa que presenta dicha cactácea, su uso se ha extendido más allá del sector alimenticio; denota su utilización en farmacéutica, cosmética, construcción y últimamente el enfoque es un tanto ambiental (Ciriminna *et al.*, 2019), debido a que, el cultivo de nopal evita la erosión de suelo, se usa en tratamiento de aguas residuales, además se ha propuesto como precursor de biocombustible (Mannai *et al.*, 2016; Ragauskas *et al.*, 2014).

La lignina se ha determinado como componente de los cladodios de *O. ficus-indica* (Calabrò *et al.*, 2017); se encuentra principalmente en las paredes de las plantas, que en conjunto con la celulosa y hemicelulosa le brindan rigidez, proporcionan en transporte de agua y confieren protección a la planta (Vanholme *et al.*, 2008). Esta (lignina) es considerada como el polímero natural más abundante, cuenta con una estructura muy compleja, dentro de la cual se encuentran los fenoles, los tres principales precursores del polímero de lignina son el alcohol *p*-coumarílico, el alcohol coniferílico y el alcohol sinapílico (Howard *et al.*, 2003).

Lo anterior conlleva a la existencia de dos principales tipos de lignina, la natural y la técnica, donde la primera es aquella que se encuentra en la estructura lignocelulósica de la planta sin ser procesada, mientras que la lignina técnica o procesada es aquella que se obtiene de la biomasa o en su defecto, la que es recuperada como subproducto industrial, como por ejemplo la lignina de Kraft (Chávez y Domine 2013).

El estudio e investigación sobre la lignina, abarca varios campos de interés, como la producción de energía, su uso como polímero biodegradable y para la generación de resinas (Chio *et al.*, 2019); sin embargo, la investigación también se orienta a mitigar el efecto negativo que produce su presencia en el procesamiento de la materia vegetal, en la digestibilidad del forraje y despulpado químico (Vanholme *et al.*, 2018). La presente

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

investigación tuvo como objetivo realizar la extracción y caracterización de lignina de nopal forrajero (*O. ficus-indica*) sometido a diferentes temperaturas de deshidratación; para determinar la cantidad de lignina y además probar su uso como adhesivo.

## **MATERIAL Y MÉTODOS**

### ***Preparación de la muestra***

Se cosecharon 30 cladodios de *O. ficus-indica* de una parcela con prácticas culturales, localizada en el municipio de Tarímbaro Michoacán México; el corte se realizó en el periodo de febrero-abril del 2020. Se obtuvieron cladodios de nopal de diferentes plantas madre con una edad promedio de 3.5 meses. Después del corte, los cladodios se lavaron con agua potable, después fueron colocados en agua destilada con solución de hipoclorito de sodio 3% durante 10 min para su desinfección. Posterior a ello, cada cladodio se fraccionó en cubos de aproximadamente 2 x 2 x 2 cm, para formar un pool (9 kg), la cual se dividió en tres tratamientos (n= 3 kg/tratamiento).

La muestra de nopal del tratamiento 1 (T1), se sometió a deshidratación a 50 °C durante 72 h, mientras que, la muestra del T2 se deshidrató fue de 60 °C por 32 h, para ambos tratamientos se utilizó un horno de secado de aire forzado (Ecoshel®); mientras que para el T3 las muestras de nopal fueron liofilizadas, bajo las siguientes condiciones  $-50 \pm 3$  °C y 0.110 mBar de vacío por 72 h, en un equipo Freezone 4.5 LABCONCO™ con la previa congelación de la muestra a una temperatura de -75 °C durante 24 h. Después de los procesos de deshidratación, las muestras de nopal seco/tratamiento se pulverizó y tamizó (250 µm), posteriormente se almacenó el nopal en bolsas herméticas etiquetadas (T1, T2 y T3) en desecadores hasta su previo análisis.

### ***Extracción de lignina***

La extracción de lignina se realizó bajo la metodología de Jung *et al.* (2015), con ligeras modificaciones. Se realizaron tres extracciones de la muestra mediante el método de Soxhlet, para las cuales se pesaron 10 g de nopal deshidratado, la muestra se colocó en un matraz con 100 ml de etanol del 96% (1:10 p/v), y se sometió a ebullición (Soxhlet) durante 6 horas (1<sup>ra</sup>

extracción), una vez concluido el tiempo, se dejó reposar la mezcla y se procedió a eliminar la parte líquida mediante decantación. Posterior a ello, se realizó la 2<sup>da</sup> extracción sobre la misma muestra del matraz, a la cual se le agregaron 200 ml de etanol (96%) y 400 ml de tolueno puro (1:2 v/v), se procedió a colocar el matraz a ebullición durante 4 horas; una vez concluido el tiempo nuevamente se eliminó la parte líquida mediante decantación. Para la 3<sup>ra</sup> extracción se realizó con 200 ml de agua destilada, la cual se agregó al matraz para nuevamente colocarlo a ebullición durante 6 horas. Una vez concluida la extracción con agua destilada se procedió a secar la muestra a 50 °C durante 24 horas, la cual se denominó muestra sin extractivos.

Posteriormente, se pesó 1 g de muestra sin extractivos a la cual se le adicionó ácido sulfúrico (72%) la cual se puso en agitación durante 2 h a temperatura ambiente; después se le añadió 560 ml de agua destilada y se colocó en ebullición durante 4 h. Se procedió a separar la muestra sólida del líquido mediante filtración; la muestra en el papel filtro se lavó con 500 ml de agua destilada. El papel filtro se colocó a 105 °C durante una hora (peso constante). Al papel filtro se le realizó corrección de cenizas (550 °C), la muestra resultante se denominó lignina ácido-insoluble (LAI; %). El procedimiento se realizó por cuadruplicado en cada tratamiento (T1, T2 y T3).

La determinación de LAI se realizó con la siguiente fórmula:

$$LAI \% = (P1 - P2) * (100/P3)$$

Donde: P1 = Peso de residuo en el filtro (g); P2 = Peso de corrección de cenizas (g); P3 = Peso de muestra libre de extractivos (g).

### ***Evaluación de lignina como adhesivo***

Para la evaluación como adhesivo, se pesaron 19.0 mg de LAI de cada tratamiento (T1 y T2), los cuales se sometieron a una reacción de polimerización (lignificación) con formaldehído y fenol (2:1; relación molar). En este caso tanto la lignina como el fenol aportaron la estructura fenólica de la resina a evaluar como adhesivo. La participación fenólica se formó con 50% lignina y 50% fenol, por lo que se utilizaron un equivalente en masa de 19.0 mg de fenol y 38.0 mg de formaldehído. La reacción se desarrolló en un medio ácido con 10 ml de

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

ácido acético y se catalizó con 0.5 ml de ácido clorhídrico, se mantuvo en agitación continua a temperatura ambiente (~25 °C).

### ***Análisis de espectrometría de masas (SM)***

La muestra de LAI correspondiente al T1 y T2 se utilizó para el presente análisis; para el cual se requirieron 0.019 g (T1) y 0.023 g (T2).

### ***Análisis estadístico***

La información recabada se analizó a través de la metodología mediciones repetidas mediante los modelos de efectos fijos (Littell *et al.*, 2002). El modelo matemático para la determinación del rendimiento de lignina y g de lignina extraída por cada g de nopal seco fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

$Y_{ij}$ = Variable respuesta (% LAI; g LAI/g BS).

$\mu$ = Promedio general.

$T_i$ = Tratamiento con  $i$  ésimo tratamiento = T1, T2 y T3.

$\varepsilon_{ij}$ = Efecto aleatorio asociado con cada observación ( $\sim$ NID = 0,  $\sigma^2_e$ ).

Las diferencias entre tratamientos se obtuvieron a través de medias de mínimos cuadrados (LsMeans) a un  $\alpha=0.05$  (Littell *et al.*, 2002).

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### ***Extracción de lignina***

La extracción de lignina en las muestras de nopal forrajero fue diferente en cada tratamiento; así en el nopal del T1 se obtuvieron 0.16 g de lignina por cada g de nopal en BS, para el T2 se obtuvieron 0.14 g/1 g BS, y finalmente en T3 fue de 0.004 g/ 1 g BS. En cuanto a los resultados de rendimiento se observó el mismo comportamiento, ya que los tres tratamientos fueron diferentes ( $p < 0.05$ ) con valores de 11.63, 13.95 y 4.76 % en T1, T2 y T3, respectivamente.

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

Rouhou *et al.* (2018) reportan 2.51 % (g/100 g BS), valor que se encuentra por debajo de lo reportado en los tratamientos de la presente investigación; dicha diferencia con respecto a los tratamientos analizados, podría radicar en el método de extracción de la lignina, puesto que, los mismos autores realizan la extracción (lignina) mediante diferentes métodos (variación en solvente y tiempo), y encuentran valores desde 0.03 a 1.8 % (g/100 g BS) de lignina. Por otra parte, Yang *et al.* (2015) reportaron valores de lignina de 12.3 %, el cual se encuentra entre los valores de los tratamientos 1 y 2; Ginestra *et al.* (2009) reportó valor de 7.9 % de lignina.

Tabla 1. Medias de mínimos cuadrados para rendimiento y extracción de lignina de nopal forrajero (*O. ficus-indica*) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.

Variable	Tratamiento 1		Tratamiento 2		Tratamiento 3	
	Media	EE	Media	EE	Media	EE
Lignina acido insoluble*	0.16 <sup>a</sup>	0.004	0.14 <sup>b</sup>	0.004	0.05 <sup>c</sup>	0.004
Rendimiento LAI**	11.63 <sup>a</sup>	0.4	13.95 <sup>b</sup>	0.4	4.76 <sup>c</sup>	0.4

\* g ME/1 g BS. \*\* (%). Literales diferentes en filas indican diferencia estadística ( $p < 0.05$ ). EE = Error estándar.

Los valores de lignina, como en el caso de otros componentes del nopal, se ven afectados (aumento o disminución) por factores climáticos donde se desarrolla el nopal, la edad al corte del cladodio, método de extracción (lignina) y procesamiento del nopal previo a la extracción. Si se toma en cuenta lo anterior, para establecer la diferencia en el contenido de lignina entre los tratamientos analizados, el procesamiento del nopal, es la posible explicación al fenómeno; ya que los factores de clima, edad y proceso de extracción fueron similares en las muestras de nopal forrajero para los tres tratamientos; de tal manera que solo cambia el proceso y la temperatura de secado de los cladodios previo a la extracción de lignina. Por su parte, Calabrò *et al.* (2017) indican que, la variación en el contenido de lignina depende del tipo de solvente (ácido o alcalino) que se utiliza para su extracción.

La lignina contenida en el nopal forrajero, es baja en comparación con la madera, pero cercano a otras plantas (Mannai *et al.*, 2016); así, el polímero contenido en la madera dura va de 18-25% de lignina, el bagazo fresco contiene 18.9% de lignina y la paja de trigo 15% de lignina (Howard *et al.*, 2003). No obstante, los valores en el nopal no son del todo deficientes, por lo que se puede considerar como una fuente de obtención de lignina para su utilización.

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

Si se toma en cuenta el valor de lignina del T3 (4.76 g/100 g BS), se puede señalar que, si se pretende obtener una mayor digestibilidad y asimilación del nopal forrajero (deshidratado) al ser implementado como alimento, éste debe secarse a baja temperatura, para evitar la formación de mayor contenido lignocelulósico en la materia prima, puesto que se ha determinado que, la polimerización de la lignina está determinada por factores principalmente químicos (al interior de la planta), los cuales pueden alterarse y así modificar la acumulación o cantidad de lignina (Vanholme *et al.*, 2008).

