



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE QUÍMICO FARMACOBIOLOGÍA

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LA
COMPOSICIÓN BROMATOLÓGICA Y
PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE
RESIDUOS DE SEIS ESPECIES DE NOPAL
(*Opuntia*)**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
QUÍMICO FARMACOBIOLOGO**

PRESENTA:

p.Q.F.B. KYRA KYRALINA AVALOS MOTA VELASCO

ASESOR DE TESIS:

Dr. HÉCTOR EDUARDO MARTÍNEZ FLORES

CO-ASESORA

Dra. MARÍA GUADALUPE GARNICA ROMO

Morelia, Michoacán Noviembre 2012



DEDICATORIAS

A DIOS

Quien es la vida, perfecto e infinitamente sabio. Porque si no creyera en ti nada sería posible, pues si poseo sabiduría y talento sé que viene de ti y sin ti todo esfuerzo sería inútil, ya que en este proyecto tú haz sido el principal protagonista y juntos hemos escrito esta historia, aún falta mucho por vivir.

A MI MAMÁ

Porque tú naciste para dar amor, por eso no te pregunto lo que piensas si no lo que amas y sé que tu amor lo traduces en esfuerzo en dar todo lo mejor de ti, un esfuerzo que abre un surco que no deja de producir y que al final brindará frutos dulces y abundantes, pues con tu ejemplo he llegado a ser uno de esos frutos con gran orgullo. Benditas las manos que tendiste para llevarme hasta donde estoy, benditos tus labios que se abrieron elevando una oración al que siempre escucha y bendito dios por darme una madre como tú.

A MI PAPÁ

Porque eres un gran ser humano, valoro tu esfuerzo y dedicación para que yo esté bien, por darme el impulso que necesito para renovar mis fuerzas. Recuerdo constantemente cuando me dices que debo enfrentar con entereza los obstáculos que se presentan en la vida, pues para alcanzar la cima hay que transitar por terrenos escabrosos. Siempre llevaré en mi mente y en mi corazón tu apoyo incondicional y tus consejos que han sido pieza importante en mi vida.

A MIS HERMANOS

A Erick, por compartir conmigo momentos inolvidables, por creer en mi y recordarme siempre, por enseñarme a ser fuerte en los momentos que es necesario y por ver en ti a un gran amigo además de un hermano.

Alex y Héctor porque ustedes forman parte de ese ejemplo, sé que son seres humanos muy valiosos e inteligentes, que su esfuerzo y lucha para lograr lo que

quieren siempre culmina en grandes satisfacciones pues se lo merecen, sus consejos y aportaciones para obtener esta meta fueron de vital importancia para mí, de los cuales he aprendido y seguiré aprendiendo gracias por ser mis amigos y mis hermanos al mismo tiempo.

A MI NOVIO CARLOS CORTEZ

Porque siempre has estado ahí cuando te necesito, quiero que sepas que agradezco a dios y a la vida por a verte puesto en mi camino, eres un ser humano grandioso con múltiples virtudes maravillosas, lo cual te hace ser muy valioso, único y muy especial, por eso deseo de todo corazón compartir contigo mi vida, mi sueños, mis éxitos, pues a tu lado mi vida es tan maravillosa TE AMO.

A MIS TÍAS

Sandra y Zorina, a quienes admiro y aprecié, que siempre me han enseñado excelentes valores y a luchar por nuestras metas, por todo el apoyo moral y la gran motivación que siempre me brindan, las quiero mucho y gracias por todo.

A BERENICE Y RAÚL

Por todo su apoyo y enseñarme que la perseverancia y el esfuerzo son el camino para lograr objetivos, por sus comentarios, sugerencias y opiniones durante mi formación profesional.

A MI ABUELA ANGELINA

Por darme su apoyo y consejos a lo largo de mi vida, me han hecho ser mejor persona, para tener valores y educación.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, porque estar presente, por darme fuerza, inspiración, principio y fin.

A mis padres y hermanos, muchas gracias por estar siempre apoyándome en mis logros, por traer tantas energías al hogar y por dar tanta energía a mi corazón

A Carlos Cortez, por creer en mi y ser mi apoyo incondicional, por enseñarme el valor de la confianza por brindarme tu paciencia en aquellos momentos difíciles, por recordarme a cada momento que me amas y por todos los minutos de espera y ayuda, gracias por tu tiempo y apoyo.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por formarme a largo de mi carrera, por formar parte de esta casa de estudios.

Con una gran admiración respeto por haber aceptado ser mi asesor de tesis el **Dr. Héctor Eduardo Martínez Flores**, a quien considero una persona con grandes aptitudes y conocimientos, estoy completamente convencida que no pude haber hecho mejor elección que al escogerlo como guía para la realización de este trabajo, del cual me siento satisfecha por las grandes enseñanzas que obtuve. Gracias por creer en mí, por su apoyo, dedicación y paciencia.

Dra. Ruth Alfaro Cuevas Villanueva y Dr. Raúl Cortés Martínez, por su aporte en la determinación de minerales en el laboratorio de espectrofotometría de absorción atómica.

Dra. Guadalupe Garnica Romo, por su apoyo y valiosas sugerencias y acertados aportes durante el desarrollo de este proyecto.

Dr. Octavio Rodiles López, gracias por su apoyo y ser un mi amigo al cual estimo profundamente, gracias por sus palabras tan sabias que me hicieron crecer tanto en mis estudios como en mi vida.

Dr. Israel Arzarate, por darme eso consejos que tanto necesitaba y tenerme paciencia, le doy gracias por a verme aceptado como amiga.

M.C. Eder Zavala Mendoza, por sus conocimientos y el gran apoyo brindado durante la tesis solo tú y yo sabemos las experiencias vividas a lo largo de este trabajo las cuales me enseñaron a creer y formar carácter para poder enfrentarme a los obstáculos de este trabajo.

M.C. Benjamín Villalobos Castañeda, por lo conocimientos transmitidos para la determinación de minerales, los cuales fueron determinantes para este trabajo.

A mis compañeros del laboratorio a Sarahí, Nora, Samantha y Tsanda, gracias por hacer más ameno este camino, por sus pláticas, por su apoyo y su ayuda, las estimo y las aprecio mucho.

A mis amigos, Paulina, Leticia, Cristina, Beatriz, Patricia, Juanita, Lucia, Benjamín y Israel, por enseñarme que no hay límites, que lo que me proponga lo puedo lograr y que solo depende de mí, simplemente gracias por brindarme su amistad, enseñarme no solo a dar sino a aprender a recibir, gracias por dejar ser parte de su historia.

A mis maestros de la Facultad de Químico Farmacobiología por participar en mi desarrollo profesional durante mi carrera, sin su ayuda y conocimiento no estaría en donde me encuentro ahora.

Contenido general

	Pág.
CONTENIDO	<i>i</i>
ÍNDICE DE TABLAS	<i>iv</i>
ÍNDICE DE FIGURAS	<i>vi</i>
ABREVIATURAS	<i>x</i>
RESUMEN	<i>xi</i>
ABSTRACT	<i>xiii</i>
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
2.1. Generalidades	3
2.2. Descripción botánica del nopal	4
2.3. Características del género <i>Opuntia</i>	4
2.4. Composición química del nopal	5
2.4.1. Composición química de cladodio	6
2.5. Origen y distribución del nopal	7
2.6. Superficie cultivada en Michoacán	8
2.7. Usos y aplicaciones del nopal	8
2.8. Efectos bifuncionales del nopal	12
2.9. Fibra dietética (FD)	13
2.9.1. Compuestos que conforman la fibra dietética	14
2.10. Propiedades y usos de la fibra dietética	16
2.11. Propiedades físico-químicas de la fibra dietética	16
2.12. Fuentes de fibra dietética en los alimentos	17
2.13. Clasificación de la fibra dietética	18
2.13.1. Fibra soluble	18

2.13.2. Fibra insoluble.....	18
2.13.3. Componentes de la fibra insoluble	19
2.13.3.1. Celulosa	19
2.13.3.2. Hemicelulosa	20
2.13.3.3. Lignina	20
2.14. Funciones fisiológicas y beneficios de la fibra insoluble.....	21
2.15. Fuentes de fibra insoluble.....	23
3. JUSTIFICACIÓN	24
4. HIPÓTESIS.....	25
5. OBJETIVOS	25
5.1. Objetivo general	25
5.2. Objetivos específicos.....	25
6. MATERIALES Y MÉTODOS	26
6.1. Materia prima.....	26
6.2. Material y equipo	27
6.3. Metodología para la extracción de mucílago	27
6.3.1. Relación nopal/agua.....	28
6.4. Metodología para la deshidratación del RS de nopal	28
6.4.1. Conservación	29
6.5. Metodología para el análisis de composición química del RS de nopal.....	30
6.5.1. Determinación de humedad	30
6.5.2. Determinación de cenizas	30
6.5.3. Determinación de fibra dietética	31
6.5.3.1. Digestión.....	31
6.5.3.2. Filtrado.....	31
6.5.4. Determinación de lípidos (extracto etéreo).....	32
6.5.5. Determinación de proteínas	33
6.5.5.1. Digestión	33
6.5.5.2. Destilación	34
6.5.6. Determinación de carbohidratos totales.....	35

6.5.7. Determinación de elementos mediante espectrofotometría de absorción atómica	35
6.6. Metodología para análisis de la composición físico-química del RS de nopal.....	36
6.6.1. Tamaño y diámetro de partícula.....	36
6.6.2. Capacidad de absorción de agua (CAA) y aceite (CAAC)	36
6.6.3. Determinación colorimétrica	37
6.6.4. Determinación de acidez.....	38
6.6.5. Propiedades estructurales microscopía electrónica de barrido (MEB).....	39
6.6.6. Análisis estadístico.....	40
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
7.1. Localización georreferida de poblaciones silvestres de especies de <i>Opuntia</i>	41
7.2. Deshidratación del RS de las seis especies de <i>Opuntia</i>	42
7.3. Composición química de los RS de seis especies de <i>Opuntia</i>	42
7.4. Propiedades físico-química del RS de las seis especies de <i>Opuntia</i>	54
7.5. Tamaño y diámetro de partícula del RS de las especies de <i>Opuntia</i> en estudio.....	60
7.6. Determinación de color del RS de seis especies de <i>Opuntia</i>	63
7.7. Determinación de minerales (Ca, Mg, K, Na, Cu, Fe, Ni y Zn) en el RS mediante espectrofotometría de absorción atómica	68
7.8. Microscopía electrónica de barrido (MEB).....	78
8. CONCLUSIONES	80
9. RECOMENDACIONES.....	82
10. PERSPECTIVAS	82
11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

ÍNDICE DE TABLA

	Pag.
Tabla 1. Clasificación botánica de las especies de <i>Opuntia</i> en estudio.....	4
Tabla 2. Composición química de pencas de nopal <i>Opuntia</i> . Con base en 100g de materia fresca.....	6
Tabla 3. Porcentaje materia seca en cladodios de distintas edades de <i>Opuntia ficus-indica</i>	6
Tabla 4. Sectores industriales que pueden obtener beneficios por productos obtenidos a partir de los nopales.....	11
Tabla 5. Algunos productos alimenticios, subproductos y aditivos obtenidos de la tuna y los cladodios	11
Tabla 6. Propiedades del nopal con aplicación farmacéutica	13
Tabla 7. Polisacáridos de la pared celular de la fibra dietética	15
Tabla 8. Acciones en el organismo de los diferentes componentes de la fibra insoluble (FI).....	22
Tabla 9. Alimentos fuente de FI	23
Tabla 10. Determinación de proteína cruda por el método Macro Kjeldhal	33
Tabla 11. Distribución geográfica de las especies de <i>Opuntia</i> en Michoacán .	41
Tabla 12. Rendimientos del RS deshidratado obtenido a partir de diferentes especies de <i>Opuntia</i>	42
Tabla 13. Composición química en base húmeda del RS de las seis especies de nopal <i>Opuntia</i>	43
Tabla 14. Composición química (%) de cladodios secos de <i>O. atropes</i> , <i>O. hyptiacantha</i> , <i>O. joconostle</i> , <i>O. streptacantha</i> , y <i>O. tomentosa</i>	44

Tabla 15. Porcentajes de FDT, FS e FI de las seis especies de <i>Opuntia</i>	51
Tabla 16. Determinación de la capacidad de absorción de agua y aceite, determinación de acidez del RS de seis especies de <i>Opuntia</i>	55
Tabla 17. Distribución de partícula de polvo de la fibra insoluble de nopal.....	61
Tabla 18. Diámetro medio de partícula (DMP) de cada una de las especies de <i>Opuntia</i>	63
Tabla 19. Colorimetría de fibra insoluble de nopal de seis especies de <i>Opuntia</i> . Saturación (Croma) y ángulo de tono ⁰ Hue.....	64
Tabla 20. Concentraciones de Ca, Mg, K y Na en el RS de las seis especies de <i>Opuntia</i>	69
Tabla 21. Concentraciones de Cu, Fe, Ni y Zn en el RS de las seis especies de <i>Opuntia</i>	75
Tabla 22. Dosis diaria recomendada de minerales para consumo humano (Minerales)	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Planta de nopal	3
Figura 2. Estructura y partes de la pared celular, origen fundamental de la fibra alimentaria.....	15
Figura 3. Alimentos ricos en fibra dietética.....	17
Figura 4. Estructura de la celulosa dentro de la pared celular.....	19
Figura 5. Estructura básica de hemicelulosa	20
Figura 6. Estructura de la lignina	21
Figura 7. Seis especies de <i>Opuntia</i> Originarias del estado de Michoacán a) <i>O. joconostle</i> , b) <i>O. tomentosa</i> , c) <i>O. streptacantha</i> , d) <i>O. hyptiacantha</i> , e) <i>O. atropes</i> , f) <i>O. ficus-indica</i>	26
Figura 8. Pelado de nopal.....	27
Figura 9. Calentamiento nopal/agua.....	27
Figura 10. RS deshidratado.....	28
Figura 11. Tamiz con malla de 250µm (No. 60) RS.....	28
Figura 12. RS en bolsas de vacío.....	29
Figura 13. Pasos para la obtención de RS	29
Figura 14. Atributos perceptuales básicos del color	38
Figura 15. Ubicación geográfica de los sitios de colecta de las seis especies de <i>Opuntia</i>	41
Figura 16. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de los porcentajes de humedad en las especies del RS	45