***Evaluación de lignina como adhesivo***

La obtención de la lignina a partir de fuentes naturales es complicada, debido a su estructura compleja y a las uniones entre hemicelulosas y celulosas (Vanholme *et al.*, 2008). Existen varias formas para la separación o eliminación de las estructuras acopladas a la lignina, dentro de las cuales se puede citar el uso de enzimas, extracción de carbohidratos de la planta o pretratamientos aplicados a la biomasa (Ragauskas *et al.*, 2014); la extracción de lignina del nopal forrajero (*O. ficus-indica*) se realizó mediante el pretratamiento de las muestras de los tres tratamientos, por lo que, la obtención provocó la inactivación y despolimerización de la misma, de tal manera que se realizó la polimerización de la misma para poder probar su utilización como resina.

La polimerización de la lignina de los T1 y T2, ocurrió espontáneamente después de 3 min de agitación y finalizó 4 min después, por lo que el proceso ocurrió en 7 minutos en total. Se observó la formación de una resina traslúcida amarillenta con consistencia elástica. Se ha reportado que, la lignina despolimerizada mediante ácido sulfúrico diluido, cuenta con una alta cantidad de hidroxilo y contenido de carbono, lo que la convierte en una óptima materia prima para formación de resinas (Chio *et al.*, 2019). La resina formada tuvo 24.0 mg de masa deshidratada, los cuales se aplicaron entre dos placas de chapa de pino de 1 cm<sup>2</sup>. La adhesión observada fue similar a la del adhesivo comercial hecho con polivinilacetato (conocido como Resistol® blanco).

### **Análisis de espectrometría de masas**

La Figura 1 representa los espectros de masas de la lignina del T1 y T2, en los cuales se observa que, representan un patrón similar entre las muestras, sin embargo, la en la figura derecha se detecta una disminución en la intensidad de las bandas. En ambos espectros se observa la presencia de azúcares principalmente pentosas y hexosas, adicionalmente se detectó la presencia de dilignol  $\beta$ -O-4. Con forme a lo anterior, Tsuji *et al.* (2015) señalan que el enlace principal en la estructura de la lignina es el  $\beta$ -aril éter ( $\beta$ -O-4), por lo que la presencia del dilignol indica que, la estructura nativa (proto lignina) dentro de las paredes celulares y en la lámina media, tiene uniones de esta índole primordialmente. La presencia de enlaces éter señala que la lignificación genera polímeros de cadenas poco extensas, facilitando su degradación y generación de lignanos en el metabolismo de la planta (Higuchi 1990).

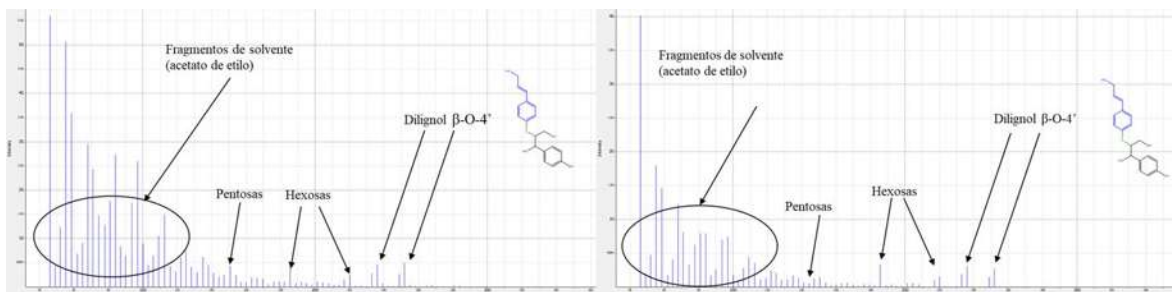


Figura 1. Espectros de masas de la lignina de nopal forrajero (*O. ficus-indica*) de 3.5 meses de edad. Lado izquierdo corresponde al T1, lado derecho corresponde al T2.

La presencia de grupos funcionales como los hidroxilos y los compuestos aromáticos, determina en gran medida la reactividad y las propiedades de la lignina, por lo que es importante conocer la estructura y presencia de los mismos, para tener un panorama más amplio sobre la posible aplicación y uso de la lignina. Además, es importante tener en cuenta que, la estructura de la lignina difiere dependiendo la fuente y método de extracción (Chio *et al.*, 2019). Por lo que la posición y cantidad de subunidades difiere entre especies de plantas, y se controla de forma independiente en cada una (Tsuji *et al.*, 2015).

En la presente investigación se observó que, el proceso y la temperatura a la cual se deshidrata el nopal afecta en la cantidad de lignina en el nopal forrajero; por lo que, es de esperar que,

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

dichos aspectos antes mencionados (proceso y temperatura), afecten componentes más sensibles como los antioxidantes, tema que se aborda a continuación (capítulo VII).

## CONCLUSIONES

- La lignina del nopal forrajero tiende a aumentar mediante el proceso de deshidratación por aire caliente a temperatura de 60 °C. Por lo que, para evitar en lo posible el incremento de este componente en la estructura del nopal deshidratado, se debe utilizar el proceso de deshidratación por aire caliente a 50 °C.
- La cantidad de lignina en el nopal forrajero es menor en comparación con otras especies catalogadas como fuentes de este polímero, sin embargo, la lignina presente en *O. ficus-indica* forrajero ( $\geq 3$  meses de edad) puede ser destinada como materia prima para la industria de resinas, y/o como adhesivos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ben Salem, H., & Abidi, S. (2007, October). Recent advances on the potential use of *Opuntia spp.* in livestock feeding. In *VI International Congress on Cactus Pear and Cochineal 811*, pp. 317-326.
- Calabrò, P. S., Catalán, E., Folino, A., Sánchez, A., & Komilis, D. (2018). Effect of three pretreatment techniques on the chemical composition and on the methane yields of *Opuntia ficus-indica* (prickly pear) biomass. *Waste Management & Research*, 36(1), pp. 17-29.
- Chávez-Sifontes, M. y Domine, M. E. (2013). Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. *Avances en ciencias e Ingeniería*, 4(4), pp. 15-46.
- Chio, C., Sain, M., & Qin, W. (2019). Lignin utilization: a review of lignin depolymerization from various aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, pp. 232-249.
- Ciriminna, R., Chavarrí, H. N., Rodríguez, H. A. I., & Pagliaro, M. (2019). Toward unfolding the bioeconomy of nopal (*Opuntia spp.*). *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13(6), pp. 1417-1427.
- Ginestra, G., Parker, M. L., Bennett, R. N., Robertson, J., Mandalari, G., Narbad, A., & Waldron, K. W. (2009). Anatomical, chemical, and biochemical characterization of cladodes from prickly pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(21), pp. 10323-10330.
- Higuchi, T. (1990). Lignin biochemistry: Biosynthesis and biodegradation. *Wood Science and Technology*, 24, pp. 23–63.
- Howard, R. L., Abotsi, E. L. J. R., Van Rensburg, E. J., & Howard, S. (2003). Lignocellulose biotechnology: issues of bioconversion and enzyme production. *African Journal of Biotechnology*, 2(12), pp. 602-619.

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero  
(*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

- Jung, S. J., Kim, S. H., & Chung, I. M. (2015). Comparison of lignin, cellulose, and hemicellulose contents for biofuels utilization among 4 types of lignocellulosic crops. *Biomass and Bioenergy*, 83, pp. 322-327.
- Littell, C. R., Stroup, W. W., & Freund, R. J. (2002). *SAS for linear models*. SAS institute.
- Mannai, F., Ammar, M., Yanez, J. G., Elaloui, E., & Moussaoui, Y. (2016). Cellulose fiber from Tunisian Barbary Fig “*Opuntia ficus-indica*” for papermaking. *Cellulose*, 23(3), pp. 2061-2072.
- Ragauskas, A. J., Beckham, G. T., Biddy, M. J., Chandra, R., Chen, F., Davis, M. F., & Wyman, C. E. (2014). Lignin valorization: improving lignin processing in the biorefinery. *Science*, 344(6185), pp. 1-10.
- Rouhou, M. C., Abdelmoumen, S., Thomas, S., Attia, H., & Ghorbel, D. (2018). Use of green chemistry methods in the extraction of dietary fibers from cactus rackets (*Opuntia ficus indica*): Structural and microstructural studies. *International Journal of Biological Macromolecules*, 116, 901-910.
- Sáenz, C. y Berger, H. (2006). *Utilización agroindustrial del nopal* (Vol. 162). Food & Agriculture Org.
- Torres, P. R. L., Morales, C. D., Ballinas, C. M. D. L. y Nevárez, M. G. V. (2015). El nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(5), pp. 1129-1142.
- Tsuji, Y., Vanholme, R., Tobimatsu, Y., Ishikawa, Y., Foster, C. E., Kamimura, N., & Kajita, S. (2015). Introduction of chemically labile substructures into Arabidopsis lignin through the use of LigD, the  $\alpha$ -dehydrogenase from *Sphingobium* sp. strain SYK-6. *Plant Biotechnology Journal*, 13(6), pp. 821-832.
- Vanholme, R., Morreel, K., Ralph, J., & Boerjan, W. (2008). Lignin engineering. *Current opinion in plant biology*, 11(3), pp. 278-285.
- Yang, L., Lu, M., Carl, S., Mayer, J. A., Cushman, J. C., Tian, E., & Lin, H. (2015). Biomass characterization of Agave and *Opuntia* as potential biofuel feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, 76, pp. 43-53.

## Capítulo VII

### CUANTIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES ANTIOXIDANTES DEL NOPAL FORRAJERO (*Opuntia ficus-indica*) DESHIDRATADO A DIFERENTES TEMPERATURAS.

#### RESUMEN

Los trabajos e investigaciones dedicadas al nopal (*O. ficus-indica*) muestran evidencia sobre los beneficios que proporciona a la salud del consumidor, destaca también como fuente de fitoquímicos como las vitaminas y antioxidantes. Sin embargo, es bien sabido que, el tratamiento postcosecha que se le brinda a los cladodios de nopal alteran la calidad de los componentes, por lo que el objetivo de este estudio fue cuantificar los componentes antioxidantes del nopal forrajero (*O. ficus-indica*) sometido a diferentes temperaturas de deshidratación. Las muestras nopal (n=30) fueron cosechadas de una parcela con prácticas culturales, los cladodios se fraccionaron en cubos de 2x2x2 para formar un pool, el cual se dividió en tres tratamientos: T1 (n=3 kg) nopal deshidratado a 50 °C/72 h, T2 (n=3 kg) nopal deshidratado a 60 °C y T3 (n=3 kg) nopal liofilizado. Los resultados sobre el contenido de polifenoles fueron de 5.74, 5.22 y 7.79 mg EAG/g<sup>-1</sup> base seca (BS) para T1, T2 y T3 respectivamente, los cuales fueron diferentes entre sí ( $p < 0.05$ ). El conteo de los flavonoides arrojó valores de 1.57, 1.60 y 1.70 mg EQ/g<sup>-1</sup> BS, mismos que fueron estadísticamente iguales ( $p > 0.05$ ) entre sí; mientras que los valores de capacidad antioxidante (CA) con el radical ABTS●+ fueron de 3.61, 3.59 y 3.77 mg EAG/g<sup>-1</sup> BS, donde el valor mayor correspondió al T3 el cual fue diferente ( $p < 0.05$ ) con T1 y T2. En cuanto a los valores de CA con el radical DPPH●, los valores fueron 7.52, 7.94 y 7.28 mg EAG/g<sup>-1</sup> BS, valores que fueron diferentes ( $p < 0.05$ ) para los tres tratamientos. Los diferentes procesos y temperaturas de deshidratación en el nopal forrajero no influyeron en el conteo de flavonoides, pero si en el conteo de polifenoles y capacidad antioxidante.

**Palabras clave:** cladodios, liofilización, antioxidantes.

## INTRODUCCIÓN

*Opuntia ficus-indica* es una especie de cactácea que en los últimos años se ha cultivado en diversas partes de mundo, principalmente para la obtención de su fruto (tuna) y los cladodios jóvenes (nopalito), los cuales son consumidos en diversas presentaciones, por lo que se han integrado a la dieta de esas regiones (Méndez *et al.*, 2015). Es bien sabido que, su incorporación a la alimentación humana se debe en gran medida a su contenido nutricional (Bensadón *et al.*, 2010; Hernandez *et al.*, 2011; Méndez *et al.*, 2015; Figueroa *et al.*, 2018). Así mismo, la evidencia sobre las propiedades medicinales que brinda el consumo de nopal es extensa, en las cuales se incluyen propiedades hipocolesterolémicas, anti-ulcerogénicas, anticancerígenas (Ventura *et al.*, 2017), además, se ha informado que también posee capacidad antioxidante (Kuti 2004). Por lo que, el nopal es considerado como un alimento funcional, ya que contiene compuestos bioactivos que brindan beneficios a la salud humana (Zaid *et al.*, 2015).

El interés sobre los componentes de esta cactácea ha provocado, su estudio de forma completa y aislada o en diferentes presentaciones, ya sea en base fresca, posterior a un proceso de deshidratado o después de cocinarlo (Contreras *et al.*, 2012; De Santiago *et al.*, 2018), o a partir de extractos de los cladodios (El Mostafa *et al.*, 2014); lo anterior, con el fin de describir su composición y bioactividad (Valdez *et al.* 2008). De aquí que, los cladodios de *O. ficus-indica* han resultado ser buena fuente de fitoquímicos, tales como fenoles, flavonoides, taninos y betacianinas, El Mostafa *et al.* (2014) añaden a la lista el contenido de vitamina E, carotenoides y ácido ascórbico, a los cuales, ambos autores asocian su capacidad antioxidante.

*O. ficus-indica* no es solo aprovechable para consumo humano (nopalito  $\leq$  45 días) (Bensadón *et al.*, 2010), también es aprovechable en la alimentación animal, de tal forma que, los cladodios en etapas de madurez avanzada ( $\geq$  45 días), los cuales ya no son considerados para consumo humano, sean aprovechado como forraje (Rodríguez *et al.*, 2007). Es de esperar que, las propiedades funcionales que se reportan en los cladodios de “nopalito” (nopal  $\leq$  a 45 días) *O. ficus-indica*, mismas que se han probado y reportado tanto de manera experimental en humanos, como en estudios *in vitro* e *in vivo*, se presenten también en cladodios de nopal forrajero ( $\geq$  45 días).

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

No obstante, diversos investigadores mencionan que, la composición química y fitoquímica del nopal, depende de factores como la variedad, etapa de maduración, tratamientos previos a su análisis, así como de condiciones ambientales en las cuales el nopal se desarrolla (Betancourt *et al.*, 2006; Bensadón *et al.*, 2010; Angulo *et al.*, 2014). En consecuencia, la presente investigación se enfoca en la cuantificación de los componentes antioxidantes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) sometido a diferentes temperaturas de deshidratación.

## **MATERIAL Y MÉTODOS**

### ***Tratamiento de las muestras y procesos de secado:***

Los cladodios de nopal (*O. ficus-indica*) se obtuvieron de una parcela con prácticas culturales perteneciente a la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) ubicada en Morelia, Michoacán, México, localizada entre las coordenadas geográficas 19° 46' latitud norte y entre 101° 10' longitud oeste, a una altura promedio de 1,855 metros sobre el nivel del mar, cuenta con clima templado con temperatura media anual de 21 °C y la humedad media es de 62% (INEGI 2010).

Los cladodios fueron cosechados en la época de primavera 2020, con una edad promedio de 3.5 meses, la recolección se realizó a las 7:00 h; posteriormente se procedió a lavar los nopales con agua simple, y se realizó una desinfección con solución de hipoclorito de sodio (3%) en agua destilada durante 10 min para eliminar microorganismos. Una vez desinfectados, cada cladodio se cortó sagitalmente, de tal manera que se expuso el parénquima de la cactácea, posteriormente se fraccionó en cubos de aproximadamente 2 x 2 cm y se procedió a homogeneizar el nopal picado (9000 g).

Para el proceso de liofilizado, la muestra de nopal (3 kg) se colocó en un ultra congelador a -75 °C durante 24 h. Posteriormente la muestra se procesó en un equipo Freezone 4.5 LABCONCO™ bajo condiciones de  $-50 \pm 3$  °C de temperatura y 0.110 mBar de vacío; con esta muestra se conformó el tratamiento 3 (T3). Mientras que, para el proceso de deshidratación por convección, las muestras se colocaron en una bandeja de acero inoxidable y se colocaron en un horno de secado de aire forzado (Ecoshel®). Las condiciones de

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

procesamiento en la muestra fue 50 °C (T1) y 60 °C (T2), el tiempo de secado fue de 72 y 32 h respectivamente, la cantidad de cada muestra/tratamiento fue de 3 kg. Cada muestra seca por tratamiento se molió, se tamizó (250 µm) y se almacenó por separado en bolsas herméticas que se colocaron en un desecador a temperatura ambiente y protegido de la luz.

***Determinación del contenido de polifenoles totales (PT)***

Se realizó una extracción de la muestra con la metodología propuesta por Wojdylo *et al.* (2008), misma que fue modificada. Se utilizó 1 g de muestra, al cual se le adicionaron 20 ml (1:20) de metanol (80%), la mezcla se sonicó durante 15 min, se dejó reposar durante 24 h a temperatura ambiente y en un lugar oscuro; posterior al reposo, se sonicó nuevamente durante 15 min, posteriormente se centrifugó a 4500 rpm (15 min), los sobrenadantes se recolectaron mediante filtración (Millipore 0.45 µm) y se denominó extracto metanólico (EM).

Para la determinación de PT, se tomó 50 µl EM y se mezclaron con 200 µl de agua destilada, 250 µl de reactivo Folin-Ciocalteu (50% v/v) y 500 µl de carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) al 7.5% p/v. La mezcla se dejó reposar en la obscuridad a 45 °C por 15 min (Martínez *et al.*, 2015). La absorbancia se midió a 760 nm en un espectrofotómetro UV-vis (VELAB®) el procedimiento se realizó por triplicado en cada tratamiento: nopal liofilizado (T3) nopal deshidratado a 50 °C (T1) y 60 °C (T2); la curva de calibración se realizó con ácido gálico (AG; 0-0.1 mg/ml), los resultados se expresaron en mg EAG/g<sup>-1</sup> de muestra de nopal en base seca (BS).

***Determinación de flavonoides (F)***

Se procedió a realizar una extracción con 0.25 g de muestra de nopal seca y se mezclaron con 10 ml de metanol/agua (50:50 v/v), la mezcla se agitó durante 1 h a temperatura ambiente, se centrifugó a 4000 rpm durante 10 min y se recuperó el sobrenadante, posteriormente se añadieron 10 ml de acetona/ agua (70:30 v/v) al residuo, se agitó y se centrifugó como se describió previamente. Los extractos de metanol (50%) y acetona (70%) se mezclaron (EMA) (Figuroa *et al.*, 2018). Posteriormente se tomaron 250 µl de EMA y se le añadieron 1250 µl de agua destilada, 75 µl de nitrito de sodio (NaNO<sub>2</sub>) al 5% y se dejó reposar por 5 min; posteriormente se le agregaron 150 µl de cloruro de aluminio (AlCl<sub>3</sub>) al 10 %, 500 µl de

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

hidróxido de sodio (NaOH 1 M) y 2500 µl de agua destilada, se agitó y se midió la absorbancia en un espectrómetro UV-vis (VELAB®) a una longitud de onda de 510 nm (Re *et al.*, 1999). La curva de calibración se realizó con quercetina (0-15 mg/ml), los resultados se expresaron en mg EQ/g<sup>-1</sup> de muestra de nopal BS, y el procedimiento se realizó por triplicado para cada muestra/tratamiento analizado.

***Determinación de la capacidad antioxidante (CA)***

La CA se determinó por medio de dos ensayos, 2,2-Di(4-tert-octylphenyl)-1-picrylhydrazyl, free radical (DPPH•) y 2,2'-azino-bis (ácido 3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic) (ABTS•+); en el caso de DPPH, se preparó una mezcla de 50 µl de EM y 2950 µl de DPPH (60 µM), se agitó e incubó en oscuridad durante 30 min a temperatura ambiente. La absorbancia se midió a 517 nm; se utilizó ácido gálico como referencia y los resultados se expresaron en µM equivalentes en AG/g<sup>-1</sup> de muestra (Brand *et al.*, 1995). En el caso del radical ABTS•+, se tomó la metodología propuesta por Re *et al.* (1999), para ello, se preparó una solución acuosa con ABTS (7 mM), después se le añadió persulfato de potasio (2.45 mM) y se dejó reposar (en oscuridad) por 16 h; posteriormente se procedió a ajustar el ABTS•+ (0.700 ± 0.002 nm), después se hizo reaccionar (1485 µl) con EM (15 µl) y se midió la absorbancia en un espectrómetro UV-vis (VELAB®) a una longitud de onda de 734 nm, el estándar a utilizar fue ácido gálico y los resultados se expresaron como mg EAG/g<sup>-1</sup> de muestra de nopal BS, la medición se realizó por triplicado en las muestras/tratamiento analizado.

***Análisis estadístico***

La información recabada se analizó a través de la metodología mediciones repetidas mediante los modelos de efectos fijos (Littell *et al.*, 2002). El modelo matemático fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \epsilon_{ij}$$

Donde:

$Y_{ij}$ = Variable respuesta (PT, F, CA y % inhibición).

$\mu$ = Promedio general.

$T_i$ = Tratamiento con  $i$  ésimo tratamiento = T1, T2 y T3.

$\epsilon_{ij}$ = Efecto aleatorio asociado con cada observación ( $\sim$ NID = 0,  $\sigma^2_e$ ).

Las diferencias entre tratamientos se obtuvieron a través de medias de mínimos cuadrados (LsMeans) a un  $\alpha=0.05$  (Littell *et al.*, 2002).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### *Determinación del contenido de polifenoles totales (PT)*

Los cladodios no solo cuentan con nutrientes esenciales, sino que, además contienen compuestos bioactivos como los polifenoles, que de acuerdo con la Tabla 1 los valores de polifenoles totales (PT) fueron 5.74 mg/g<sup>-1</sup> BS para T1, 5.22 mg EAG/g<sup>-1</sup> BS para T2 y 7.79 mg EAG/g<sup>-1</sup> BS para el T3. Dicha variable (PT), mostró un coeficiente de variación inferior al 10%, lo cual indica que, hubo una homogeneidad alta ( $\geq 09\%$ ) al obtener los datos.

Tabla 1. Medias de mínimos cuadrados para polifenoles, flavonoides y capacidad antioxidante del nopal forrajero (*O. ficus-indica*) de 3.5 meses de edad de acuerdo al tratamiento.