Figura 17. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de los porcentajes de cenizas en las seis especies del RS	46
Figura 18. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de los porcentajes de lípidos en las seis especies del RS	48
Figura 19. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de los porcentajes de proteínas en las seis especies del RS.....	49
Figura 20. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de los porcentajes de carbohidratos en las seis especies del RS	50
Figura 21. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de los porcentajes de FI en las seis especies de <i>Opuntia</i>	52
Figura 22. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de los porcentajes de FS en las seis especies de <i>Opuntia</i>	53
Figura 23. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de los porcentajes de FDT en las seis especies de <i>Opuntia</i>	54
Figura 24. ANOVA y test de tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de la capacidad de absorción de agua en el RS de las seis especies de <i>Opuntia</i>	57
Figura 25. ANOVA y test de tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de la capacidad de absorción de aceite en el RS de las seis especies de <i>Opuntia</i>	58
Figura 26. ANOVA y test de tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de acidez en el RS de las seis especies de <i>Opuntia</i>	60
Figura 27. Tamaño medio de partícula (DMP) para <i>O. atropes</i>	62
Figura 28. Tamaño medio de partícula (DMP) para <i>O. tomentosa</i>	62
Figura 29. Tamaño medio de partícula (DMP) para <i>O. hyptiacantha</i>	62
Figura 30. Tamaño medio de partícula (DMP) para <i>O. streptacantha</i>	62

Figura 31. Tamaño medio de partícula (DMP) para <i>O. joconostle</i>	62
Figura 32. Tamaño medio de partícula (DMP) para <i>O. ficus-indica</i>	62
Figura 33. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de luminosidad (L) en el RS de las seis especies de <i>Opuntia</i>	65
Figura 34. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de estímulo (a*) en el RS de las seis especies de <i>Opuntia</i>	65
Figura 35. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de estímulo (b*) de las seis especies de <i>Opuntia</i>	66
Figura 36. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de saturación cromática en el RS de las seis especies de <i>Opuntia</i>	67
Figura 37. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) ángulo Hue en el RS de las seis especies de <i>Opuntia</i>	67
Figura 38. ANOVA y Prueba de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$), en las concentraciones de calcio mg/100g en las seis especies de <i>Opuntia</i>	71
Figura 39. ANOVA y Prueba de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$), en las concentraciones de potasio mg/100g en las seis especies de <i>Opuntia</i>	72
Figura 40. ANOVA y Prueba de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$), en las concentraciones de sodio mg/100g en las seis especies de <i>Opuntia</i>	73
Figura 41. ANOVA y Prueba de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$), en la determinación de hierro mg/100g en las seis especies de <i>Opuntia</i>	75
Figura 42. ANOVA y Prueba de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$), en la determinación de níquel mg/100g en las seis especies de <i>Opuntia</i>	76
Figura 43. ANOVA y Prueba de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$), en la determinación de zinc mg/100g en las seis especies de <i>Opuntia</i>	77
Figura 44. Micrografía 100x 200 μ m del RS de <i>O. ficus-indica</i>	79

Figura 45. Micrografía 300x 80µm del RS de <i>O. tomentosa</i>	79
Figura 46. Micrografía 130x 200µm del RS de <i>O. hyptiacantha</i>	79
Figura 47. Micrografía 250x 90µm del RS de <i>O. streptacantha</i>	79
Figura 48. Micrografía 250x 90µm del RS de <i>O. atropes</i>	79
Figura 49. Micrografía 350x 70µm del RS de <i>O. joconostle</i>	79

Abreviaturas

AACC	American Associationmg of Cereal Chemists	min	Minutos
AGCC	Ácidos grasos de cadena corta	ml	Mililitros
°C	Grados centígrados	MEB	Microscopia electrónica de barrido
Ca	Calcio	N	Normal
CAA	Capacidad de absorción de agua	NaOH	Hidróxido de sodio
CAAc	Capacidad de absorción de aceite	Na ₂ SO ₄	Sulfato sódico
Cu	Cobre	Na	Sodio
C	Croma	Ni	Níquel
Cm	Centímetro	O.	<i>Opuntia</i>
DMP	Diámetro medio de partícula	Ph	potencial de hidrogeno
Fe	Hierro	Rpm	Revolución por minutos
FD	Fibra dietética	µm	Micrómetros
FI	Fibra insoluble	Zn	Zinc
FS	Fibra soluble		
g	Gramo		
h	Hora		
Ha	Hectárea		
HCl	Ácido clorhídrico		
HgO	Óxido de mercurio		
H ₂ SO ₄	Acido Sulfúrico		
Kg	Kilogramo		
K	Potasio		
LD	Límite de detección		
Mg	Magnesio		

RESUMEN

La mayor parte de las investigaciones sobre usos y beneficios a la salud por parte del nopal (*Opuntia*) y la fibra obtenida de éste, se centran en la fibra soluble (FS) de la especie comercial *O. ficus-indica*. Estudios recientes muestran que en especies de *Opuntia* silvestres del estado de Michoacán se obtienen mayores rendimientos de FS (de interés en la industria farmacéutica y alimentaria). Sin embargo, durante la extracción del mucílago de nopal se genera un remanente de fibra insoluble (FI), el cual puede ser útil, dándole un uso integral al nopal. La FI está compuesta por celulosa, hemicelulosa y lignina, los compuestos de esta fibra son poco fermentables y resisten la acción de los microorganismos del intestino. Su efecto en el organismo humano es limpiar las paredes del intestino desprendiendo los desechos adheridos a ella; además de aumentar el volumen de las heces fecales, reduce su consistencia y su tiempo de tránsito a través del tubo digestivo. La ingesta diaria de FI previene el estreñimiento y disminuye el sobrepeso, y cáncer de colon. La FI de nopal obtenida mediante la extracción de mucílago aun no ha sido estudiada, presentando propiedades benéficas.

En el presente trabajo se determinó la composición química y propiedades físico-químicas del Residuo Sólido (RS), de cinco especies silvestres originarias del estado de Michoacán *O. tomentosa*, *O. streptacantha*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. atropes* y la especie comercial *O. ficus-indica*. Se realizó un análisis químico proximal y se determinaron las propiedades físico-químicas (capacidad de absorción de agua y aceite, color, acidez y tamaño de partícula), así como, la concentración (calcio, magnesio, sodio, potasio, hierro, cobre y zinc) mediante espectrofotometría de absorción atómica (AAS por sus siglas en inglés). Por último, se observó la microestructura del RS mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). Los resultados obtenidos de la caracterización química del RS mostraron diferencias entre las especies silvestres y la comercial; la especie *O. tomentosa* presentó el mayor contenido de FI (67.7%) superando a la especie comercial *O. ficus-indica* (56.2%). Los resultados de las determinaciones físico-químicas mostraron que la especie *O. streptacantha* obtuvo el valor mayor de

absorción de agua (6.3%) y aceite (3.6%) respectivamente, mientras que *O. ficus-indica* en absorción de agua (4.9%) y aceite (2.26%) respectivamente. El menor Diámetro Medio de Partícula (DMP) fue para *O. streptacantha* con 168µm y el mayor fue para *O. ficus-indica* con 176µm. Las concentraciones de Ca, Mg y Na del RS de las seis especies de *Opuntia* son mayores a la dosis diaria recomendada mientras que el potasio (K) rebasó la dosis diaria recomendada en las especies de *O. atropes* con 719mg/100g, *O. tomentosa* con 893mg/100g y *O. streptacantha* con 1,084mg/100g. En el caso del Cu y Ni se registraron concentraciones altas, para el Fe (excepto en la especie *O. ficus-indica* obtuvo 36.3 mg/100g) y para el Zn se registraron concentraciones bajas, comparadas con la dosis diaria recomendada para el consumo humano. El RS de las seis especies de *Opuntia* obtenida mediante la extracción de mucílago presenta propiedades que permiten recomendarla para el uso integral del nopal y su uso para desarrollar productos alimenticios.

ABSTRACT

Most research uses and health benefits from the nopal (*Opuntia*) and fiber obtained from it, focus on the insoluble fiber (FS) of the commercial species *O. ficus-indica*. Recent studies show that in wild *Opuntia* species of Michoacán higher yields are obtained from FS (of interest in the pharmaceutical and food industries). During extraction of cactus mucilage generates a remnant of insoluble fiber (FI), which can be useful, giving full use the cactus. The FI is composed of cellulose, hemicellulose and lignin, the compounds of this are poorly fermentable fiber and resist the action of microorganisms in the intestine. Its effect on the human body is to clean the walls of the intestine shedding debris attached to it, it will increase the volume of stool, consistency, and reduces transit time through the digestive tract. The daily intake of FI prevents constipation and reduces overweight, and colon cancer. The cactus FI obtained by removing mucilage has not yet been studied, introducing beneficial properties.

In this study we investigated the chemical composition and physicochemical properties of the solid residue (SR), five wild species originating from the state of Michoacán *O. tomentosa*. *O. streptacantha*. *O. hyptiacantha*. *O. joconostle*. *O. atropes* and commercial species *O. ficus-indica*. Chemical analysis was performed proximal and determined physicochemical properties (water absorption capacity and oil, color, acidity and particle size) and the concentration (calcium, magnesium, sodium, potassium, iron, copper and zinc) by atomic absorption spectrophotometry (AAS for its acronym in English). Lastly, the microstructure was observed by electron microscopy RS (SEM). The results of the chemical characterization of RS showed differences between wild and commercial species *O. tomentosa* had the highest content of FI (67.7%) outperforming the commercial species *O. ficus-indica* (56.2%). The results of the physico-chemical determinations showed that *O. streptacantha* obtained the highest value of water absorption and oil with 6.3 and 3.6% respectively, while *O. ficus-indica* scored 4.9 and 2.26% respectively. The smaller average particle diameter (DMP) was to *O. streptacantha* with 168 microns and the largest was for *O. ficus-indica* with 176 microns. The concentrations of Ca,

Mg and Na the RS of the six species of *Opuntia* are greater than the recommended daily dose while potassium (K) exceeded the recommended daily dose in species *O. atropes* with 719 mg/100g, *O. tomentosa* with 893 mg/100g and *O. streptacantha* with 1.084 mg/100g. In the case of Cu and Ni concentrations were higher for the Fe (except for *O. ficus-indica* scored 36.3 mg/100g) and Zn concentrations were low compared to the recommended daily dose for human consumption. The RS of the six species of *Opuntia* obtained by extraction of mucilage recommending exhibits properties that allow for the full use of cactus and its use to develop food products.

1. INTRODUCCIÓN

El nopal es una planta de la familia *Cactácea* de los géneros *Opuntia* que se produce principalmente en zonas templadas, semiáridas y tropicales secas. Esta planta es originaria de América, se distribuyó desde México hasta España y la cuenca del Mediterráneo. En México el consumo de variedades silvestres de tallos de nopal (nopalitos) y frutos (tunas) se realiza desde hace aproximadamente 25,000 años; su uso como alimento se ha difundido en África, Asia, Europa y Oceanía (Bautista-Justo *et al.*, 2010). En México existe la diversidad más amplia de nopales, tanto silvestres como cultivados, lo cual se manifiesta en un gran número de variedades de nopales en el mercado (Loayza y Chávez, 2007; Ruiz y Guerrero, 2009; Sáenz *et al.*, 2006). El nopal silvestre ocupa alrededor de 3 millones de hectáreas del territorio nacional (Instituto Nacional de Ecología, 2007). Aunque se conocen alrededor de 200 especies del género *Opuntia*, México cuenta con aproximadamente 105, sólo 12 de estas especies son utilizadas por el humano para producción de fruta y nopales para alimentación humana, forraje o cría de grana cochinilla para la obtención de colorante (Sáenz *et al.*, 2006). La especie más ampliamente cultivada en distintas partes del mundo es *O. ficus-indica* (Sáenz *et al.*, 2006; Instituto Nacional de Ecología, 2007).

En el estado de Michoacán existen poblaciones tanto de nopales cultivados como silvestres. En 2009 los nopales cultivados ocuparon una superficie de 308 ha (Flores-Valdez *et al.*, 1995). Con respecto al nopal silvestre no hay registros pero se sabe que ocupan gran parte del territorio Michoacano. Entre las especies silvestres se han reportado: *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha* y *O. tomentosa* (Casas y Barbera, 2002). Estas especies han sido poco estudiadas y representan un gran material para su estudio ya que puede proporcionar importantes beneficios alimentarios, tecnológicos, económicos, sociales y culturales. La importancia económica y social del cultivo del nopal en México radica en la gran superficie ocupada por nopaleras tanto silvestres como cultivadas, en el tipo y número de productores involucrados, tipo de regiones en que se cultiva el nopal y diversidad de los productos generados (Flores-Ortiz y

Reveles-Hernández, 2010). El nopal es un recurso que representa un alto potencial canalizado como sustento a importantes segmentos de la población rural como fuente de alimentación e ingresos para los productores. Actualmente el cultivo de nopal ha adquirido gran importancia desde el punto de vista socioeconómico y agroecológico debido al uso integral que se le puede dar y por los beneficios que ofrece en la industria alimentaria (humana y animal), la medicina, la cosmetología, manejo biotecnológico, conservación de suelos, entre otros (Corrales-García, 2010).

El nopal tiene excelentes cualidades nutricionales, entre las que destaca su contenido de calcio. Además de su alto contenido de fibra dietética (FD), compuesta tanto por fibra soluble (FS) como fibra insoluble (FI); los polisacáridos estructurales (FD) varían entre las distintas especies de nopal, incluyendo lignina, celulosa, hemicelulosa, pectina, mucílago y gomas naturales. Estas fibras son responsables de varios beneficios a la salud (Bautista-Justo *et al.*, 2010). El nopal es fuente importantes de vitaminas del tipo A, B1, B2, B3 y C, también proporciona potasio, calcio, magnesio y hierro (Quiguango, 2011). La FD no es digerida por las enzimas del sistema digestivo humano, pero cumple con un papel importante, debido a que la FI en el sistema digestivo mejora la capacidad de retención de agua produciendo heces de mayor volumen y más blandas facilitando su eliminación y disminuyendo las posibilidades de diverticulitis, hemorroides y estreñimiento. La disminución del tránsito intestinal de las heces disminuye el tiempo de contacto con sustancias potencialmente cancerígenas y por ello se le atribuye la disminución en la incidencia del cáncer de colon (Silva, 2007).

Tomando en cuenta que hoy en día es importante recibir una dieta mayormente balanceada a base de alimentos naturales. El presente trabajo está enfocado hacia la caracterización química y físico-química del remanente de la extracción de mucílago (RS) de seis especies de nopal del género *Opuntia* cultivadas en el Estado de Michoacán de Ocampo de tal forma que permita considerar al RS como una alternativa para su consumo.

2. ANTECEDENTES

2.1. Generalidades

El género *Opuntia* (Figura 1) pertenece a la familia de las cactáceas, es considerado uno de los más antiguos y más cultivados en México ha tenido uso desde épocas prehispánicas; jugó un papel importante en la economía agrícola del imperio Azteca. *Opuntia* crece prácticamente a lo largo de todo México, pero especialmente en zonas áridas y semiáridas donde pueden reproducirse adecuadamente pocos cultivos económicos de manera adecuada (Loubet, 2008).

Las cactáceas son endémicas del continente Americano. México es considerado un centro de biodiversidad por excelencia, de aproximadamente 200 especies que existen en el mundo, entre 83 y 105 se encuentran en este país (Zavala, 2012).



Figura 1. Planta de nopal.

México ha sido reconocido como el centro de origen y dispersión del género *Opuntia*. Esta riqueza debe ser considerada como patrimonio del país, por lo que es importante poner especial atención en su conservación, mejoramiento para hacer del género un elemento activo en el desarrollo económico y alimentario (García-Zambrano *et al.*, 2006).

2.2. Descripción botánica del nopal

La palabra nopal proviene del náhuatl “*nopalli*” que en castellano significa, planta cactácea que produce tuna o higo chumbo. Es la planta más representativa de la flora mexicana y de las más consumidas. Existen evidencias de que el nopal fue cultivado desde el año 500 a.c. (Villa y Muñoz-Jiménez, 2011).

Un número importante de las especies de *Opuntia* son comestibles, de éstas se han seleccionado a lo largo del tiempo las más apropiadas para la producción de tuna y pencas “nopalitos” (verdura) (Villa y Muñoz-Jiménez, 2011). En la Tabla 1 se muestra la clasificación botánica del nopal.

Tabla 1. Clasificación botánica de las especies de *Opuntia* en estudio (Villa y Muñoz-Jiménez, 2011).

Reino	Vegetal
Subreino	Embryophyta
División	Angiosperma
Clase	Dicotiledónea
Subclase	Dialipétalas
Orden	Opuntiales
Familia	Cactaceae
Tribu	Opuntiae
Subfamilia	Opuntioideae
Genero	Opuntia
Subgénero	Platyopuntia
Especie	<i>O. atropes</i> , <i>O. hyptiacantha</i> , <i>O. joconostle</i> , <i>O. streptacantha</i> , <i>O. tomentosa</i> y <i>O. ficus-indica</i> .

2.3. Características del género *Opuntia*

Los nopales son plantas arbustivas, rastreras o erectas, que pueden alcanzar de 3 a 5 m de altura. El sistema radical es extenso, densamente ramificado, rico en raíces finas absorbentes y superficiales. La longitud de las raíces está en relación con las condiciones hídricas y con el manejo cultural, especialmente el riego y la fertilización. Su tronco es leñoso y mide entre 20 y 50 cm de diámetro.

Sus ramas están formadas por cladodios de 30 a 60 cm de largo x 20 a 40 cm de ancho y de 2 a 3 cm de espesor (Instituto Nacional de Ecología, 2007). El cladodio fresco recibe el nombre de nopalito y el adulto de penca. En el parénquima se almacenan considerables cantidades de agua, lo que permite a las plantas soportar largos periodos de sequía. Sobre las caras del cladodio se presentan las yemas, llamadas areolas, que tienen la capacidad de desarrollar nuevos cladodios, flores y raíces aéreas según las condiciones ambientales. Las flores, de 7 a 10 cm de largo, son sésiles, hermafroditas, solitarias y de diversos colores y se desarrollan normalmente en el borde superior de las pencas. Su fruto carnoso, llamado tuna, es una falsa baya oval que mide de 5 a 10 cm de largo x 4 a 8 cm de diámetro y su color puede ser amarillo, anaranjado, rojo o purpúreo. La pulpa del fruto presenta numerosas semillas, es dulce y posee gran aceptabilidad para su consumo (Abraján, 2008).

2.4. Composición química del nopal

En general la composición química de las cactáceas es variable, está en función de las especies, edad y época del año. La cantidad de agua almacenada depende de cada especie, cabe resaltar que el elevado contenido de humedad del nopal es importante en regiones áridas, ya que proporciona gran parte de los requerimientos de agua para los animales, principalmente en sequía (Santos *et al.*, 2001). Los nopales son ricos en calcio y potasio (93 y 166 mg/100 g, respectivamente) y tienen bajo contenido de sodio (2 mg/100 g), lo que implica un beneficio adicional para la salud humana (Tabla 2) (Abraján, 2008). Además, el nopal puede ser una fuente importante de FI.

Tabla 2. Composición química de pencas de nopal *Opuntia* con base en 100g de materia fresca (Valdez, 2008).

Compuesto Químico	Cantidad
Agua	88.00
Porción Comestible	78.00
Energía (Kcal)	27.00
Proteína (g)	1.70
Grasas (g)	0.30
Carbohidratos (g)	5.60
Cenizas	0.90
Ácido ascórbico (vitamina C)	12,70mg
Calcio (mg)	93.00
Magnesio (mg)	13-15
Fósforo (mg)	20
Hierro (mg)	0.50
Vitamina A (μg eq)	41.00
Tiamina (mg)	0.04
Riboflavina (mg)	0.04
Niacina (mg)	0.20
Ácido ascórbico (mg)	19.00

2.4.1. Composición química del cladodio

Los cladodios tienen interés desde el punto de vista industrial ya que cuando los brotes son tiernos (10-15 cm) se usan para la producción de nopalitos y cuando están parcialmente lignificados (cladodios de 2-3 años), para la producción de harinas y otros productos (Valdez, 2008). El contenido de los macrocomponentes del cladodio varía de acuerdo a la edad (Tabla 3). Los cladodios son una fuente importante de fibra, calcio y mucílago; los tres son componentes necesarios para integrar una dieta saludable (Valdez, 2008).

Tabla 3. Porcentaje materia seca en cladodios de distintas edades de *O. ficus-indica* (Valdez, 2008).

Edad (años)	Proteína	Grasa	Cenizas	Fibra cruda	Extracto libre de nitrógeno
0.5	9.4	1.00	21.0	8.0	60.6
1	5.4	1.29	18.2	12.0	63.1
2	4.2	1.40	13.2	14.5	66.7
3	3.7	1.33	14.2	17.0	63.7

2.5. Origen y distribución del nopal

Su origen e historia están relacionados con las antiguas civilizaciones mesoamericanas, particularmente con la cultura azteca. Existen evidencias arqueológicas que permiten afirmar que las poblaciones indígenas asentadas en las zonas semiáridas de Mesoamérica dieron inicio al cultivo (Esparza-Sandoval, 2010). La importancia en la vida social, económica y religiosa del cultivo y aprovechamiento del nopal se remonta a las antiguas civilizaciones mesoamericanas. Determinó las rutas migratorias de las tribus nómadas de Aridoamérica, los asentamientos humanos en el centro de México y formó parte del escudo de Tenochtitlán, símbolo que se conserva hasta la fecha. Existen evidencias de que el nopal ha sido utilizado en México desde hace 7,000 años. En Tehuacán, Puebla, existe registro de semillas, cáscaras de tuna y fibras de pencas de nopal (Abraján, 2008). El género *Opuntia* ha tenido uso en México desde la época prehispánica, donde jugó un papel importante en la economía agrícola del imperio Azteca, crece prácticamente a lo largo de todo el país especialmente en zonas áridas y semiáridas. En México existen más de 50 empresas que elaboran productos utilizando el nopal como materia prima, por ejemplo en alimentos, medicinas, cosméticos, artesanías, etc. (Loubet, 2008).

Las principales zonas de producción en el país se localizan en nueve estados de la República Mexicana: Aguascalientes, Baja California, Distrito Federal, Jalisco, Oaxaca, Michoacán, Puebla, San Luis Potosí y Zacatecas. El área de producción más importante es el Distrito Federal, ocupa un 68% de la superficie cultivada y el 80% del volumen de la producción nacional, en segundo lugar esta San Luis Potosí con 8% y Oaxaca con el 4%. Estas tres entidades junto con Michoacán y Jalisco representan el 98% de la producción total (Instituto Nacional de Ecología, 2007).

2.6. Superficie cultivada en Michoacán

En Michoacán existen poblaciones de nopales cultivados y silvestres, en el año 2009, los cultivados ocuparon una superficie de 308 ha y de la especie silvestre no se encontraron registros. Se sabe que las poblaciones de nopal ocupan gran parte del territorio Michoacano. Entre las especies silvestres se han reportado: *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha* y *O. tomentosa*. Estas especies han sido poco estudiadas y representan un material importante para su estudio que generara grandes beneficios tecnológicos, económicos, sociales y culturales (Zavala, 2012).

2.7. Usos y aplicaciones del nopal

Las especies del género *Opuntia* son cultivadas por el hombre para la producción de fruta, alimentación humana, forraje. etc. La especie más cultivada en distintas partes del mundo es *O. ficus-indica*, en la cuenca del Mediterráneo es la única del género *Opuntia* que se cultiva y se emplea con diferentes propósitos (Esparza-Sandoval, 2010).

Los conquistadores criollos y la población mestiza adoptaron el consumo del nopal, varios guisos reciben nombres en castellano como nopalitos “poblanos”, “navegantes”, “reales” y “ensalada de nopalitos”. El nopal tiene gran diversidad de usos, en tiempos prehispánicos se le consideraba una deidad como al maguey, servía para elaborar alimentos, bebidas, aceite, papel, pegamento, y para curar diversas enfermedades (Villa y Muñoz-Jiménez, 2011). Los indígenas del altiplano potosino guisaban los pétalos o los incorporaban con otros ingredientes. Las tunas fueron empleadas como fruta fresca, secada al sol o cocida. Elaboraban miel ligera “miel de tuna”, miel espesa “melcocha”, mermelada y pasta llamada en la actualidad “queso de tuna”. El nopal sirve como forraje (usada en zonas áridas como suplemento de emergencia durante la sequía). En la franja central del país se consume esta cactácea como alimento, también sirve para delimitar terrenos. Destaca como planta medicinal, en años recientes se inició la comercialización de la fibra deshidratada de nopal como

auxiliar en trastornos digestivos y como hipoglucemiante, los artesanos han retomado la imagen de esta planta para decorar sus artesanías y es base de jabones (no reseca la piel), champú, cremas y gel. Países como Chile, Estados Unidos de América y otras naciones europeas muestran interés en esta variedad de productos (Villa y Muñoz-Jiménez, 2011).

El nopal tiene múltiples usos y puede ser aprovechado en diferentes aplicaciones. **Frutal.** Para producción de tuna, fruto del nopal, esta cactácea se cultiva en diversos países: México (67,000 ha), Italia (2,500 ha), Sudáfrica (1,500 ha), Chile (1,000 ha), Colombia (300 ha), Israel (250 ha), Estados Unidos de América (200 ha), entre otros países. **Hortaliza (nopalito).** Con este propósito el nopal se cultiva en México (10,500 ha) y en Estados Unidos de América (150 ha). **Sustrato.** Para producción de grana cochinilla (*Dactylopuscoccus*) insecto que produce el carmín (colorante rojo) el cual tomó importancia a raíz de la prohibición de colorantes artificiales considerados cancerígenos. El nopal para producir grana cochinilla se cultiva en Perú (70,000 ha), Bolivia (1,000 ha), Chile (500 ha), España (300 ha), Sudáfrica (100 ha), Argentina (50 ha) y México (10 ha). **Planta medicinal.** Los nopalitos y las cáscaras de la tuna ácida (Xoconostle) abaten los niveles de azúcar y colesterol en la sangre, por lo que su consumo en fresco, cocinado y procesado industrialmente se ha incrementado en México. **Materia prima.** Para la producción de cosméticos en México y otros países, se fabrican del nopal o de la tuna cosméticos como: champú, acondicionadores, jabones, cremas, lociones, mascarillas, geles, etc. Los cladodios se conservan y transforman mediante tecnologías de procesamiento para producir alimentos tradicionales preparados con base en nopalitos, con base en el fruto se obtienen mermeladas, jugos, néctares, productos deshidratados, jugos concentrados, jarabes y licores (Tabla 4). Con base en los cladodios se producen encurtidos, jugos, mermeladas y productos procesados. Otra propiedad que se atribuye al nopal es como repelente de insectos, no se conocen estudios científicos acerca de esta propiedad, se ha utilizado con éxito un producto patentado en la isla de Roatán, Honduras y se está produciendo en Texas (Abraján, 2008).

A medida que el consumo del nopal se ha incrementado como verdura, fruto, y complemento alimenticio, la oferta y la demanda se han extendido por todo México y otros países como Japón y Estados Unidos de América, que se han convertido en clientes importantes de nopal, debido a las propiedades medicinales que este tiene.

Por lo anterior, el nopal es considerado como un recurso de gran valor que México ha dado al mundo. Estudios realizados por la FAO han demostrado la importancia del nopal del género *Opuntia* como recurso natural y como fuente potencial de ingresos, empleo y nutrientes. Abraján (2008) por su parte menciona que es importante tener información de la composición química del nopal, sus propiedades físicas y su manejo para la producción de alimentos y otros productos industriales.