Variable	Tratamiento 1		Tratamiento 2		Tratamiento 3	
	Media	EE	Media	EE	Media	EE
Polifenoles*	5.74 <sup>b</sup>	0.12	5.22 <sup>c</sup>	0.12	7.79 <sup>a</sup>	0.12
Flavonoides**	1.57 <sup>a</sup>	0.05	1.60 <sup>a</sup>	0.05	1.70 <sup>a</sup>	0.05
ABTS*	3.61 <sup>b</sup>	0.02	3.59 <sup>b</sup>	0.02	3.77 <sup>a</sup>	0.02
DPPH*	7.52 <sup>b</sup>	0.08	7.94 <sup>a</sup>	0.08	7.28 <sup>c</sup>	0.08
% Inhibición ABTS	22.27 <sup>a</sup>	0.51	23.57 <sup>a</sup>	0.51	9.46 <sup>b</sup>	0.51
% Inhibición DPPH	40.48 <sup>b</sup>	1.61	31.51 <sup>c</sup>	1.61	45.68 <sup>a</sup>	1.61

Literales diferentes en filas indican diferencia estadística ( $p < 0.05$ ). EE = Error estándar. \* = mg EAG/g<sup>-1</sup> BS. \*\* = mgEQ/g<sup>-1</sup> BS.

Referente a PT, Ramirez *et al.* (2013) reportan valores de 5.71 mg EAG/g<sup>-1</sup> BS y 3.75 mg EAG/g<sup>-1</sup> BS para nopales de 1 mes de edad liofilizado y cocido, en relación a estos investigadores, los valores de PT de la presente investigación son mayores; en cambio, Guevara *et al.* (2010) registraron valores de 17.8 mg EAG/g<sup>-1</sup> BS para cladodios de 1 mes liofilizados (Tabla 2), valores que, son superiores a los consignados para PT en la Tabla 1. Lo anterior, sugiere que, la cantidad de PT para los cladodios de *O. ficus-indica*, es muy variable. Incluso, al comparar los valores promedio de los tratamientos analizados, se encontró diferencia ( $p < 0.05$ ) en el valor de la media, de tal manera que, el valor mayor (7.79

mg EAG/g<sup>-1</sup> BS) corresponde a los cladodios liofilizados, y el valor menor (5.22 mg EAG/g<sup>-1</sup> BS) al nopal deshidratado a 60 °C, lo cual indica que, existió una disminución en el contenido total de polifenoles por el tratamiento térmico; aspecto que concuerda con Martínez *et al.* (2015), quienes reportan reducción de polifenoles en nopal deshidratado por calor vs. nopal liofilizado (Tabla 2).

### ***Determinación de flavonoides (F)***

En canto a los flavonoides, los cuales son otros compuestos bioactivos que se encuentran en los cladodios de *O. ficus-indica*, la variable presentó un coeficiente de variación entre el 10 y el 16%. La media en las muestras analizadas fue de 1.57, 1.60 y 1.70 mgEQ/g<sup>-1</sup> BS, (Tabla 1) para cladodios deshidratados a 50 °C, 60 °C y liofilizado, respectivamente. Resultados que son menores en comparación con los reportados por Guevara *et al.* (2010), quienes establecen un rango entre 2.0 y 9.8 mgEQ/g BS en cladodios de nopal *O. ficus-indica* menores a 30 días de edad. Por otro lado, Santos *et al.* (2017), en una revisión bibliográfica, establecen que, los valores de F oscilan entre 5.3-6.1 mgEQ/g<sup>-1</sup> BS para cladodios *O. ficus-indica* nativos de México (Tabla 2).

Así mismo en la Tabla 1 se observa que, los valores promedio para F de los tres tratamientos es similar ( $p>0.05$ ), sin embargo, se puede notar un ligero aumento en el valor para el T3. El comportamiento anterior, es similar al referido por Martínez *et al.* (2015), quienes no encontraron diferencia estadística para la variable F, sin embargo, la muestra liofilizada denota un ligero contenido mayor ( $> 0.30$  mgEQ/g<sup>-1</sup> BS) en comparación con las muestras deshidratada por calor (0.19 a 0.26 mgEQ/g<sup>-1</sup> BS); el comportamiento de los F en la presente investigación y en la anteriormente referida, indica que las condiciones de secado como la temperatura, el tiempo y la técnica influyen en la cantidad de flavonoides presentes en la muestra, lo cual se ha informado también por Medina *et al.* (2011).

Se observa pues en la Tabla 2, que hay una variación amplia sobre los valores reportados y los encontrados en el presente trabajo para las variables PT y F, lo cual puede deberse a las características bioquímicas de la especie y variedad puesto que, Astello *et al.* (2015), analizan cladodios de diferentes especies, pero de edad similar, cultivados bajos las mismas condiciones ambientales y deshidratados con un proceso igual, y aun así encuentran

diferencias en los valores. Asimismo, se ha establecido que, la heterogeneidad en los resultados de dichos compuestos (Tabla 2) puede deberse al proceso de deshidratación, a la temperatura y al tiempo de exposición al calor, lo anterior debido a los efectos degradantes que se producen en los cladodios de nopal al ser deshidratados (Jaramillo *et al.*, 2003).

Por otro lado, se plantea la idea por Guevara *et al.* (2010) de que, las diferentes metodologías implementadas para determinación de compuestos bioactivos en cada investigación pueden generar diferencias en las determinaciones de cada variable. Por su parte, Sun *et al.*, 2016 concluyen en su trabajo que, el secado mediante aire caliente conserva los flavonoides, mientras que la liofilización conserva los compuestos fenólicos; lo anterior, concuerda con los resultados presentados en la Tabla 1 sobre PT y F en base a los métodos de secado.

#### ***Determinación de la capacidad antioxidante (CA)***

En cuanto a la determinación de la CA, la cual se evaluó por medio del ensayo ABTS●+ y DPPH●, la Tabla 1 muestra que, la CA de los cladodios de *O. ficus-indica* presentó valores mayores en el ensayo DPPH en relación con ABTS. Así se obtuvieron las medias para DPPH de 7.52, 7.94 y 7.28 mgEAG/g<sup>-1</sup> BS para T1, T2 y T3 respectivamente; mientras que los valores en el proceso del radical ABTS●+ fueron 3.61, 3.59 y 3.77 mg EAG/g<sup>-1</sup> BS para T1, T2 y T3, respectivamente. No obstante, compuestos no fenólicos (ácido ascórbico y carotenoides) pueden reaccionar con el radical ABTS●+ lo cual, tiende a aumentar la CA de la muestra con dicho radical en comparación con el radical DPPH● (De Santiago *et al.*, 2018); sin embargo, en la presente investigación los valores de CA fueron más elevados para DPPH.

Respecto a CA en ABTS el valor de T3 mostró diferencia estadística ( $p < 0.05$ ) con respecto a T1 y T2 (que son iguales), ello indica que los cladodios liofilizados mostraron una mayor CA que los cladodios deshidratados por aire caliente. Al respecto Martínez *et al.* (2015), señalan que, la CA en muestras de nopal liofilizadas es mayor que en las deshidratadas de manera convencional, ellos reportan en *O. ficus-indica* de 15 días de edad valores de 6.11 μM Trolox/g<sup>-1</sup> BS (liofilizado) y 4.87 μM Trolox/g<sup>-1</sup> BS (secado por túnel 80 °C).

Tabla 2. Compendio de valores promedios para polifenoles, flavonoides, carotenoides y capacidad antioxidante del nopal *Opuntia ficus-indica* reportados en investigaciones previas.

Autor(s)	Edad (meses)	Presentación del nopal.	Polifenoles (EAG mg/1 g BS)	Flavonoides mg/1 g BS	Carotenoides (mg/1 g BS)	DPPH	ABTS
Andreu <i>et al.</i> , 2017	< 12	Liofilizado	18.9	-	-	23.7 <sup>a</sup>	22.1 <sup>a</sup>
	>12		14.8	-	-	11.0 <sup>a</sup>	14.3 <sup>a</sup>
Ayadi <i>et al.</i> , 2009	24-36	Secado a 60 °C	8.26	-	0.01	-	-
Bensadón <i>et al.</i> , 2010	>1	Liofilizado	37.1	-	22.84	-	57.55 <sup>b</sup>
De Santiago <i>et al.</i> , 2018	-	Liofilizado (crudo)	0.161	0.0086*	-	0.15-0.20 <sup>b</sup>	40-50 <sup>b</sup>
		Asado	0.519	0.025*	-	0.6-0.7 <sup>b</sup>	70-80 <sup>b</sup>
Figuerola <i>et al.</i> , 2018	0.4	Secado a 40 °C/ 24 h	28.5	12.5**	-	48.1 <sup>c</sup>	24.8 <sup>c</sup>
	0.6		32.6	18.6**	-	42.3 <sup>c</sup>	22.7 <sup>c</sup>
	1		19.6	11.2**	-	46.1 <sup>c</sup>	25.4 <sup>c</sup>
Guevara <i>et al.</i> , 2010	>1	Liofilizado	17.8	2.0-9.8 *	-	-	-
Martínez <i>et al.</i> , 2015	0.5	Liofilizado	2.1-2.3	0.19-0.26*	-	5.21 <sup>b</sup>	5.43 <sup>b</sup>
		Lecho fluido 70 °C/70 min			-	4.29 <sup>b</sup>	4.81 <sup>b</sup>
		Por túnel 80 °C/ 180 min			-	4.52 <sup>b</sup>	4.99 <sup>b</sup>
Medina <i>et al.</i> , 2011	-	Fresco	60.00	20.79***	1.16	-	-
		Convección 45 °C	40.97	23.41***	0.54	-	-
		Convección 65 °C	17.34	10.8***	0.47	-	-
Méndez <i>et al.</i> , 2015	6-8	Fresco	1.28	-	-	-	-
Ramírez <i>et al.</i> , 2013	1	Liofilizado	5.71	-	61.32 mg	-	14.52 <sup>b</sup>
		Hervido	3.75	-	66.79 mg	-	6.08 <sup>b</sup>

BS= base seca. \*Equivalentes de quercetina. \*\*Equivalentes de catequina. \*\*\*Equivalentes de rutina. <sup>a</sup>=mmol Trolox kg<sup>-1</sup> BS. <sup>b</sup>=μmol Trolox/g BS. <sup>c</sup>= IC<sub>50</sub> μg/ml

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

De acuerdo al método DPPH● los valores fueron estadísticamente diferentes ( $p < 0.05$ ) para cada tratamiento, donde los valores promedios en T3 fueron de 7.28 mgEAG/g<sup>-1</sup> BS, mientras que para T2 fue de 7.94 mgEAG/g<sup>-1</sup> BS y finalmente para T1 de 7.52 mgEAG/g<sup>-1</sup> BS. Como se observa en la Tabla 1, el valor de CA relacionado con el radical DPPH● fue mayor para T2 en relación con los T1 y T3; ello indica que, hubo mayor CA en la muestra de nopal secada por aire caliente (60 °C). En el mismo sentido De Santiago *et al.* (2018) señalan que, la CA (con radical ABTS●+) se incrementa en muestras donde la temperatura de cocción es elevada en comparación con el nopal liofilizado.