La especie *Opuntia* es de especial interés para el sector agroindustrial; toda industria busca obtener el máximo provecho de su materia prima. La Tabla 5 muestra alternativas de procesamiento integral obteniendo productos y subproductos de los nopales. Actualmente la tendencia de los profesionales de la salud es buscar un buen aporte de nutrientes y que los alimentos sean benéficos para la salud. De acuerdo a varios estudios nutricionales el nopal *Opuntia* representa un excelente alimento (Anónimo (Repositorio digital) s.f.; Corrales-García, 2010).

Tabla 4. Sectores industriales que pueden obtener beneficios por productos obtenidos a partir de los nopales (Valdez, 2008).

Sector industrial	Beneficio
Agroindustria de alimentos y bebidas	Producción de diversos alimentos, bebidas alcohólicas y no-alcohólicas de tuna y nopalitos para consumo humano.
Agroindustria de alimentos para animales	Producción de suplementos y piensos de cladodios mediante el uso de desechos (cáscaras y semillas) de la industria procesadora de tuna.
Industria farmacéutica	Protectores gástricos de extractos de mucílagos; cápsulas y tabletas de polvo de nopal.
Industria cosmética	Cremas, champús, lociones de cladodios.
Industria de suplementos alimenticios	Fibra y harinas de cladodios.
Industria productora de aditivos naturales	Gomas de cladodios y colorantes de la fruta.
Industria textil	Uso de colorantes naturales como el carmín de cochinilla.

Tabla 5. Algunos productos alimenticios, subproductos y aditivos obtenidos de la tuna y los cladodios (Anónimo (Repositorio Digital), s.f.).

Productos	Subproductos	
Tunas	Cladodios	Tunas y Cladodios
Jugos y néctares	Jugos	Aceite de las semillas
Mermeladas, geles y jaleas	Encurtidos y salmuera	Mucílago de los cladodios
Frutas y láminas deshidratadas	Mermeladas y jaleas	Pigmentos de las cáscaras y frutas
Edulcorante	Harinas	Fibra dietética de los cladodios
Alcoholes, vinos y vinagre	Alcohol	Pasta forraje de la cáscara y las semillas
Fruta enlatada	Confites	
Fruta y pulpa congelada	Salsas	

2.8. Efectos bifuncionales del nopal

El nopal verde (*O. ficus-indica*) se recomienda para una gran variedad de desordenes de tipo circulatorio, cardíaco y digestivo. El nopal tiene un efecto analgésico y anti-inflamatorio, el efecto analgésico del extracto es comparable al generado por el ácido acetil salicílico a dosis de 200 mg/kg, estos extractos han mostrado la capacidad de inhibir el síndrome de dolores (Villa y Muñoz-Jiménez, 2011). Otro efecto es la actividad cicatrizante, la primera preparación tópica formulada con 15% de extractos del cladodio aplicada para curar heridas mostró una rápida regeneración del tejido, factores como la inhibición de la inflamación, estimulación de la migración de los fibroblastos con la formación acelerada de colágeno y una rápida angiogénesis se cree están relacionados (Villa y Muñoz-Jiménez, 2011).

Otro efecto bifuncional es el hipoglucémico, los 18 aminoácidos presentes en el nopal proveen energía y reducen la fatiga ayudando a disminuir el nivel de glucosa en sangre, refuerza al hígado y al páncreas al incrementar la sensibilidad a la insulina que estimula el movimiento de la glucosa en las células del cuerpo donde es usada como energía, regulando así, el nivel de glucosa en sangre (Villa-Muñoz-Jiménez, 2011). En la Tabla 6 se presenta el uso y efecto de las partes del nopal aplicados en la industria farmacéutica. Actualmente en México, productos como harina, polvo, cápsulas y comprimidos del nopal, generalmente son elaborados como complementos alimenticios o como alimentos funcionales (Villa y Muñoz-Jiménez, 2011).

Tabla 6. Propiedades del nopal con aplicación farmacéutica (Zavala, 2012).

Parte de Nopal	Efecto y/o Propiedades
Tuna y cladodios	Anti-cancerígeno. Inhibe la proliferación de líneas de células cancerígenas de cuello uterino, ovario, vejiga y colon
Tuna y cladodios	Antioxidante
Tuna, cladodios y semillas	Anti- diabético
Tuna, cladodios y tallo	Anti- inflamatorio
Cladodios	Anti- obesidad
Cladodios y tuna	Reducción de niveles de colesterol
Tallo	Anti- viral
Cladodios, tuna y flor	Alergias

Los productos derivados del nopal para el control de la diabetes, colesterol, afecciones gastrointestinales y sobrepeso, se han desarrollado debido a varios factores, en primer lugar a la herbolaria tradicional de Mesoamérica, donde al nopal se le han atribuido propiedades curativas, en segundo lugar por los resultados de estudios médico-científicos, que han demostrado efectos hipoglucemiantes y colesterol en sangre (Mateos-Aparicio, 2008).

2.9. Fibra dietética (FD)

La American Association of Cereal Chemists (AACC, 2001), define a la FD como la parte comestible de las plantas o hidratos de carbono análogos que son resistentes a la digestión y absorción en el intestino delgado, con fermentación completa o parcial en el intestino grueso. La FD incluye polisacáridos, oligosacáridos, lignina y sustancias asociadas de la planta.

La FD protege de ciertas enfermedades y promueven efectos benéficos fisiológicos como laxante, disminuye los niveles de colesterol y/o glucosa en sangre y promueve compuestos químicos naturales, antioxidantes, vitaminas y micro-nutrientes que ayudan a una buena digestión y a mantener un buen estado de salud. De acuerdo a la American Dietetic Association, el cuerpo humano

necesita fibra para su buen funcionamiento, y recomienda consumir entre 20-35g de fibra al día a partir de diferentes fuentes alimentarias (frutas, verduras, legumbres y cereales) (Balanza, 2008).

2.9.1. Compuestos que conforman la fibra dietética

Los compuestos que forman parte de la FD se localizan en la pared de las células vegetales e intracelularmente en los plásmidos, vacuolas o en el citoplasma (Figura 2). El origen principal de la FD es la pared celular de los vegetales que consiste en una serie de polisacáridos a menudo asociados y/o sustituidos con proteínas y compuestos fenólicos en algunas células, junto con el polímero fenólico lignina. Esto tiene una importancia evidente ya que sus compuestos serán los constituyentes de la FD y además las estructuras y enlaces que presenta determinarán los efectos fisiológicos (Mateos-Aparicio, 2008).

La pared celular de los vegetales presenta una serie de funciones esenciales tales como conferir rigidez a la célula, protección frente al medio ambiente, evitar la deshidratación, aislar y comunicar una célula con otra (Mateos-Aparicio, 2008).

La célula viva secreta su pared celular y en esta se pueden distinguir tres partes:

- a) Pared primaria:** Formada esencialmente por hemicelulosa y algo de celulosa,
- b) Lámina media:** Es la capa más externa, está formada principalmente por sustancias pécticas
- c) Pared secundaria:** Aparece cuando la célula envejece cuando termina su crecimiento, está formada por celulosa, hemicelulosa, sustancias pécticas y lignina (Mateos-Aparicio, 2008).

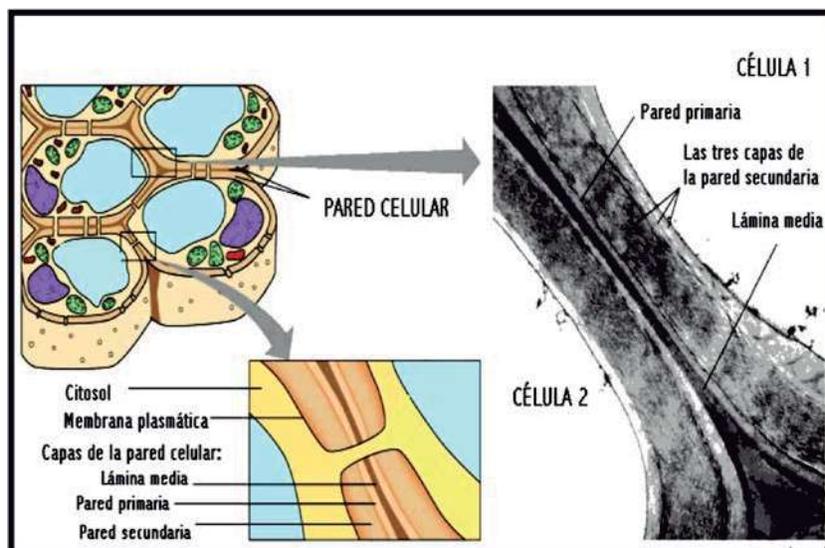


Figura 2. Estructura y partes de la pared celular, origen fundamental de la fibra alimentaria (Mateos-Aparicio, 2008).

La FD es una serie de compuestos químicos provenientes de alimentos vegetales que no pueden ser degradados por las enzimas digestivas del ser humano y que se encuentran en la pared celular fundamentalmente (Mateos-Aparicio, 2008). En la Tabla 7 se muestran los componentes de la FD.

Tabla 7. Polisacáridos de la pared celular de la fibra dietética (Sequeira, 2005).

Categoría general	Clasificación estructural
Celulosa	β -D-glucanos (uniones en C4) Sustancias pécticas Galacturonas y ramnogalacturonas, arabinanos, arabinosgalactanas y arabinogalactanas
Hemicelulosas Xilanos	(incluyen arabinosilanos y cadenas con grupos 4-O-metil) y glucuronosilanos β -D-glucanos (uniones en C3 y C4), Xiloglucanos (D-glucanos unidos por C4, con cadenas laterales adjuntas)
Otros polisacáridos	ArabinogalactanasII (1) Glucuronomannanas (1) Arabinogalactanas del tipo I son esencialmente lineales y contienen cadenas de β -D-galactanascon uniones en C4, mientras que las de tipo II contienen cadenas ramificadas de β -D-galactanas con uniones en C3 y C6.

2.10. Propiedades y usos de la fibra dietética

La FD al ser ingerida avanza por el intestino grueso donde es fermentada parcial o totalmente por las bacterias colónicas. Durante la fermentación se forman diversos subproductos, gases y ácidos grasos de cadena corta. Los ácidos grasos de cadena corta que son absorbidos en el intestino grueso hacia el torrente sanguíneo (Mateos-Aparicio, 2008).

La FD está formada por partículas higroscópicas que suavizan el bolo fecal, aumentan su volumen, facilitan el tránsito por el intestino y la defecación. Esto reduce o evita el estreñimiento, en adultos reduce el riesgo de divertículos en colon (Silva, 2007).

2.11. Propiedades físico-químicas de la fibra dietética

Dentro de las propiedades físico-química de la FD destacan: el color (importante al adicionarse en alimentos que requieren resaltar su color o enmascararlo), el tamaño de partícula es importante por su granulometría (se recomienda tamaño de 60 μm) y el tipo de alimento en el que se incorpore como fibra perceptible. El color y el tamaño de partícula son propiedades que permiten seleccionar la FD adecuada de acuerdo a las funciones que se requieran en los sistemas alimenticios (Priego, 2007). Otra propiedad es la capacidad de absorción de agua, cuando los componentes de la FD absorben suficiente cantidad de agua forman un gel fuerte, al interior quedan atrapadas sustancias como azúcares, lípidos y algunos iones como calcio, zinc y cobre, que posteriormente son eliminadas por las heces. La capacidad de absorción de aceite es otra propiedad de la fibra, la capacidad de la fibra para enlazar aceite es determinada por la porosidad de la estructura de la misma FD más que por la composición química de la misma. Esta característica es importante porque determina la cantidad de triglicéridos y colesterol que la fibra pueda encapsular en el tracto gastrointestinal, impidiendo su absorción y facilitando la expulsión de los mismos componentes a través heces (Martínez-Flores y Figueroa, 2008).

2.12. Fuentes de fibra dietética en los alimentos

En los alimentos se encuentran diferentes fracciones o componentes de la FD. Uno de sus componentes es la celulosa, se encuentra principalmente en la cubierta de los granos de cereales (salvado), en los tegumentos de las legumbres y en menor concentración en diversas verduras y hortalizas (acelga, col, zanahoria y lechuga). La hemicelulosa se encuentra en los mismos alimentos que la celulosa, así como en distintas frutas (Silva, 2007).

La lignina forma la parte más fibrosa de distintas verduras y hortalizas, también de ciertas frutas como la piña. Las pectinas se encuentran en los nopales y en muchas frutas (manzanas, naranjas y limones), en los cítricos abunda en la capa blanquecina existente entre la cáscara y el interior comestible. Las pectinas tienen amplia aplicación a nivel industrial por su capacidad de gelificación. Las gomas y mucílagos se encuentran fundamentalmente en frutas, legumbres, cebada, avena y en los nopales. Por lo tanto, los componentes que constituyen la fibra se pueden utilizar para adicionar a otros alimentos con el fin de mejorar sus características funcionales (Silva, 2007).



Figura 3. Alimentos ricos en fibra dietética (Silva, 2007).

2.13. Clasificación de la fibra dietética

La FD se divide en fibra soluble (FS) y en fibra insoluble (FI), de acuerdo a la solubilidad en agua y su fermentación. Ambas fibras tienen características químicas diferentes y muestran efectos fisiológicos distintos (Martínez-Flores y Figueroa, 2008). La FS ejerce actividades metabólicas, contiene en mayor porcentaje polisacáridos no-celulósicos tales como pectina, gomas y mucílago (Silva, 2007).

La FI está compuesta por carbohidratos no digeribles, que no se absorben en el intestino delgado y por lo tanto no proporcionan calorías en la dieta. Los componentes de la FI son: celulosa, hemicelulosa y lignina (Anónimo, 2009).

2.13.1. Fibra soluble

Los componentes de la FS son aquellos fermentados por la microflora colónica humana, los productos de la fermentación son ácidos grasos de cadena corta (AGCC), como el acético, propiónico y butírico, (Martínez-Flores y Figueroa, 2008). La funcionalidad de la FS en el tubo digestivo está relacionada por su mayor capacidad para retener agua y formar geles, retarda la digestión y la absorción de nutrientes desde el estómago y el intestino. La FS comprende gomas, mucílago, pectinas y algunas hemicelulosas; estos componentes se fermentan rápidamente por la acción de bacterias colónicas. La fermentación que efectúan las bacterias en el colón ayuda a mantener su estructura y un adecuado funcionamiento (Silva, 2007).

2.13.2. Fibra insoluble

La FI está compuesta principalmente por celulosa, lignina y algunas hemicelulosa; estos componentes son poco fermentados por la acción de las bacterias del colón, no son viscosos (poca capacidad de formar de geles) y se excretan prácticamente íntegros en las heces. La FI promueve la función intestinal normal mediante la absorción del agua y acelera el paso de los

alimentos a través del estómago y los intestinos, agrega peso al volumen de la masa fecal, aumentando la velocidad del tránsito de las heces a través del colon y promueve la regularidad, además de reducir el estreñimiento (Silva, 2007).

La FI ayuda a prevenir el estreñimiento al incrementar el peso de las heces y reduce la duración del tránsito intestinal, este efecto es aún mayor si el consumo de fibra se acompaña de una ingesta de agua. Los AGCC producidos cuando la FD se fermenta por la acción de las bacterias intestinales son fuente importante de energía para las células del colon y pueden inhibir el crecimiento y proliferación de células cancerígenas en el intestino, al mejorar la función intestinal la fibra puede reducir el riesgo de enfermedades y trastornos como la enfermedad diverticular (Rayas, s.f.).

2.13.3. Componentes de la fibra insoluble

2.13.3.1. Celulosa

La celulosa es el principal componente de la pared celular de las plantas se trata de un polisacárido lineal no ramificado formado por unidades de glucosa unidas por enlaces glicosídico β -D-(1,4) (Martínez-Flores y Figueroa, 2008). Los grupos hidroxilo de las unidades de glucosa favorecen la formación de puentes de hidrógeno. Lo que conduce a la formación de microfibrillas que forman una estructura cristalina fuerte, densa y estable (Figura 4). Esta disposición estructural junto a su composición química le confiere un carácter insoluble en agua (Mateos-Aparicio, 2008).

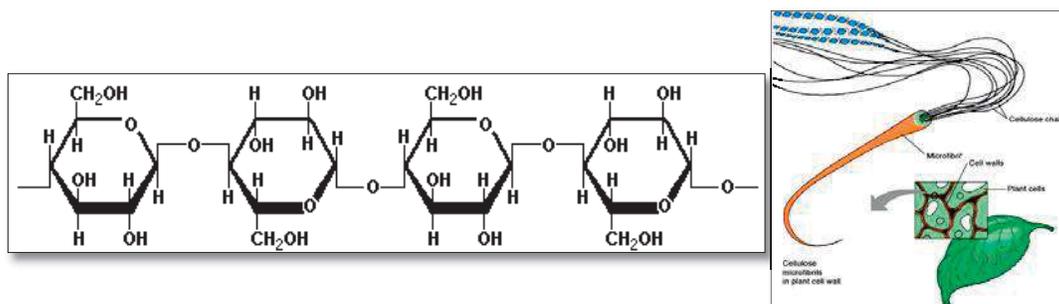


Figura 4. Estructura de la celulosa dentro de la pared celular (Mateos-Aparicio, 2008).

2.13.3.2. Hemicelulosa

La hemicelulosa está compuesta de polisacáridos cortos y ramificados, en general por pentosas y hexosas (Figura 5), esta ampliamente distribuida en las plantas, incluye sustancias que rellenan espacios entre las fibrillas de celulosa de las paredes celulares vegetales por lo que actúan como material de soporte para mantener las células juntas. La hemicelulosa tiene un peso molecular menor que la celulosa, contiene azúcares constitutivos de la xilosa, arabinosa, galactosa, manosa, glucosa, ácido glucurónico y ácido galacturónico (Sequeira, 2005). Los grupos de polisacáridos varían en proporciones en los vegetales según la especie, el órgano o tejido y el estado de madurez (López-Palacios, 2011).

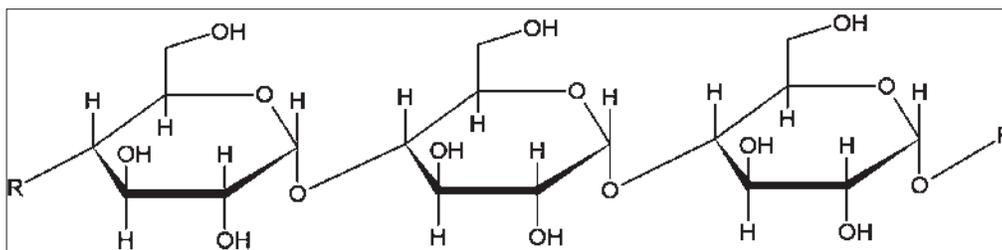


Figura 5. Estructura básica de hemicelulosa.

2.13.3.3. Lignina

La lignina es un polímero de alcoholes aromáticos que se encuentra en las paredes celulares de las plantas (Figura 6), su cantidad se incrementa con la madurez de la planta, abunda en el brócoli, en el tallo de los espárragos y en las células escleróticas de las peras. Ésta no se digiere ni se absorbe y tampoco es atacada por la microflora bacteriana del colon; una de las propiedades más interesantes es su capacidad para unirse a los ácidos biliares y al colesterol retrasando o disminuyendo su absorción en el intestino delgado; es un componente menor ya que muchas verduras, hortalizas y frutas contienen un 0.3% de lignina, en especial en estado de maduración (Molina y Martín, 2007).

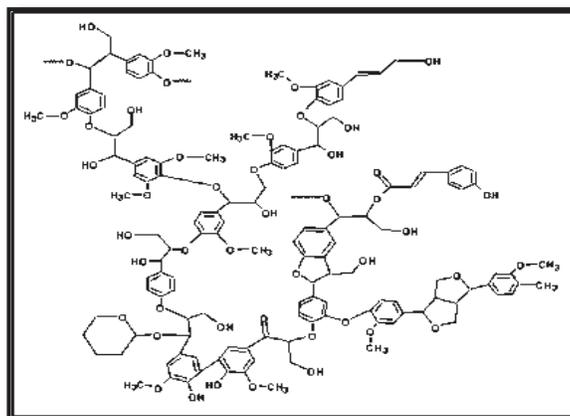


Figura 6. Estructura de la lignina.

2.14. Funciones fisiológicas y beneficios de la fibra insoluble

Dentro de las funciones fisiológicas y beneficios de la FI se reconocen: **El volumen de las heces:** por su presencia y su capacidad de retención de agua, la fibra aumenta el volumen del contenido intestinal. El aumento en el volumen del contenido colónico eleva su peristaltismo, lo que facilita la función evacuatoria de las heces fecales (Carballo y González, s.f.). **El control de la obesidad:** la FI absorbe agua y acelera el paso de los alimentos por el tracto digestivo impidiendo o retrasando la absorción de azúcares, lo que provoca una sensación de saciedad y disminuye la ingesta de alimento, además, ayuda a regular el movimiento intestinal. **La limpieza del colon:** las FI ayudan a diluir la concentración de cancerígenos en el colon, lo cual ayuda a prevenir en cierta medida la aparición de este padecimiento (Pincheira y Ritter, s.f.). **El estreñimiento:** El consumo de fibra disminuye el estreñimiento leve y moderado debido al incremento de la masa fecal. En la Tabla 8 se muestra los componentes y las acciones en el organismo.

La FI poco fermentable es la que promueve el aumento en la masa fecal debido a los restos de fibra no digeridos y a su capacidad para retener agua. **La velocidad del tránsito intestinal:** Los componentes no hidrosolubles aumentan la velocidad del tránsito intestinal, las fibras hidrosolubles (pectina y goma guar, entre otras) tienen la propiedad de disminuir la velocidad de absorción intestinal

de la glucosa (el vaciamiento gástrico resulta más lento). Como consecuencia de todas las funciones y beneficios fisiológicos de la fibra sobre el aparato digestivo puede tener diversos efectos como la sensación de saciedad que provoca una menor ingesta de alimentos, la regulación intestinal, la disminución del tiempo de tránsito intestinal de los alimentos, el control del estreñimiento y aumento de la excreción y también el retraso de la absorción de glucosa con un menor índice glicémico (Carballo y González, s.f.).

Tabla 8. Acciones en el organismo de los diferentes componentes de la FI (Carballo y González, s.f.).

Componente	Acciones en el organismo
Celulosa	Capacidad de retención de agua, reducción de la presión colónica y reducción del tiempo de tránsito intestinal.
Hemicelulosa	Capacidad de retención de agua, incremento de la masa fecal, reducción de la presión colónica, reducción del tiempo de tránsito intestinal y posibilidad de retener ácidos biliares.
Lignina	Capacidad de retención de agua ligada a minerales, aumento de excreción y la posibilidad de incrementar la defecación.

En general, cualquier fibra con alta proporción de FI y elevada capacidad de retención de agua mejora el funcionamiento gastrointestinal, esa capacidad de retención de agua provoca un incremento de la cantidad de heces (Molina y Martin, 2007).

2.15. Fuentes de fibra insoluble

La fuente de FI más común se encuentra en productos como cereales comerciales y grano entero, sin embargo, otras buenas fuentes de FI están presentes en los vegetales y los frutos secos (nuez, almendra, avellana, etc.) (AACC, 2000). En la Tabla 9 se presentan los alimentos ricos en FI.

Tabla 9. Alimentos fuente de FI (AACC, 2000).

Productos de grano	Legumbres	Verduras
Pan integral		Zanahorias
Fideos integrales		Pepinos
Arroz integral	Porotos	Apio
Cereales integrales para el desayuno	Lentejas	Semillas
Salvado de trigo		Tomates

3. JUSTIFICACIÓN

El nopal forma parte de la dieta en nuestro país por su fácil adquisición y bajo costo. Se han descubierto beneficios y características importantes del nopal, resultando útil para el ser humano por sus propiedades nutricionales y su aporte de FD (FS y FI). En la literatura no existen reportes sobre la caracterización química y físico-química de la FI del nopal, particularmente de aquella fracción del nopal que queda una vez que se le extrae el mucílago. Es importante estudiar las propiedades de la FI del nopal para determinar su valor fisiológico o funcional, además de los beneficios que se pueden obtener debido al consumo de la FI. La preparación de fibras a partir de subproductos y residuos de origen vegetal se presenta como una alternativa para la preparación de alimentos funcionales y formas farmacéuticas, ofreciendo así a la población mexicana una oportunidad de consumir diario FI. Actualmente existe poco consumo de alimentos con alto contenido de FD y sí un consumo elevado de alimentos con alto contenido en carbohidratos y grasas saturadas, esto es preocupante debido a los problemas de salud en el mundo derivados de la obesidad y problemas asociados a ella como son la diabetes, las enfermedades cardiovasculares y el cáncer de colon.

Estos antecedentes han dado la pauta para la búsqueda de fuentes alternas ricas en FD como el nopal que puedan ser usados como suplemento en los alimentos para ofrecer beneficios a la salud del ser humano y además que estos productos sean de alta calidad, económicos y naturales. En este trabajo se realizó la caracterización química y físico-química del remanente de la extracción de mucílago de seis especies de nopal *Opuntia* originarias del estado de Michoacán: la especie comercial *O. ficus-indica* y cinco especies silvestres *O. tomentosa*, *O. streptacantha*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle* y *O. atropes*, con el objetivo del manejo integral del nopal.

4. HIPÓTESIS

Las especies silvestres de nopal *O. tomentosa*, *O. hyptiacantha*, *O. streptacantha*, *O. joconostle* y *O. atropes* presentan diferencias en la composición química y físico-química de la fracción remanente de la extracción del mucílago respecto a la especie comercial *O. ficus-indica*.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Realizar la caracterización química y físico-química del remanente de la extracción del mucílago de cinco especies silvestres de *Opuntia* (*O. tomentosa*, *O. hyptiacantha*, *O. streptacantha*, *O. joconostle*, *O. atropes*) y la especie comercial *O. ficus-indica*.

5.2. Objetivos específicos

- a) Colectar cladodios de seis especies de *Opuntia* originarias del estado de Michoacán.
- b) Obtener el residuo sólido remanente de la extracción de mucílago de las seis especies de *Opuntia*.
- c) Determinar la composición química y físico-química del residuo sólido de las especies de *Opuntia*.
- d) Determinar las concentraciones de minerales (Ca, Mg, Na, K, Fe, Cu, Ni y Zn) del RS de las seis especies de *Opuntia* mediante espectrofotometría de absorción atómica.
- e) Analizar la estructura del RS de las seis especies de *Opuntia* mediante microscopía electrónica de barrido (MEB).

6. MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron los materiales y equipos necesarios para la obtención y procesamiento del residuo sólido.

6.1. Materia prima

Se recolectaron seis especies de *Opuntia* (*O. tomentosa*, *O. streptacantha*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. atropes* y *O. ficus-indica*). Las especies *O. tomentosa* y *O. atropes* se recolectaron en el camino rumbo al rancho las Flores en Morelia, Michoacán y las especies *O. streptacantha*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle* y *O. ficus-indica* fueron recolectadas en la localidad en Cuto del Porvenir, Morelia, Michoacán. La colecta se realizó en octubre del año 2011, para ello se utilizó equipo adecuado (guantes de carnaza, cuchillo, tenazas). Se seleccionaron pencas de 2 a 3 años de edad, sanos y libres de plagas. En la Figura 7 se muestran las diferentes especies del genero *Opuntia*.