Por su parte, Shofian *et al.* (2011) en su estudio concluyen que, la técnica de liofilización puede afectar los componentes antioxidantes y la actividad antioxidante de las frutas. Por lo que, no se descarta que, la diferencia en los valores promedio de CA se deba o se asocie con el proceso de deshidratación, debido a que, en el nopal secado por aire caliente se observó un color pardo lo cual indica que se generaron reacciones Maillard, durante estas reacciones se generan compuestos tales como las melanoidinas (reacción de los hidratos de carbono con los aminoácidos) como señala Palzer *et al.* (2012); así los productos que se forman durante o al final de dicha reacción, se han señalado que pueden incrementar la CA de la muestra (Kamiloglu *et al.*, 2015). Serpen *et al.* (2007) señalan que el radical ABTS●+ es más sensible para alimentos ricos en compuestos fenólicos, por su parte, el ensayo con DPPH es mayormente sensible a productos alimenticios con reacción de Maillard.

Se ha determinado que la CA depende en su mayoría de la naturaleza de la muestra, es decir que es variable dependiendo la muestra de la cual se hable, dejando de lado la temperatura y el método de deshidratación (Karam *at al.*, 2016); ya que dichos autores en su trabajo de revisión, citan diversos trabajos sobre CA de frutas y verduras deshidratadas mediante aire caliente y liofilización, en el cual establecen tanto aumento como disminución de la CA en ambos procesos de secado. A lo anterior, se añade que la CA puede ser atribuida a la variedad y la madurez de las muestras, factores externos como temperatura, presencia de oxígeno o debido a la mala extracción de los antioxidantes a analizar, además de, la textura y grosor de la muestra a analizar (Kamiloglu *et al.*, 2015).

## CONCLUSIÓN

El proceso de deshidratación del nopal forrajero mediante aire caliente a temperaturas de 50 y 60 °C, no afecta su cantidad de polifenoles y flavonoides. Pero para la capacidad antioxidante, el proceso y la temperatura de deshidratación en el nopal, si afecta dicha variable, así el nopal deshidratado mediante aire caliente a 60 °C contiene mayores antioxidantes con el radical DPPH●.

## BIBLIOGRAFÍA

- Andreu, L., Nuncio-Jáuregui, N., Carbonell-Barrachina, Á. A., Legua, P., & Hernández, F. (2018). Antioxidant properties and chemical characterization of Spanish *Opuntia ficus-indica* Mill. cladodes and fruits. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(4), pp. 1566-1573.
- Angulo, B. P. I., Martínez, C. O., & Paredes, L. O. (2014). Phytochemical content, nutraceutical potential and biotechnological applications of an ancient Mexican plant: nopal (*Opuntia ficus-indica*). *Current Nutrition & Food Science*, 10(3), pp. 196-217.
- Astello, G. M. G., Cervantes, I., Nair, V., del Socorro Santos-Díaz, M., Reyes-Agüero, A., Guéraud, F., ... & de la Rosa, A. P. B. (2015). Chemical composition and phenolic compounds profile of cladodes from *Opuntia spp.* cultivars with different domestication gradient. *Journal of Food Composition and Analysis*, 43, pp. 119-130.
- Ayadi, M. A., Abdelmaksoud, W., Ennouri, M., & Attia, H. (2009). Cladodes from *Opuntia ficus indica* as a source of dietary fiber: Effect on dough characteristics and cake making. *Industrial Crops and Products*, 30(1), pp. 40-47.
- Bensadón, S., Hervert-Hernández, D., Sáyago-Ayerdi, S. G., & Goñi, I. (2010). By-products of *Opuntia ficus-indica* as a source of antioxidant dietary fiber. *Plant foods for human nutrition*, 65(3), pp. 210-216.
- Betancourt, D. M. A., Hernández, P. T., García, S. P., Cruz, H. A., & Paredes, L. O. (2006). Physico-chemical changes in cladodes (Nopalitos) from cultivated and wild cacti (*Opuntia spp.*). *Plant Foods for Human Nutrition*, 61, pp. 115-119.
- Brand, W. W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. L. W. T. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food science and Technology*, 28(1), pp. 25-30.
- Contreras, P. M., Gutiérrez, C. E., Valderrama, B. M. del C., Rojas-Molina, I., Espinosa-Arbeláez, D. G., Suárez-Vargas, R., & Rodríguez-García, M. E. (2012). Effects of drying process on the physicochemical properties of nopal cladodes at different maturity stages. *Plant foods for human nutrition*, 67(1), pp. 44-49.
- De Santiago, E., Domínguez, F. M., Cid, C., & De Peña, M. P. (2018). Impact of cooking process on nutritional composition and antioxidants of cactus cladodes (*Opuntia ficus-indica*). *Food chemistry*, 240, pp. 1055-1062.
- El-Mostafa, K., El Kharrassi, Y., Badreddine, A., Andreoletti, P., Vamecq, J., El Kebbaj, M., & Cherkaoui-Malki, M. (2014). Nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a source of bioactive compounds for nutrition, health and disease. *Molecules*, 19(9), pp. 14879-14901.

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

- Figuroa, P. M. G., Pérez, R. I. F., Paredes, L. O., Mondragón, J. C., & Reynoso, C. R. (2018). Phytochemical composition and in vitro analysis of nopal (*O. ficus-indica*) cladodes at different stages of maturity. *International Journal of Food Properties*, 21(1), pp. 1728-1742.
- Guevara, F. T., Jiménez, I. H., Reyes, E. M. L., Mortensen, A. G., Laursen, B. B., Lin, L. W., & de la Rosa, A. P. B. (2010). Proximate composition, phenolic acids, and flavonoids characterization of commercial and wild nopal (*Opuntia spp.*). *Journal of Food Composition and Analysis*, 23(6), pp. 525-532.
- Hernández, U. M. I., Pérez, T. E., & Rodríguez, G. M. E. (2011). Chemical analysis of nutritional content of prickly pads (*Opuntia ficus indica*) at varied ages in an organic harvest. *International journal of environmental research and public health*, 8(5), pp. 1287-1295.
- INEGI: Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Anuario Estadístico del Estado de Michoacán. 2010. pp. 127-142.
- Jaramillo, F. M. E., González, C. L., Cornejo, M. M., Dorantes, A. L., Gutiérrez, L. G. F., & Hernandez, S. H. (2003). Effect of thermal treatment on the antioxidant activity and content of carotenoids and phenolic compounds of cactus pear cladodes (*Opuntia ficus-indica*). *Food science and technology international*, 9(4), pp. 271-278.
- Kamiloglu, S., Toydemir, G., Boyacioglu, D., Beekwilder, J., Hall, R. D., & Capanoglu, E. (2016). A review on the effect of drying on antioxidant potential of fruits and vegetables. *Critical reviews in food science and nutrition*, 56(sup1), pp. S110-S129.
- Karam, M. C., Petit, J., Zimmer, D., Djantou, E. B., & Scher, J. (2016). Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review. *Journal of Food Engineering*, 188, pp. 32-49.
- Kuti, J. O. (2004) Antioxidant compounds from four *Opuntia cactus* pear fruit varieties. *Food Chemistry* 85, pp. 527-533.
- Littell, C. R., Stroup, W. W., & Freund, R. J. (2002). *SAS for linear models*. SAS institute.
- Martínez, S. G., Celis, F. F., Hernández, P. T., & Paredes, L. O. (2015). Effect of drying methods on the nutraceutical potential of cactus cladodes (*Opuntia spp.*). *International Journal of Food and Nutritional Science / Volume*, 2(6), pp. 1.
- Medina, T. L., Vernon, C. E. J., Gallegos, I. J. A., Rocha, G. N. E., Herrera, V. E. E., Calderas, F., & Jiménez, A. R. (2011). Study of the antioxidant properties of extracts obtained from nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) cladodes after convective drying. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(6), pp. 1001-1005.
- Méndez, L. P., Flores, F. T., Martín, J. D., Rodríguez, E. M. R., & Romero, C. D. (2015). Physicochemical characterization of cactus pads from *Opuntia dillenii* and *Opuntia ficus indica*. *Food chemistry*, 188, pp. 393-398.
- Palzer, S., Dubois, C., & Gianfrancesco, A. (2012). Generation of product structures during drying of food products. *Drying Technology*, 30(1), pp. 97-105.
- Ramírez, M. E., Córdoba, D. D., Sánchez, M. M. de C., Díez, M. C., & Goñi, I. (2013). Effect of boiling on nutritional, antioxidant and physicochemical characteristics in cladodes (*Opuntia ficus indica*). *LWT-Food Science and Technology*, 51(1), pp. 296-302.
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free radical biology and medicine*, 26(9-10), pp. 1231-1237.

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero  
(*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

- Rodríguez, G. M. E., De Lira, C., Hernández, B. E., Cornejo, V. M. A., Palacios, F. A. J., Rojas, M. I., & Muñoz, T. C. (2007). Physicochemical characterization of nopal pads (*Opuntia ficus indica*) and dry vacuum nopal powders as a function of the maturation. *Plant Foods for Human Nutrition*, 62(3), pp. 107-112.
- Santos, D. M del S., Barba, de la R. A. P., Héliès, T. C., Guéraud, F. & Nègre, S. A. (2017). *Opuntia spp.: Characterization and Benefits in Chronic Diseases*. Volume 2017, Article ID 8634249, pp. 17.
- Serpen, A., Capuano, E., Fogliano, V. & Gökmen. V. (2007). A new procedure to measure the antioxidant activity of insoluble Food components. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 55(19) pp. 7676-7681.
- Shofian, N. M., Hamid, A. A., Osman, A., Saari, N., Anwar, F., Pak Dek, M. S., & Hairuddin, M. R. (2011). Effect of freeze-drying on the antioxidant compounds and antioxidant activity of selected tropical fruits. *international Journal of molecular sciences*, 12(7), pp. 4678-4692.
- Sun, Y., Shen, Y., Liu, D., & Ye, X. (2015). Effects of drying methods on phytochemical compounds and antioxidant activity of physiologically dropped un-matured citrus fruits. *LWT-Food Science and Technology*, 60(2), pp. 1269-1275.
- Valdez, C. R. D., Blanco, M. F., Vázquez, A. R. E., & Magallanes, Q. R. (2008). Producción y usos del nopal para verdura. *Revista Salud Pública y Nutrición*, 14, pp. 1-19.
- Ventura, A. R. I., Bosquez, M. E., Bautista, B. S., & Rivera, C. F. (2017). Cactus stem (*Opuntia ficus-indica* Mill): anatomy, physiology and chemical composition with emphasis on its biofunctional properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(15), pp. 5065-5073.
- Wojdyło, A., Oszmiański, J., & Laskowski, P. (2008). Polyphenolic compounds and antioxidant activity of new and old apple varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(15), pp. 6520-6530.
- Zaid, H., Saad, B., Mahdi, A. A., Tamrakar, A. K., Haddad, P. S., & Afifi, F. U. (2015). Medicinal plants and natural active compounds for diabetes and/or obesity treatment. pp. 1-2.

## DISCUSIÓN GENERAL

Aun y cuando existe suficiente información sobre el efecto del nopal forrajero como complemento de la dieta en animales (Ordaz *et al.*, 2017; Gaitán *et al.*, 2018), la caracterización de éste es escasa y esto, limita la explicación del efecto de esta cactácea sobre los beneficios que genera en los animales que la consumen. Por ello, es importante la determinación de los componentes químicos de los cladodios forrajeros a través de su caracterización para poder complementar y sustentar la información relacionada con la mejora que ejercen al ser consumidos.