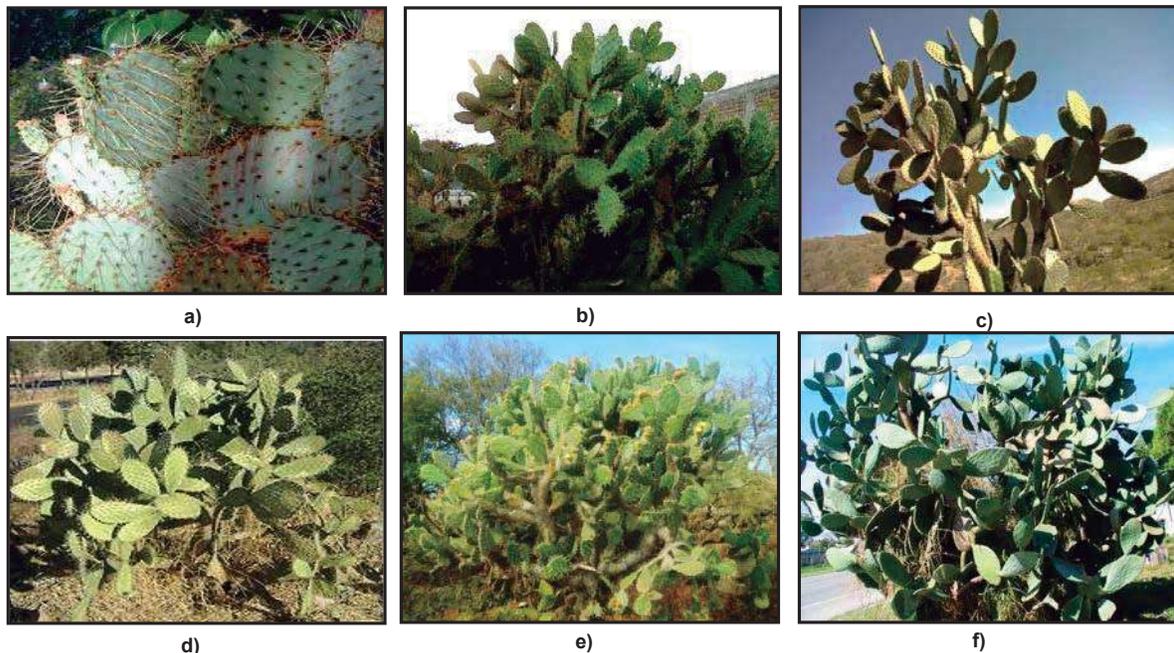


Figura 7. Seis especies de *Opuntia* Originarias del estado de Michoacán a) *O. joconostle*, b) *O. tomentosa*, c) *O. streptacantha*, d) *O. hyptiacantha*, e) *O. atropes*, f) *O. ficus-indica*

6.2. Material y equipo

- Balanza Analítica (Digital Sartorius iso 9001. Modelo: BL 1205)
- Balanza granataria (Ohaus, modelo tripe Beam balance)
- Ollas de metal
- Parrillas de gas
- Termómetro de 100°C
- Espátulas
- Centrifuga (Centrificiente, CRM Globe)
- Deshidratador solar
- Licuadora (Osterizer)
- Bolsas de vacío
- Desecador (Nalgene, 150MM)
- Estufa de secado Digital (Felisa, Fe-29ID)
- Mufia (Felisa, FE-260)
- Bomba de vacío (Siemens, IRF3052-4YC31)
- Extractor Soxhlet (Tauro)
- Refrigerador (General electric, turbo plus coolingsisyem)
- Vortex
- Tamices (Daigger, U.S. estandar del no. 40, 60, 80 ,100, 120 y 140µm)
- Colorímetro Hunter lab
- Potenciómetro
- Espectrofotómetro de absorción atómica (Perkin Elmer, AAnalyst 200)
- Microscopia electronica de barrido JMS-6400 Scaning Microscope, Marca: JEOL.

6.3. Metodología para la extracción de mucílago

Para la obtención de FI fue necesario en primer término hacer la extracción de mucílago de las pencas de las seis especies de *Opuntia*, para ello, se procedió a su lavado con agua destilada, posteriormente se pelaron manualmente con cuchillo para eliminar las espinas, se pesaron cada penca y se cortaron en cuadros de aproximadamente 3 cm. La extracción de mucílago se llevó a cabo en tres etapas: 1) Molienda con base en la relación nopal/agua; 2) Tiempo de calentamiento y 3) Tiempo de centrifugación (Figuras 8 y 9).



Figura 8. Pelado de nopal.



Figura 9. Calentamiento nopal/agua.

6.3.1. Relación nopal/agua

El análisis de relación nopal/agua se llevó a cabo con la finalidad de extraer la mayor cantidad posible de mucílago para obtener la fracción residual denominado RS.

Considerando lo anterior se cortaron 4kg de cladodios de cada especie de *Opuntia* a los que se les adicionó agua en una relación 1:5 agua/nopal, la mezcla se licuó en una licuadora (Osterizer). Posteriormente cada licuado se llevó a calentamiento por 2 h a 83°C, se dejó enfriar y se centrifugó a 3500 rpm por 15 min; el sobrenadante (mucílago) se decantó y se separó el precipitado (RS).

6.4. Metodología para la deshidratación del RS de nopal

El precipitado obtenido tras la extracción de mucílago es considerado como el RS del nopal, para facilitar su manejo, evitar el deterioro de las muestras y optimizar la conservación, se redujo la cantidad de agua del precipitado, para este proceso se utilizó un deshidratador solar (Figura 10). El RS húmedo se colocó en el deshidratador (114g en cada charola) a una temperatura entre 49 y 55°C durante 6 h. Una vez deshidratada, se pesó y se trituró, posteriormente se tamizó con malla de 250 μm (Figura 11) obteniendo un polvo fino, el cual fue utilizado para su análisis bromatológico y físico-químico.



Figura 10. RS deshidratado.



Figura 11. Tamiz con malla de 250 μm (No. 60) del RS.

6.4.1. Conservación

El RS deshidratado y tamizado se empacó al vacío para una mejor conservación y evitar el crecimiento de microorganismos, posteriormente se conservaron en un lugar seco y oscuro.



Figura12. RS empacado al vacío.

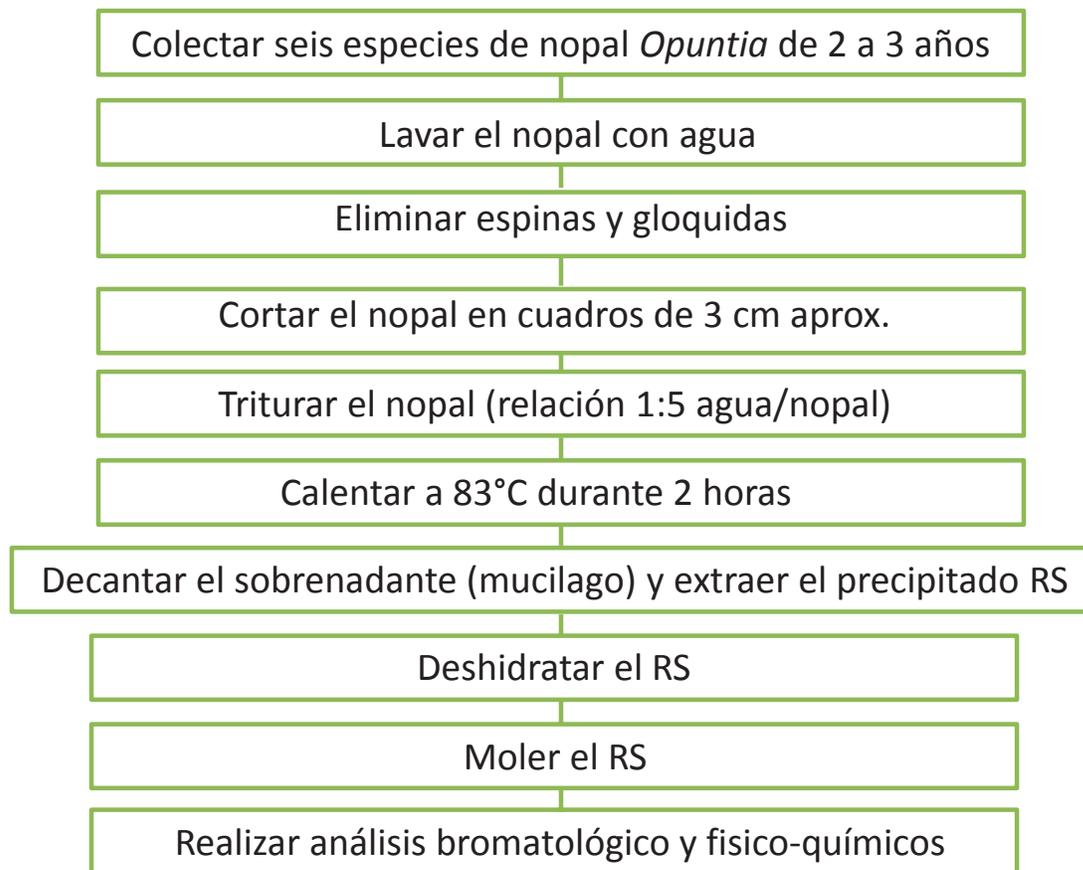


Figura 13. Pasos para la obtención de RS.

6.5. Metodología para el análisis de composición química del RS de nopal

En este apartado se describen los métodos de análisis a los que fueron sometidos los residuos que contienen la FI de las especies de *Opuntia*; el análisis bromatológico abarcó el contenido de proteína, humedad, cenizas, extracto etéreo, carbohidratos totales, fibra dietética total soluble e insoluble.

Se determinaron la humedad, proteínas, cenizas, fibra dietética total, lípidos y los hidratos de carbono (calculados por diferencia de 100 menos los componentes anteriores).

6.5.1. Determinación de humedad

La determinación de humedad se basa en la pérdida de peso del alimento al calentarlo a 105 °C, lo cual se determinó mediante el método oficial de (934.01, AACC 2000), basado en secar 3 g de muestra durante 4 h a 105 °C

Cálculos:

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

Donde:

P_m= peso de la cápsula y la muestra húmeda en g.

P_s= peso de la cápsula y la muestra seca en g.

M= peso de la muestra húmeda en g.

6.5.2. Determinación de cenizas

Se realizó el análisis de cenizas para determinar los elementos minerales que forman la parte de los compuestos orgánicos e inorgánicos, se destruyó la materia orgánica mediante incineración en mufla a 560 °C durante 3 h y se determinaron las cenizas por el método 44.19 de la AACC (2000).

Cálculos:

$$\% \text{ Cenizas} = (P_{cc} - P_{sc}) / M \times 100$$

Donde:

P_{cc} = peso de crisol con cenizas

P_{sc} = peso de crisol a peso constante

M = muestra

6.5.3. Determinación de fibra dietética

De acuerdo al método enzimático-gravimétrico (Prosky *et al.*, 1988) para la digestión de muestras de fibra insoluble, son utilizadas la α -amilasa, la proteasa y la amiloglucosidasa para remover proteína y almidón de la muestra, este permite determinar por separado FS e FI.

6.5.3.1. Digestión

- 1.- Pesar 1g de muestra y colocarlo en un matraz Erlenmeyer de 250 ml.
- 2.- Agregar 50 ml de solución buffer de fosfato 0.08M pH de 6.
- 3.- Agregar 0.1ml de la enzima α amilasa a una temperatura de 95°C y agitar durante 30 min.
- 4.- Dejar enfriar a temperatura ambiente.
- 5.- Ajustar a un pH de 7.5 con NaOH (0.275 N).
- 6.- Agregar 100 μ l de la enzima proteasa y colocar en baño maría a 60°C y agitar durante 30 min.
- 7.- Atemperar y ajustar a pH de 4.5 con HCl (0.325 N).
- 8.- Agregar 100 μ l de enzima amiloglucosidasa, colocar en baño maría a una temperatura de 60°C y agitar durante 30 min.

6.5.3.2. Filtrado

- 1.- Cortar papel filtro y colocarlo en estufa a 105°C hasta peso constante.
- 2.- Filtrar la muestra y posteriormente lavar con 3 volúmenes de 10 ml de agua destilada obteniendo la fase sólida (FI) y líquida (FS).
- 3.- La fase sólida (FI) se lavó con 30 ml de alcohol al 78%, al 95% y acetona.
- 4.- Secar el papel filtro con la FI durante 1h a 105°C, atemperar y pesar.
- 5.- La FS se colocó en un vaso de precipitados de 500 ml y se llevó a 100 ml con agua destilada, posteriormente se adicionaron 400 ml de etanol al 95% a 60°C, finalmente se dejó precipitar durante 24 h y se filtró.
- 6.- La fase líquida (FS) se lavó con 30 ml de alcohol al 78%, 95% y acetona.
- 7.- Secar el papel filtro con la fibra soluble durante 1h a 105°C, atemperar y pesar.

La FD total se calcula considerando el peso de residuo.

Cálculos:

$$FD = (\text{papel filtro inicial} - \text{papel filtro con muestra}) - \text{peso de cenizas}$$

6.5.4. Determinación de lípidos (extracto etéreo)

Para la determinación de lípidos se utilizó el método oficial de la (AACC, 2000). El análisis se realizó por triplicado y consistió en pesar 3g de muestra por triplicado, se montaron en el equipo Soxhlet, se adicionaron aproximadamente 70 ml de hexano a cada matraz balón, se abrió la llave del agua para evitar calentamiento en el equipo, se encendieron las parrillas regulando la temperatura a 65°C. La extracción se efectuó durante 5 h. Posteriormente, se extrajo el hexano sucio, se sacaron los matraces y se colocaron a 105 °C en estufa

durante 1 h, el procedimiento culmino dejando atemperar cada matraz y finalmente tomar su peso.

Cálculos:

$$\% \text{ Extracto etéreo} = (PG - Ps / M) \times 100$$

Donde:

PG = peso en g del matraz con grasa

Ps = peso en g del matraz sin grasa

M = peso en g de la muestra

6.5.5. Determinación de proteínas

La determinación de proteínas se basa en la cuantificación del nitrógeno total de la muestra, la cual se multiplica por el factor correspondiente.

Para determinar el nitrógeno total se utilizó el método macro Kjeldahl que consistió en una combustión en un medio ácido, donde el nitrógeno proteico y no proteico pasan a nitrógeno y este se convierte en amoníaco, el cual, se destila con una solución ácida hasta obtener un volumen de 200 ml para titular con hidróxido de sodio (AACC,2000).

Tabla 10. Determinación de proteína cruda por el método macro Kjeldhal.

	HgO	Na ₂ SO ₄	Muestra	H ₂ SO ₄
Muestra	0.07g	10g	2g	25ml
Blanco	0.07g	10g	-----	25ml

6.5.5.1. Digestión

1.- Se introdujo el cartucho en el matraz con muestra, HgO, Na₂SO₄, se colocaron los matraces en las parrillas del digestor Kjeldhal, se agregaron 25 ml de H₂SO₄, se encendieron las parrillas y se dejaron hasta aclarar la solución, posteriormente

se dejaron ebulir durante 30 minutos y finalmente se dejaron enfriar hasta formación de sales.

6.5.5.2. Destilación

- 1.- Disolver las sales obtenidas en la digestión 220 ml de agua destilada.
- 2.- Agregar granallas de zinc.
- 3.- Adicionar 25 ml de solución de Na_2SO_4 al 8% con la finalidad de precipitar el mercurio.
- 4.- Añadir 75 ml de NaOH al 45%.
- 5.- Colocar en la trampa del destilador un matraz Erlenmeyer de 250 ml con 50 ml H_2SO_4 (0.1 N) y adicionar 4 gotas de rojo de metilo.
- 6.- Calentar para liberar amoníaco después de la destilación hasta obtener un volumen de 200 ml en la trampa.
- 7.- Titular la solución ácida obtenida con NaOH al 0.1N, hasta obtener una coloración amarilla.

Cálculos:

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

Donde:

- V_{am} = Volumen de ácido de la muestra
 V_{bm} = Volumen de la base de la muestra
 N_{am} = Normalidad ácida de la muestra
 N_{bm} = Normalidad básica de la muestra
 V_{ab} = Volumen ácido del blanco
 V_{bb} = Volumen base del blanco
 N_{ab} = Normalidad de ácido del blanco
 N_{bb} = Normalidad base del blanco

6.5.6. Determinación de carbohidratos totales

La determinación de carbohidratos totales se obtuvo mediante el cálculo de la diferencia de 100% menos el total obtenido de los demás parámetros bromatológicos.

Cálculos:

$$\text{Carbohidratos totales} = [100\% - (\text{Humedad}\% + \text{Proteínas}\% + \text{Cenizas}\% + \text{Lípidos}\% + \text{Fibra})]$$

6.5.7. Determinación de elementos mediante espectrofotometría de absorción atómica

La determinación de los elementos mediante espectrofotometría de absorción atómica se basó en el método de digestión ácida (AY-5) para análisis de plantas. Se tomó 1g del RS de nopal seco y molido, se colocó en un vaso de precipitados, se dejó reposar durante la noche con 8 ml de HNO₃ de alta pureza, posteriormente se calentó en una parrilla de calentamiento a una temperatura de 90±5 °C y se observó la producción de humos café (gases de NO₂), después, se dejó enfriar el vaso y se añadió 2 ml de H₂O₂ al 30%, se calentó hasta reducir el volumen a 2 ml aproximadamente, la muestra se dejó enfriar y se transfirió a un matraz aforado de 50 ml (filtrar la muestra si es necesario) y se diluyó a volumen con agua desionizada. Para determinar las concentraciones de los elementos (Ca, Mg, Na, K, Fe, Cu, Ni y Zn), se tomaron en consideración las condiciones recomendadas para cada elemento en el equipo de absorción atómica. (AACC, 2000)

6.6. Metodología para análisis de la composición físico-química del RS de nopal

Para la caracterización físico-química de FI de las seis especies de *Opuntia*, se determinaron el tamaño de partícula, la capacidad de absorción de agua y aceite, acidez, colorimetría, Ca, Mg, Na, K, Fe, Cu, Zn y microscopia electrónica de barrido para conocer la morfología de la FI.

6.6.1. Tamaño y diámetro de partícula

Se emplearon 100 g de muestra, la cual se hizo pasar por una serie de tamices con número de malla de 20, 40, 60, 80, 100, 120 y 140, acoplados entre sí y montados en un rotor en movimiento por 30 min. Las partículas retenidas en cada malla fueron pesadas y se determinó el diámetro medio de partícula (DMP) utilizando la siguiente fórmula:

Cálculos:

$$\text{DMP} = (P_1D_1 + P_2D_2 + P_3D_3 + P_4D_4 + P_5D_5 + P_6D_6 + P_7D_7)/MT$$

Donde:

P_{1-7} = peso de las partículas retenidas en cada tamiz

D_{1-7} = diámetro de malla de cada tamiz

MT = peso de la muestra total

6.6.2. Capacidad de absorción de agua (CAA) y aceite (CAAC)

Para determinar esta capacidad se utilizó la metodología establecida por peso en tubo falcón, se agregó 1g de muestra del RS con 10 ml de agua, se dejó reposar durante 30 min; agitando cada 30 s, posteriormente se centrifugó a 2500 rpm durante 10 min. El sobrenadante se desechó y se pesó el tubo con la muestra. El

valor de CAA se determinó por el método de (Anderson *et al.*, 1969) con la siguiente fórmula:

$$\text{CAA} = (\text{peso del tubo} + \text{sedimento}) - (\text{peso del tubo} + 1\text{g de muestra})$$

Para la determinación de la capacidad de absorción de aceite se utilizó la misma metodología que para la capacidad de absorción de agua, sustituyendo el agua por aceite.

Cálculos:

$$\text{CAAC} = (\text{peso del tubo} + \text{sedimento}) - (\text{peso del tubo} + 1\text{g de muestra})$$

6.6.3. Determinación colorimétrica

Para esta determinación se utilizó el colorímetro (Color Tec-PCM, Cole Palmer USA), se realizó para las seis especies del género *Opuntia*; la técnica se fundamenta en la colorimetría de triestímulo L^* , a^* y b^* . Los resultados se expresan como atributos del color, que puede medirse utilizando un colorímetro, con este equipo se cuantifica el color de cualquier superficie a través del estudio y comparación de los atributos cromáticos L^* , a^* y b^* sugeridos por la CIE (Comisión internacional sobre iluminación) mediante mediciones de reflexión directa, así como los planos de las coordenadas cromáticas: a^* y b^* . La variable L^* es una medida de luminosidad que se obtiene directamente del equipo y permite distinguir un color claro de uno oscuro; se da un intervalo de 0 a 100, el cero representa al negro y el 100 al blanco. Las lecturas de a^* y b^* son variables que dependen de un estándar de calibración, estas coordenadas localizan el color sobre una coordenada rectangular perpendicular al eje de L^* , el color hacia el origen a^*-0 , b^*-0 es cromático gris, a^* es un componente de rojo-verde y b^* es el componente de amarillo-azul (Rivas, 2010; Montesinos, 2003).

Una medición más apropiada del color puede ser obtenida a partir del cálculo del ángulo hue (h^*) [$h^* = \tan^{-1}(b/a)$], el cual el atributo de una sensación visual según el cuál una región se asemeja a uno de los colores percibidos: rojo, amarillo,

verde y azul o a una combinación de dos de ellos (amarillo+rojo=naranja, etc.). La cromaticidad o croma (C^*), este último es análogo a la intensidad o saturación del color. Por lo que a^* y b^* son coordenadas que directamente reflejan el hue y el croma (Rodríguez-Félix *et al.*, 2007).

El cambio total de color (ΔE), el ángulo hue (matiz) y el croma (saturación o pureza del color) fueron calculados de la siguiente manera (Hutchings, 1999):

$$\Delta E = [(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2]^{1/2}$$

$$Hue = [\tan^{-1}(b/a)]$$

$$Croma = [(a^2 + b^2)]^{1/2}$$

Dónde: L_0 , a_0 y b_0 son los valores de L , a y b del RS de nopal.

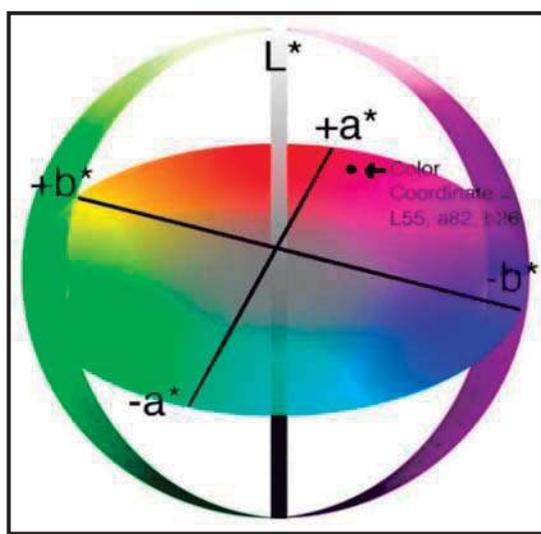


Figura 14. Atributos perceptuales básicos del color.

6.6.4. Determinación de acidez

La acidez titulable fue determinada utilizando el método de la AOAC (1990), se llevo acabo mezclando 1 g de la muestra con 100 ml de agua destilada, se tituló con hidróxido de sodio (NaOH) 0.1N, usando fenoftaleína como indicador. El cálculo de la acidez se realizó con base al ácido que se encuentra en mayor porción de acuerdo a la siguiente fórmula:

Porcentaje de ácido (%) = [(ml de NaOH x N x meq del ácido x volumen) / (peso de muestra x alícuota)] x 100

Donde:

N = normalidad de NaOH.

Volumen = volumen total (ml de extracto después de moler en licuadora).

meq del ácido = miliequivalente del ácido que se encuentra en mayor proporción.

Para obtener los miliequivalentes se consideró la siguiente fórmula:

meq = peso molecular de ácido orgánico / valencia x 100

La acidez titulable se calculó a partir de la cantidad de base necesaria. Bajo estas condiciones, los ácidos orgánicos y sólo una parte del ácido fosfórico están involucrados en el resultado final.

6.6.5. Propiedades estructurales microscopía electrónica de barrido (MEB)

La técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB) permite detectar la posible agregación de las partículas así como determinar el tamaño de las mismas. Permite caracterizar la estructura de las partículas, su tamaño y distribución. En este trabajo se deshidrató el RS de seis especies de *Opuntia* y se analizaron mediante MEB para observar diferencias morfológicas entre especies, se utilizó un equipo JMS-6400 Scanning Microscope, Marca: JEOL, Microanálisis: Detector: Bruker Modelo X FLASH 4010 MEB.

La microscopía electrónica de barrido permite la caracterización estructural y micromorfológica de los materiales. La microscopía electrónica forma la imagen con los electrones secundarios que se generan en la interacción de la radiación

electrónica con una capa superficial y fina de la muestra mediante un proceso de rastreo, los electrones reflejados son atraídos por un detector que proporciona las imágenes topográficas (Zegarra y Montesinos, s.f.).

6.6.6. Análisis estadístico

El análisis estadístico se le realizó a los datos obtenidos en la composición química y físico-química del RS de seis especies de *Opuntia* de nopal. Los datos están representados por la media de 3 repeticiones \pm desviación estándar, estos posteriormente fueron procesados estadísticamente con el software JMP®6.0, mediante un análisis de varianza (ANDEVA) y una prueba de Tukey con $\alpha = 0.05$ con la finalidad de comparar las medias de los tratamientos, y establecer si son estadísticamente significativo.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Localización georreferida de poblaciones silvestres de especies de *Opuntia*

La distribución geográfica de las seis especies de *Opuntia* (*O. tomentosa*, *O. streptacantha*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. atropes* y *O. ficus-indica*) en el estado de Michoacán fueron localizadas, georreferidas y registradas como se muestra en la Tabla 11 y Figura 15.

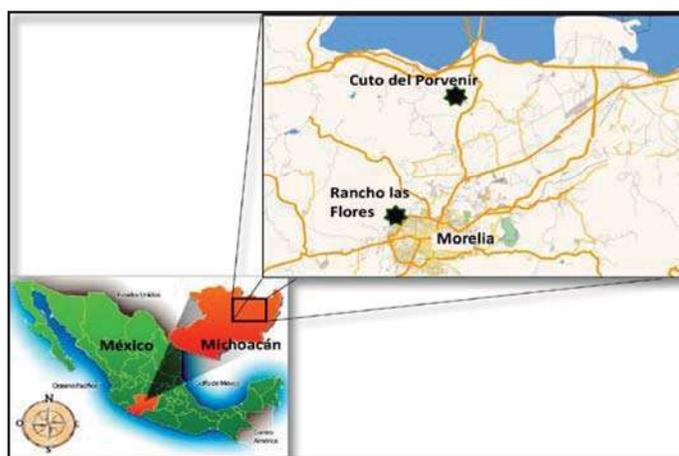


Figura 15. Ubicación geográfica de los sitios de colecta de las seis especies de *Opuntia*.

Tabla 11. Distribución geográfica de las especies de *Opuntia* en Michoacán.

Especie	Municipio	Localidad
<i>O. tomentosa</i>	Morelia	Camino hacia el rancho las flores
<i>O. streptacantha</i>	Morelia y Cuto del Porvenir	Carretera Morelia Cuto del Porvenir
<i>O. hyptiacantha</i>	Cuto del Porvenir	Carretera Morelia Cuto del Porvenir
<i>O. joconostle</i>	Cuto del Porvenir	Carretera Morelia Cuto del Porvenir
<i>O. atropes</i>	Morelia	Camino hacia el rancho las flores
<i>O. ficus-indica</i>	Morelia	Parque lineal bicentenario, Morelia

7.2. Deshidratación del RS de las seis especies de *Opuntia*

Cabe mencionar que en este documento denominamos residuo sólido remanente de la extracción de mucílago de las diferentes especies de *Opuntia*.