Dentro de los aspectos que se deben tomar en cuenta al momento de la caracterización del nopal forrajero son factores bióticos y abióticos, edáficos, especie; así como, edad del cladodio y proceso postcosecha que se implemente en el nopal previo al análisis, ya que éstos influyen en la presencia y cantidad de componentes de los cladodios (Ramírez *et al.*, 2007; Martínez *et al.*, 2015; Ventura *et al.*, 2017). De aquí que, en la presente investigación para reducir la variabilidad (en lo posible) que provocan dichos factores durante la caracterización, se utilizaron cladodios de nopal forrajero (*O. ficus-indica*) de 3.5 meses de edad, cosechados en el mismo periodo (febrero-abril 2020), cultivados bajo las mismas condiciones ambientales y prácticas culturales.

Para la caracterización de los componentes químicos del nopal forrajero deshidratado se optó por utilizar dos procesos de secado; el primero, considerado como convencional (aire caliente) se implementaron temperaturas de 50 °C (T1) y 60 °C (T2) y el segundo, fue el proceso de liofilización (T3), el cual fungió como referente para comparar los cambios químicos ocurridos en el nopal deshidratado por aire caliente.

Los resultados sobre pérdida de peso (por eliminación de agua) mostraron que, dicha pérdida en el nopal es más rápida (32 h) con el proceso de deshidratación por aire caliente a 60 °C, temperatura que también reduce el tiempo de deshidratación. Mientras que, la temperatura a 50 °C incrementó el tiempo de exposición de las muestras de nopal al calor (72 h); lo anterior es similar a la cinética de secado, ya que, la humedad en equilibrio de las fracciones de *O. ficus-indica* se logró en menor tiempo (1033 min) al implementar la temperatura de 60 °C vs. 50 °C (1170 min). Aspectos que concuerda con Medina *et al.* (2008) quienes sugieren que, a

mayor temperatura mayor es la pérdida de humedad o eliminación de agua en el proceso de deshidratación.

Mediante el proceso de deshidratación con aire caliente a 50 y 60 °C, las fracciones del nopal presentaron pérdida de la estructura física, endurecimiento y mayor porcentaje de humedad en comparación con el nopal liofilizado (Figura 1, Capítulo III). Cambios que concuerdan con los establecido por Karam *et al.* (2016), quienes mencionan que, los alimentos liofilizados conservan las propiedades físicas, color y se logra mayor eliminación de humedad *vs.* una deshidratación con aire caliente. No obstante, aunque la estructura física del nopal se ve afectada por temperaturas de 50 y 60 °C, con estas se logra el porcentaje de humedad idóneo (< 7%) (Tabla 2, Capítulo III) para impedir el crecimiento y proliferación de microorganismos (Sáenz, 2000), aspecto importante en el almacenamiento, conservación e inocuidad del nopal destinado para el consumo de los animales.

Dentro del proceso de deshidratación del nopal, no solo es importante la eficiencia del proceso (eliminación de humedad en menor tiempo y con menor gasto de energía: 60 °C), también se debe considerar el objetivo por el cual se pretenda someter a un proceso de deshidratación. Si el objetivo, es sólo eliminar el agua, se puede optar por el proceso de secado por convección; por el contrario, si se busca la conservación de componentes que son sensibles al calor, la opción sería el proceso de sublimación (Shofian *et al.*, 2011); sin embargo, este último precisa de mayor infraestructura y elevación de costos, factores que para la mayoría de los productores de nopal y para los sistemas de producción animal no es viable. Por lo tanto, la alternativa es recurrir al proceso convencional. En este sentido, es necesario determinar los cambios que provoca la deshidratación a 50 °C y 60 °C en el nopal.

Contreras *et al.* (2012) reportan que, el proceso y la temperatura de deshidratación en el nopal modifica el contenido de ciertos componentes. Aspecto que se corroboró en la presente investigación a través del análisis de FT-IR y DRX del nopal deshidratado (Capítulo II). De manera general, se observó mayor presencia de grupos funcionales en el nopal deshidratado a 50 °C en comparación el nopal deshidratado a 60 °C como del liofilizado; la cristalinidad de los compuestos aumenta en el nopal deshidratado a 60 °C. De acuerdo con estos cambios, es de esperar que también se afecte la cantidad de compuestos químicos en el nopal.

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

La comparación del análisis químico (Tabla 2, Capítulo III) específicamente en proteína, ceniza, fibra dietética total y fibra insoluble se encontró que, dichos compuestos presentaron valores mayores ( $p < 0.05$ ) en el nopal deshidratado a 50 °C en comparación con el nopal deshidratado a 60 °C incluso, sobre los valores del nopal liofilizado; dichos cambios, concuerdan con lo establecido por De Santiago *et al.* (2018). No obstante, lo relevante en dichos cambios y de interés para la alimentación animal, se acentúa en la fibra dietética total, puesto que está, promueve el tránsito gastrointestinal en monogástricos, activa los centros de saciedad en el animal e incrementa la digestibilidad de los nutrientes contenidos en la dieta complementada con nopal (Gaitán *et al.*, 2018) y, en los rumiantes, ayuda a la producción de ácidos grasos volátiles, lo cual influye directamente sobre la producción de leche (Abidi *et al.*, 2009; García *et al.*, 2013). Donde la deshidratación a 50 °C permite conservar y aumentar la fibra dietética total.

A pesar de que, la fracción soluble del nopal se incrementó en el nopal liofilizado, los análisis de FT-IR y DRX (Figura 2 y 4, Capítulo IV), mostraron que, la presencia de grupos funcionales y la cristalinidad de los elementos en ésta disminuyen; en cambio, en el nopal deshidratado a 50 °C se incrementa la presencia de grupos funcionales y la cristalinidad de los elementos tanto en la fracción soluble como en la insoluble. Por lo tanto, la deshidratación del nopal forrajero a 50 °C permite mayor rendimiento y aprovechamiento de la fibra dietética total.

En cuanto al mucílago, aunque el rendimiento de éste fue mayor ( $p < 0.05$ ) en el nopal liofilizado (Tabla 1, Capítulo V), el análisis mediante FT-IR, mostró que la presencia de grupos funcionales no se ve afectada en cuanto al porcentaje de transmitancia, independientemente del proceso y temperatura de deshidratación del nopal. Algunos investigadores (Rodríguez *et al.*, 2014; Monrroy *et al.*, 2017) comparan de grupos funcionales entre variedades de nopal, sin embargo, no refieren cambios por aspectos del proceso o temperatura de deshidratación. De aquí que, los hallazgos en la presente investigación pueden contribuir con la caracterización de otros investigadores.

La lignina, del nopal deshidratado a 60 °C mostró un promedio mayor ( $p < 0.05$ ) vs. 50 °C y liofilizado. Pero este componente es considerado como un anti nutriente, lo que la convierte

en un compuesto irrelevante para la alimentación animal. No obstante, este polímero es utilizado en ámbitos como el industrial, y la lignina del nopal podría ser materia prima ya que de acuerdo a los resultados (Figura 1, Capítulo VI), ésta es viable en la producción de resinas, y/o adhesivos. En este sentido, para mayor extracción de la lignina, la deshidratación del nopal puede ser a temperaturas  $\geq 60$  °C (Calabrò *et al.* (2017).

Con respecto a la capacidad antioxidante, un aspecto relevante, dentro de los cambios que el proceso de deshidratación por aire caliente provoca en el nopal (Tabla 1, Capítulo VII) fue que, ésta al ser determinada mediante el radical ABTS●+ no mostró diferencias entre las temperaturas 50 y 60 °C; pero, la determinación por DPPH fue mayor ( $p < 0.05$ ) en el nopal deshidratado a 60 °C *vs.* 50 °C; sin embargo, este resultado puede estar asociado al incremento de reacciones Maillard en el nopal durante el proceso de deshidratación (Palzer *et al.*, 2012). En cuanto a polifenoles totales, se observó que el promedio aumenta ( $p < 0.05$ ) en el nopal deshidratado a 50 °C *vs.* 60 °C. Al respecto se ha informado que, la cantidad de polifenoles y capacidad antioxidante no solo puede estar influenciada por el proceso y temperatura, sino que además, influyen factores propios del alimento (madurez, textura y grosor) así como factores externos como el tipo de extracción (Kamiloglu *et al.*, 2015).

La importancia de los antioxidantes en la salud radica en que, previenen o retrasan el daño celular provocado por los radicales libres, además de neutralizar la oxidación de moléculas, previenen la formación de oxígeno reactivo al captar los radicales libres para evitar daño a biomoléculas como lípidos y proteínas (Vaishali, 2014). En este sentido, para preservar la actividad antioxidante del nopal, asociada a polifenoles, el proceso de deshidratación debe ser a temperatura de 50 °C.

En cuanto a los compuestos cristalinos presentes en el nopal forrajero, como se mencionó previamente, estos mostraron mayor cristalinidad al implementarse la deshidratación a 60 °C, mientras que en el de 50 °C y el liofilizado presentaron un estado más amorfo. Aun así, se detectaron los mismos compuestos en el nopal deshidratado para ambas temperaturas y procesos. Entre los compuestos detectados mediante el análisis de difracción de rayos X se encuentra el oxalato de calcio hidratado (Figuras 2 y 4, Capítulo IV), mismo que se encontró

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

en la fibra insoluble y soluble (wheddellita), resultados que concuerdan con (Rojas *et al.*, 2015).

La forma deshidratada del oxalato de calcio (whewellita) se detectó en el nopal de los tres tratamientos y en sus fracciones de fibra insoluble (Figura 3, Capítulo II; Figura 3, Capítulo IV). La whewellita es la forma estable del carbonato de calcio, por lo que se encuentra en mayor cantidad que la forma metaestable (wheddellita) (Monje y Baran 2002). En cuanto a la cantidad de ambas estructuras, se ha reportado que disminuyen su contenido conforme aumenta la madurez de los cladodios (Rodríguez *et al.*, 2007); pero que, el tamaño de los cristales aumenta respecto a la madurez (Rojas *et al.*, 2015). Aspecto, que en esta investigación no se pudo establecer, debido a que los cladodios sometidos a los tres tratamientos analizados fueron de la misma edad.

Otra de las presentaciones del calcio es el carbonato de calcio (calcita), compuesto presente en el nopal de los tres tratamientos de su mucílago (Figura 2, Capítulo V). Referente al silicato de calcio (spurrita), compuesto que se identificó en la fibra soluble, es reportado junto con la glauberita (sulfato doble de sodio y potasio) por Rojas *et al.* (2015) autores que establecen la presencia de sodio, silicio y azufre en el nopal debido a la spurrita y glauberita. Sin embargo, se considera que, la spurrita reducen el valor nutricional (Granados *et al.*, 2008) del nopal, de la misma manera que el hidrato de hidrógeno oxalato de potasio el cual se encontró en el mucílago y que también es reportado por Contreras *et al.* (2016) en la estructura del mucílago, autores que, lo consideran como un anti-nutriente.

En el caso de la dolomita (bicarbonato de calcio y magnesio), ésta se encontró tanto en el nopal deshidratado como en la fracción de fibra insoluble, contrario a lo reportado por Rojas *et al.* (2015), quienes reportan la presencia de dolomita en la fracción de fibra soluble; mientras que Contreras *et al.* (2015) la reporta en el nopal, como en el caso de la presente investigación. Otros compuestos detectados tanto en la estructura del nopal como en el mucílago fueron el carbonato de potasio y calcio (fairchildite) mismo que es reportado por Contreras *et al.* (2016) en el mucílago, y el cloruro de potasio (silvina) que se reporta en el mucílago de nopal de la especie *spinulifera* por Madera *et al.* (2018).

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

Se ha establecido que los carbonatos presentan mayor biodisponibilidad de calcio que los oxalatos, sin embargo, por cada oxalato presente en el nopal se secuestra un carbonato de calcio (Palacios *et al.*, 2016); en un ensayo in vitro se observó la disminución de biodisponibilidad de calcio del nopal, debido a la presencia de oxalatos (McConna y Nakata 2004). Por otro lado, Contreras *et al.* (2016) señalan que el calcio presente en el nopal, independientemente de su presentación (oxalato o carbonato) es biodisponible para el organismo. La importancia del calcio en la alimentación radica en que, la ingesta de este mineral es canalizado hacia la formación o reposición de calcio en huesos, contracción muscular, impulso nervioso entre otros (Fernández, 2015). Contreras *et al.* (2011) reportan que la edad del cladodio entre 70 y 135 días de edad es la óptima para obtener la mayor cantidad de calcio biodisponible, por lo que, la presencia del calcio en los cladodios analizados fue destacable en la presente investigación, ya que el nopal forrajero analizado fue de 105 días de edad.

La presencia de monosacáridos complejos (celulosa) como simples (xilohexosa), en la fibra insoluble como soluble (respectivamente) era de esperarse, puesto que ambos compuestos son propios de las fibras, mismos que Contreras *et al.* (2011) reportaron en el nopal. Además, el mucílago al ser un heteropolisacárido (Gibson y Nobel 1990) contiene galactosa, glucosa y ácido místico (Majdoub *et al.*, 2001), mismos que fueron detectados con DRX. La importancia de la xilohexosa, galactosa, glucosa y ácido místico son relevantes en la alimentación animal: los carbohidratos del nopal favorecen la fermentación ruminal, lo que a su vez, incrementa el aprovechamiento del alimento ingerido,

Con relación a los resultados de FT-IR tanto para el nopal forrajero deshidratado como para la fibra dietética insoluble y soluble y el mucílago, los espectros confirmaron la presencia de los compuestos detectados mediante DRX descritos anteriormente y otros compuestos no cristalinos. Para el caso del nopal forrajero (Figura 2, Capítulo II) se determinaron la presencia de grupos como el O-H y el N-H ( $3600$  a  $3100\text{ cm}^{-1}$ ) para el agua y las aminas como la glicilglicina respectivamente, otro grupo fue el C-H<sub>3</sub> ( $1725\text{ cm}^{-1}$ ) mismo que se atribuye a la presencia de lípidos, por su parte el C-O y C-C ( $1400$  y  $800\text{ cm}^{-1}$ ) confirma la presencia de carbohidratos.

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

En los espectros de FT-IR de la fibra insoluble se detectó la presencia del grupo O-H y el C-H (2917 y 2852  $\text{cm}^{-1}$ ) confirmando la presencia de la celulosa y lignina en dicha fracción, además del grupo funcional C=O (1735  $\text{cm}^{-1}$ ) correspondiente al ácido ferúlico de las hemicelulosas. A diferencia de la fibra soluble, donde el grupo O-H (3434  $\text{cm}^{-1}$ ) es atribuible a los polisacáridos como la ribosa y xilohexosa, el grupo funcional C-H (2916  $\text{cm}^{-1}$ ) perteneciente a las piranosas. Mientras que los espectros para el mucílago (Figura 1, Capítulo V) se detectaron bandas características para grupos O-H (3744-2991  $\text{cm}^{-1}$ ) mismo que se encuentra presente en diversas moléculas orgánicas como carbohidratos, otro grupo funcional fue C-H (3600-3200  $\text{cm}^{-1}$ ) el cual se encuentra presente en los ácidos como el múxico y galacturónico, así como en la estructura de las piranosas; por su parte el grupo funcional COOH (1602  $\text{cm}^{-1}$ ) está presente en los ácidos carboxílicos como el múxico.

Finalmente, es importante recordar que, en la presente caracterización del nopal forrajero se tomaron en cuenta los componentes, compuestos (mucílago) y minerales de interés para la alimentación animal. Y sobre los cuales, está previamente sustentada la parte de los beneficios que ejerce y de los cuales son responsables cada componente. Por lo que, en la presente investigación no se consideraron todos los elementos que integran el nopal forrajero, sin embargo, esta investigación servirá como punto de partida para futuras investigaciones.

## **CONCLUSIÓN GENERAL**

A partir de la caracterización de los componentes del nopal forrajero deshidratado, se logró determinar la fluctuación de los mismos de acuerdo a los diferentes procesos y temperaturas de deshidratación (50 °C, 60 °C y liofilizado). Lo anterior dio la pauta para establecer que, el proceso de deshidratación mediante aire caliente a una temperatura de 50 °C es la estrategia más adecuada para que los productores de nopal puedan conservarlo, almacenarlo y además, para que éste pueda ser implementado en la alimentación animal; puesto que, dicho proceso y temperatura de deshidratación en los cladodios, no afecta la presencia, cantidad y estructura de los componentes biofuncionales analizados. Incluso con la deshidratación a 50 °C se incrementan algunos componentes.

## BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- Abidi, S., Salem, H. B., Vasta, V., & Priolo, A. (2009). Supplementation with barley or spineless cactus (*Opuntia ficus indica* f. *inermis*) cladodes on digestion, growth and intramuscular fatty acid composition in sheep and goats receiving oaten hay. *Small Ruminant Research*, 87(1-3), 9-16.
- Aguilar, B. J. L., Valdez, A. J. J., Val, A. D., Martínez, F. H. E., Pérez, S. R. E. y Ortiz, R. R. (2016). Efecto de la adición de mucilago de dos variedades (*Opuntia ficus-indica* y *Opuntia atropes*) en leche cruda sobre el contenido de mesófilas aerobias y coliformes totales. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 1(1), pp. 573-578.
- Aranda, O. G. y Flores, V. C. A. (2011). Calidad de la carne de animales suplementados con nopal. *IX Simposium-Taller Nacional y II Internacional sobre “Producción y Aprovechamiento del Nopal y Maguey*, 12-13.
- Aranda, O. G., Flores, V. C. A. & Cruz, M. F. M. (2008). Inclusion of cactus pear cladodes in diets for finishing lambs in Mexico. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 10, pp. 49-55.
- Betancourt, D. M. A., Hernández, P. T., García, S. P., Cruz, H. A. & Paredes, L. O. (2006). Physico-chemical changes in cladodes (Nopalitos) from cultivated and wild cacti (*Opuntia spp.*). *Plant Foods for Human Nutrition*, 61, pp. 115-119.
- Bonilla, R. P. E., Fernández, R. G. A., Bustamante, P. L. E., Casas, M. L. E., Cirineo, R. M. X., Hinojosa, L. M. L., Villar, M. H. C. y Yupanqui, G. B. M. (2017). Determinación estructural De flavonoides en el extracto etanólico de cladodios de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. “Tuna Verde”. *Rev Peru Med Integrativa*. 2(4), pp. 835-40.
- Calabrò, P. S., Catalán, E., Folino, A., Sánchez, A., & Komilis, D. (2018). Effect of three pretreatment techniques on the chemical composition and on the methane yields of *Opuntia ficus-indica* (prickly pear) biomass. *Waste Management & Research*, 36(1), pp. 17-29.
- Contreras, P. M., Perez, T. E., Hernández, U. M. I., Hernández, Q. G., del Real, A., Rivera, M. E. M., & Rodríguez, G. M. E. (2011). Evaluation of oxalates and calcium in nopal pads (*Opuntia ficus-indica* variedad redonda) at different maturity stages. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(1), pp. 38-43.
- Contreras, P. M., Gutiérrez, C. E., Valderrama, B. M. del C., Rojas, M. I., Espinosa, A. D. G., Suárez, V. R., & Rodríguez, G. M. E. (2012). Effects of drying process on the physicochemical properties of nopal cladodes at different maturity stages. *Plant Foods for Human Nutrition*, 67(1), pp. 44-49.
- Contreras, P. M., Rivera, M. E. M., Gutiérrez, C. E., Del López, A. R. & Rodríguez, G. M. E. (2015). Characterization of crystalline structures in *Opuntia ficus-indica*. *Journal of biological physics*, 41(1), pp. 99-112.
- Contreras, P. M., Rodríguez, G. M. E., Gutiérrez, C. E., Valderrama, B. M. del C., Rojas, M. J. I., & Rivera, M. E. M. (2016). Physicochemical and rheological characterization of *Opuntia ficus* mucilage at three different maturity stages of cladode. *European Polymer Journal*, 78, pp. 226-234.
- Castillo, S. F., Estrada, L., Margalef, M. I., & Toffoli, S. (2013). Obtención de harina de nopal y formulación de alfajores de alto contenido en fibra. *Diaeta (B. Aires)*, 20-26.

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

- De Santiago, E., Domínguez, F. M., Cid, C., & De Peña, M. P. (2018). Impact of cooking process on nutritional composition and antioxidants of cactus cladodes (*Opuntia ficus-indica*). *Food chemistry*, 240, pp. 1055-1062.
- Fernández, C. E. (2015). El calcio, imprescindible presencia en nuestra alimentación. *Conexiones*, 1(1), PP. 222-228.
- Figueroa, P. M. G., Pérez, R. I. F., Paredes, L. O., Mondragón, J. C., & Reynoso, C. R. (2018). Phytochemical composition and in vitro analysis of nopal (*O. ficus-indica*) cladodes at different stages of maturity. *International Journal of Food Properties*, 21(1), pp.1728-1742.
- Flores, O. M. A., & Reveles, H. M. (2010). Producción de nopal forrajero de diferentes variedades y densidades de plantación. *RESPYN. Edición Especial*, (5), pp. 198-210.
- Gaitán, L. S. B., Ordaz, O. G., Val, A. D., Martínez, F. H. E., Pérez, S. R. E. y Ortiz, R. R. (2018). Dieta suplementada con nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) modifica el comportamiento productivo y perfil sanguíneo en cerdos. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 17(1), pp. 39-50.
- García, G. R. A., Román, B. R. M., Val, A. D., Pérez, S. R. E. y Ortiz, R. R. (2013). Caracterización y modelación de la curva de lactancia de vacas holstein complementadas con nopal (*Opuntia ficus-indica*) durante la época seca. *Revista Científica*, 23(5), pp. 426-433.
- Gibson, C.A., & Nobel, S.P. 1990. Special chemicals. In *The Cactus Primer* pp. 198–199, First Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Granados, S. D., Ruíz, P. P. y Barrera, E. H. (2008). Ecología de la herbivoría. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 14(1), pp. 51-63.
- Guevara, A. J. C. (2009). Efectos biofuncionales del Nopal y la Tuna. *R Horticultura Int*, 72, pp. 18-19.
- Hernández, U. M. I., Pérez, T. E., & Rodríguez, G. M. E. (2011). Chemical analysis of nutritional content of prickly pads (*Opuntia ficus indica*) at varied ages in an organic harvest. *International journal of environmental research and public health*, 8(5), pp. 1287-1295.
- INEGI: Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Anuario Estadístico del Estado de Michoacán. (2010). 127–142.
- Kamiloglu, S., Toydemir, G., Boyacioglu, D., Beekwilder, J., Hall, R. D., & Capanoglu, E. (2016). A review on the effect of drying on antioxidant potential of fruits and vegetables. *Critical reviews in food science and nutrition*, 56(sup1), pp. S110-S129.
- Karam, M. C., Petit, J., Zimmer, D., Djantou, E. B., & Scher, J. (2016). Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review. *Journal of Food Engineering*, (88), pp. 32-49.
- Madera, S. T. J., Vargas, R. L., Núñez, C. C. A., González, G. G., Peña, C. V., Núñez, G. J. A., & Rodríguez, N. J. R. (2018). Mucilage from cladodes of *Opuntia spinulifera* Salm-Dyck: chemical, morphological, structural and thermal characterization. *CyTA-Journal of Food*, 16(1), pp. 650-657
- Majdoub, H., Roudesli, S., & Deratani, A. (2001). Polysaccharides from prickly pear peel and nopals of *Opuntia ficus-indica*: extraction, characterization and polyelectrolyte behaviour. *Polymer International*, 50(5), pp. 552-560.

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero  
(*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

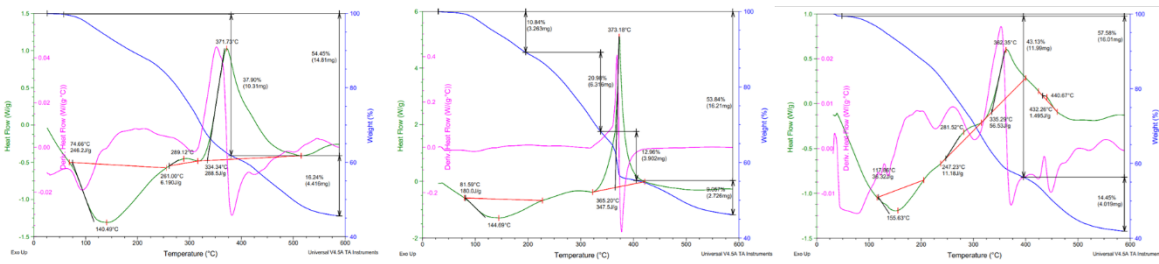
- Martínez, S. G., Celis, F. F., Hernández, P. T., & Paredes, L. O. (2015). Effect of drying methods on the nutraceutical potential of cactus cladodes (*Opuntia* spp.). *Int J Food Nutr Sci/ Volume*, 2(6), pp. 1.
- McConn, M. M., & Nakata, P. A. (2004). Oxalate reduces calcium availability in the pads of the prickly pear cactus through formation of calcium oxalate crystals. *Journal of agricultural and food chemistry*, 52(5), pp. 1371-1374.
- Medina, T. L., Gallégo, I. J. A., González, L. R. F., & Rocha, G. N. E. (2008). Drying kinetics of nopal (*Opuntia ficus indica*) using three different methods and their effect on their mechanical properties. *LWT – Food Sci Technol* 41, pp. 1183–1188
- Medina, T. L., Vernon, C. E. J., Gallegos, I. J. A., Rocha, G. N. E., Herrera, V. E. E., Calderas, F., & Jiménez, A. R. (2011). Study of the antioxidant properties of extracts obtained from nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) cladodes after convective drying. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(6), pp. 1001-1005.
- Monje, P. V., & Baran, E. J. (2002). Characterization of calcium oxalates generated as biominerals in cacti. *Plant Physiology*, 128(2), pp. 707-713.
- Monroy, M., García, E., Ríos, K., & García, J. R. (2017). Extraction and physicochemical characterization of mucilage from *Opuntia cochenillifera* (L.) Miller. *Journal of Chemistry*. Vol 2017. pp. 1-9
- Núñez, L. M. A., Paredes, L. O., & Reynoso, C. R. (2013). Functional and hypoglycemic properties of nopal cladodes (*O. ficus-indica*) at different maturity stages using in vitro and in vivo tests. *Journal of agricultural and food chemistry*, 61(46), pp. 10981-10986.
- Osorio, C. J., Pelayo, Z. C., Verde, C. J. R., Ponce, V. M., Díaz de León, S. F., Bosquez, M. E., & Rodríguez, H. M. E. (2011). Conservación de nopal verdura 'Milpa Alta' (*Opuntia ficus indica* Mill.) desespinado en envases con atmósfera modificada. *Revista mexicana de ingeniería química*, 10(1), pp. 93-104.
- Ordaz, O. G., Juárez, C. A., Pérez, S. R. E., Román, B. R. M., & Ortiz, R. R. (2017). Effect of spineless cactus intake (*Opuntia ficus-indica*) on blood glucose levels in lactating sows and its impact on feed intake, body weight loss, and weaning-estrus interval. *Tropical animal health and production*, 49(5), pp. 1025-1033.
- Ortiz, R. R., Orozco, G. A., Val, A. D., Portillo, M. L. & Pérez, S. R. E. (2017). Efecto de la adición de nopal (*Opuntia ficus-indica*) a la dieta de cerdas lactantes sobre la producción y calidad de la leche. *Nova scientia*, 9 (18), pp. 290-312.
- Palacios, F. A. J., De Lira, G. C. Del Real, A. y Rodríguez, G. M. E. (2016). Distribución y densidad de cristales de oxalato de calcio en cladodios de *Opuntia streptacantha* en función de su peso. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*. Vol. 1, No. 1 pp. 389-394.
- Palzer, S., Dubois, C., & Gianfrancesco, A. (2012). Generation of product structures during drying of food products. *Drying Technology*, 30(1), pp. 97-105.
- Pérez, S. R. E., Delgado, S. L. A., García, S. P. A., Pulido, J. y Ortiz, R. R. (2015). Caracterización, modelación morfológica y análisis proximales de *Opuntia ficus-indica* y *O. atropes* durante las épocas de estiaje y lluvias. *Nova scientia*, 7(15), pp. 133-152.
- Ramírez, T. H. M., Reyes, A. J. A., Pinos, R. J. M. y Aguirre, R. J. R. (2007). Efecto de la especie y madurez sobre el contenido de nutrientes de cladodios de nopal. *Agrociencia*, 41(6), pp. 619-626.

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero  
(*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

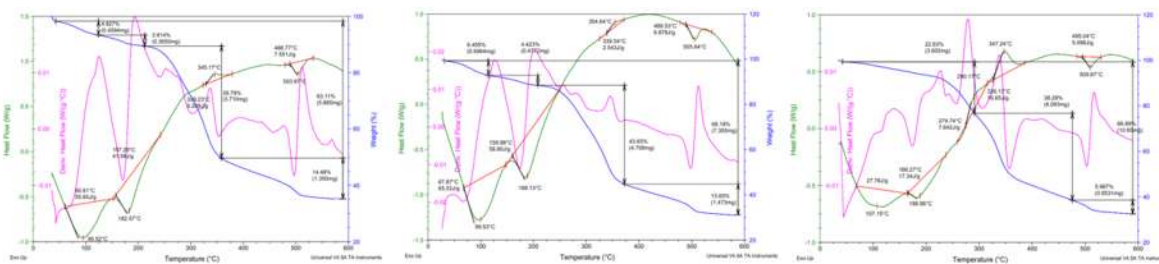
- Rodríguez, G. M. E., De Lira, C., Hernández, B. E., Cornejo, V. M. A., Palacios, F. A. J., Rojas, M. I. & Muñoz, T. C. (2007). Physicochemical characterization of nopal pads (*Opuntia ficus indica*) and dry vacuum nopal powders as a function of the maturation. *Plant Foods for Human Nutrition*, 62(3), pp. 107-112.
- Rodríguez, G. S., Martínez, F. H. E., Chávez, M. C. K., Macías, R. L. I., Zavala, M. E., Garnica, R. M. G., & Chacón, G. L. (2014). Extraction and characterization of mucilage from wild species of *opuntia*. *Journal of food process engineering*, 37(3), pp. 285-292.
- Rojas, M. I., Gutiérrez, C. E., Bah, M., Rojas, M. A., Ibarra, A. C., Rivera, M. E., & Aguilera, B. M. A. (2015). Characterization of calcium compounds in *Opuntia ficus indica* as a source of calcium for human diet. *Journal of Chemistry*, 2015, pp. 1-15.
- Sáenz, C. (2000). Processing technologies: an alternative for cactus pear (*Opuntia spp.*) fruits and cladodes. *Journal of Arid Environments*, 46(3), pp. 209-225.
- Sáenz, C. y Berger, H. (2006). *Utilización agroindustrial del nopal* (Vol. 162). Food & Agriculture Org.
- Santos, D. M del S., Barba, de la R. A. P., Héliès, T. C., Guéraud, F., & Nègre, S. A. (2017). *Opuntia spp.: Characterization and Benefits in Chronic Diseases*. Volume 2017, Article ID 8634249, pp. 17.
- SIAP: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2020). Online: <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/crece-en-mexico-el-consumo-y-produccion-de-nopal-agricultura?idiom=es>
- Shofian, N. M., Hamid, A. A., Osman, A., Saari, N., Anwar, F., Pak Dek, M. S., & Hairuddin, M. R. (2011). Effect of freeze-drying on the antioxidant compounds and antioxidant activity of selected tropical fruits. *international Journal of molecular sciences*, 12(7), pp. 4678-4692.
- Stintzing, F. C., & Carle, R. (2005). Cactus stems (*Opuntia spp.*): A review on their chemistry, technology, and uses. *Molecular nutrition & food research*, 49(2), pp. 175-194.
- Torres, P. R. L., Morales, C. D., Ballinas, C. M. D. L. y Nevárez, M. G. V. (2015). El nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(5), pp. 1129-1142.
- Vaishali, M. (2014). Antioxidants in health and diseases. *Research Journal of Pharmacy and Technology*, 7(4), pp. 489-493.
- Ventura, A. R. I., Bosquez, M. E., Bautista, B. S., & Rivera, C. F. (2017). Cactus stem (*Opuntia ficus-indica* Mill): anatomy, physiology and chemical composition with emphasis on its biofunctional properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(15), pp. 5065-5073.

Tesis de Maestría: “Caracterización de los principales componentes del nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado”

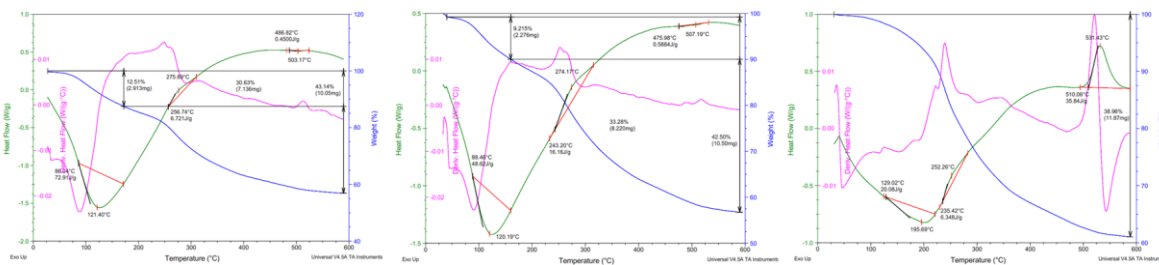
ANEXOS



Calorimetría de barrido diferencial (DSC) y análisis termogravimétrico (TGA) del mucílago de nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado a 50 °C (izquierda), 60 °C (centro) y liofilizado (derecha).



Calorimetría de barrido diferencial (DSC) y análisis termogravimétrico (TGA) de la fibra insoluble de nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado a 50 °C (izquierda), 60 °C (centro) y liofilizado (derecha).



Calorimetría de barrido diferencial (DSC) y análisis termogravimétrico (TGA) de la fibra soluble de nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) deshidratado a 50 °C (izquierda), 60 °C (centro) y liofilizado (derecha).