En la Tabla 12 se muestran los rendimientos obtenidos de RS de cada una de las especies, el rendimiento de sólidos en porcentajes indica que la especie que obtuvo el menor rendimiento fue *O. hyptiacantha* (6.3%), en cuanto a la humedad esta especie perdió 93.7% de agua; el mayor rendimiento lo obtuvo *O. joconostle* (10.4%), perdiendo humedad de 89.6%. Cabe mencionar que la bibliografía sobre RS es escasa y no existen datos respecto al rendimiento del RS de *Opuntia*.

Tabla 12. Rendimientos del RS deshidratado obtenido a partir de las diferentes especies de *Opuntia* estudiadas.

Especie	Cladodios limpios (g)	Residuo sólido en fresco (g)	Residuo sólido deshidratado (g)	Rendimiento de sólidos (%)	Pérdida de humedad (%)
<i>O. atropes</i>	4,000	1500	105	7%	93
<i>O. hyptiacantha</i>	4.000	1700	107	6.3	93.7
<i>O. joconostle</i>	4,000	1000	104	10.4	89.6
<i>O. streptacantha</i>	4,000	1500	106	7	93
<i>O. tomentosa</i>	4,000	1200	107	8.9	91.1
<i>O. ficus-indica</i>	4,000	1100	105	9.5	90.5

7.3. Composición química de los RS de las seis especies de *Opuntia*

La composición química del nopal varía en las distintas especies y también dentro de una misma especie (Torres-Sales, 2010). Las diferencias son atribuidas principalmente al tipo de especie, características del suelo, época del año, etc. Las especies estudiadas en este trabajo fueron colectadas en la misma

época del año y con una misma edad. En la tabla 13 se presentan los resultados de la composición química. Es importante resaltar que solo existen reportes sobre la composición química del mucílago y del nopal entero. Por lo que no es posible hacer comparaciones bibliográficas entre los resultados obtenidos en este trabajo y otros autores.

Tabla 13. Composición química en base húmeda del RS de las seis especies de nopal *Opuntia*.

Especies	Composición química				
	Humedad (%)	Cenizas (%)	Lípidos (%)	Proteínas (%)	*E.L.N. (%)
<i>O. atropes</i>	5.5±0.04 ^{ab}	19.8±0.05 ^c	1±0.02 ^b	6.5±0.09 ^a	23.8 ^a
<i>O. hyptiacantha</i>	5.5±0.3 ^{ab}	23.5±0.03 ^b	1.1±0.03 ^b	2.6±0.4 ^d	11 ^b
<i>O. joconostle</i>	6.9±0.13 ^a	26.6±0.19 ^a	1.1±0.002 ^b	3.1±0.13 ^d	20.4 ^a
<i>O. streptacantha</i>	6.2±0.06 ^{ab}	19.1±0.13 ^c	1.8±0.08 ^a	3.6±0.25 ^{cd}	20.7 ^a
<i>O. tomentosa</i>	4.7±1.9 ^b	19.0±0.64 ^c	1.2±0.03 ^b	5.3±0.38 ^{ab}	3.7 ^c
<i>O. ficus-indica</i>	4.5±0.15 ^b	23.4±0.75 ^b	2.0±0.16 ^a	4.7±0.4 ^{ab}	9.09 ^c

Nota: Los valores fueron expresados como promedios ± desviación estándar. Valores con letras diferentes dentro de una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0.05$). *Extracto libre de nitrógeno.

Existe información acerca de la composición química de cladodios secos de cinco especies de nopal *Opuntia* del estado de Michoacán (Zavala, 2012), en la Tabla 14 se muestran los resultados obtenidos por Zavala (2012) en cuanto a porcentajes de humedad, cenizas, lípidos y proteínas.

Tabla 14. Composición química (%) de cladodios secos de *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha*, y *O. tomentosa* Zavala (2012)

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

Nota: Los valores fueron expresados como promedios \pm desviación estándar. Valores con letras diferentes dentro de una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0.05$).

A los resultados obtenidos en este estudio del análisis bromatológico (composición química) del RS de las seis especies de *Opuntia* se les realizó un análisis de varianza (ANOVA) y una comparación de medias con la prueba de Tukey-Kramer HSD usando el programa JMP 6.0 Statistical Discovery (Tablas 13 y 14).

Humedad

La determinación del contenido de humedad de los alimentos es una de las más usadas en el proceso y control de los alimentos ya que indica la cantidad de agua involucrada en la composición de los mismos. El contenido de humedad se expresa generalmente como porcentaje, las cifras varían entre 60-95% en los alimentos naturales vegetales. (Vázquez, 1994). El contenido de humedad para *O. tomentosa* fue de 6.46%. Los resultados de humedad para el RS de nopal son mayores a los reportados por Zavala (2012) para humedad de cladodios secos, esto dependió del tiempo y temperatura de secado. En este caso el secado fue a 50 °C por 5 h. En el caso de Zavala (2012) fue a 45 °C por 6 h.

El ANOVA ($p=0.0240^*$) con una $p<0.05$ fue significativo y en el gráfico de la Figura 16 muestra que la humedad en el RS, para *O. ficus-indica* se obtuvo el contenido más bajo (4.5%) y *O. joconostle* obtuvo el mayor (6.9%), también se

observa que las medias de *O. atropes* y *O. hyptiacantha* son las más cercanas a la media general (5.56%). La comparación de medias indica que *O. joconostle* es estadísticamente diferente a *O. tomentosa* y *O. ficus-indica*, las especies restantes no presentaron diferencia estadística.

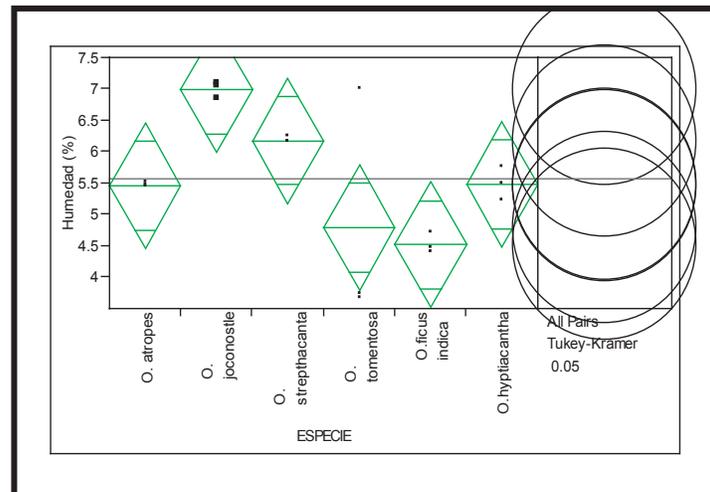


Figura 16. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de los porcentajes de humedad en las seis especies del RS.

Cenizas

Las cenizas de un alimento son un término analítico equivalente al residuo inorgánico que queda después de quemar la materia orgánica; representan el contenido de minerales como Ca, Mg, Na y K en la muestra. Los nopales presentan un alto contenido de agua un (90%), la humedad disminuye conforme aumenta la edad de la penca, mientras que el contenido de cenizas esta en función de su maduración, suelo, disponibilidad de sus elementos y la mayoría de los minerales se almacenan en los tallos viejos (Loubet, 2008).

Los resultados de cenizas para el RS de nopal presentaron variaciones con respecto a los reportados por Zavala (2012) sobre cenizas de cladodios secos, presentando variaciones pequeñas. Lo anterior debido a que Zavala reporta valores en nopal entero, y aquí del RS. Es decir. Una parte de los componentes químicos se precipita junto con el mucílago y otra parte se queda en el RS. La especie *O. joconostle* obtuvo el porcentaje más elevado en ambos trabajos y en

el caso de *O. streptacantha* y *O. tomentosa* los porcentajes reportados por Zavala son mayores, considerando que los sitios de colecta y las especies son las mismas, las variaciones mostradas pueden atribuirse a la época de colecta donde la abundancia de lluvias fue diferente.

En la Figura 17 el ANOVA ($p < 0.0001^*$) con una $p < 0.05$ fue significativo. El RS presentó un mayor contenido de cenizas para la especie *O. joconostle* (26.6%) y la especie que presentó menor contenido de cenizas fue *O. tomentosa* (19%). En el gráfico *O. atropes*, *O. hyptiacantha* y *O. ficus-indica* son las medias más cercanas a la media general (21.5%), la comparación de medias muestra que *O. joconostle* es diferente de *O. hyptiacantha* y *O. ficus-indica*, que a su vez son diferentes de las tres especies restantes. Los resultados obtenidos por Zavala (2012) coinciden con este trabajo respecto a *O. joconostle* con el mayor contenido de cenizas (25.33%).

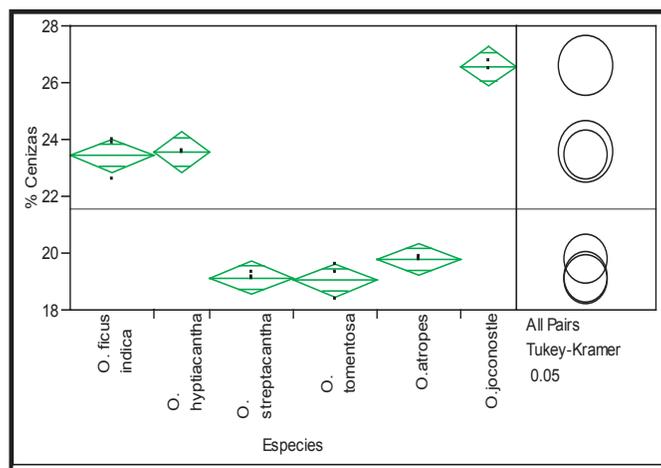


Figura 17. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de los porcentajes de cenizas en las seis especies del RS.

Lípidos

Los lípidos deben representar alrededor del 30% del valor calórico total diario; son necesarios en la dieta ya que cumplen funciones estructurales, de reserva, de regulación y de transportación que no pueden ser cumplidas por otra

sustancia. Este equilibrio es necesario para que el organismo funcione correctamente (Anónimo, Manual de nutrición, s.f.). Los resultados de lípidos para el RS de nopal presentaron variaciones entre sí, presentando el mayor valor *O. ficus-indica* (comercial). La variación presentada sobre lípidos entre las especies se puede atribuir a las diferentes especies.

En la Figura 18 se muestra el gráfico del ANOVA ($p < 0.0001^*$) con una $p < 0.05$ fue significativo. Los lípidos en el RS resultaron de la siguiente manera: *O. ficus-indica* presentó el valor más alto (2.0%) y *O. atropes* obtuvo el menor valor (0.9%), *O. tomentosa* presentó la media más cercana a la media general (1.4%). En la misma Figura, la comparación de medias muestra que *O. ficus-indica* y *O. streptacantha* no presentaron diferencias estadísticas, y que a su vez son diferentes estadísticamente de *O. tomentosa*, *O. joconostle*, *O. hyptiacantha* y *O. atropes* las cuales no presentaron diferencias estadísticas entre sí. Bravo-Hollins, 1978 reporta el contenido de lípidos en el nopal es de 1.22% este contenido de lípidos es bajo y proporciona triglicéridos, ceras.

Los alimentos están constituidos por una combinación de carbohidratos, proteínas y grasa, pueden proveer energía a través de su contenido, las grasas contienen mayor energía (9 kcal/g) que los carbohidratos y las proteínas (Anónimo, En buena salud, s.f.). Los RS de nopal de las seis especies estudiadas en este trabajo muestran que pueden ser útiles como alimento por sus bajos contenidos en lípidos, los cuales pueden deberse a la estructura de la membrana celular que está determinada por las características de sus componentes, fundamentalmente por lípidos, los otros componentes importantes son las proteínas, principales actores en las funciones celulares asociadas a la membrana, y los glúcidos. Así, ellos definen las propiedades físicas de las membranas, se reconoce al nopal como una cactácea con un bajo contenido de lípidos, el cual puede deberse al bajo porcentaje de lípidos presente en la pared celular característica de este vegetal.

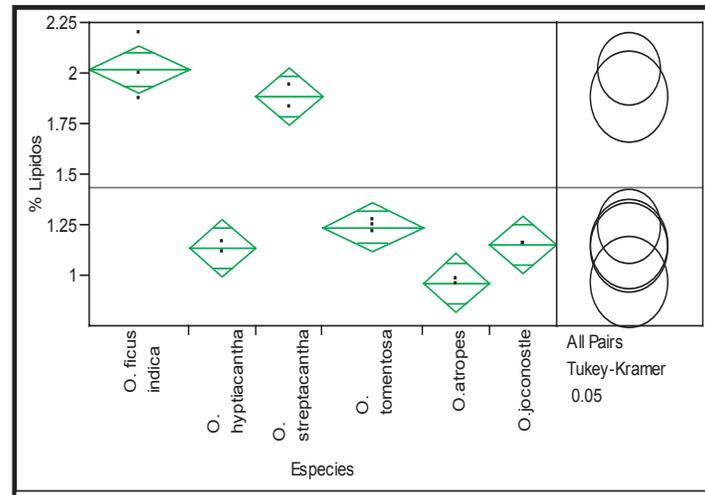


Figura 18. ANOVA y test de Tukey-Kramer ($\alpha=0.05$) de los porcentajes de lípidos en las seis especies del RS.

Proteínas

Las proteínas son compuestos orgánicos vitales para las funciones corporales básicas, incluyendo la regeneración celular y la reparación, mantenimiento y regulación de tejidos, producción de enzimas, hormonas y el suministro de energía. Villarreal *et al.*, (1963) reportaron que las proteínas presentes en el nopal son de un 5.3%. Los resultados de proteínas de manera general presentaron variaciones entre especies.

En la Figura 19 el gráfico del ANOVA ($p<0.0001^*$) con un $p<0.05$ fue significativo. Las proteínas en el RS para, *O. atropes* presentó el valor más alto (6.5%), *O. hyptiacantha* obtuvo el menor valor (2.6%), también se observa que *O. ficus-indica* presentó la media más cercana a la media general (4.3%). En la misma figura, la comparación de medias indica que *O. atropes* es estadísticamente diferente de *O. ficus-indica*, *O. streptacantha*, *O. joconostle* y *O. hyptiacantha*; estas tres últimas especies no presentaron diferencias estadísticas entre si.

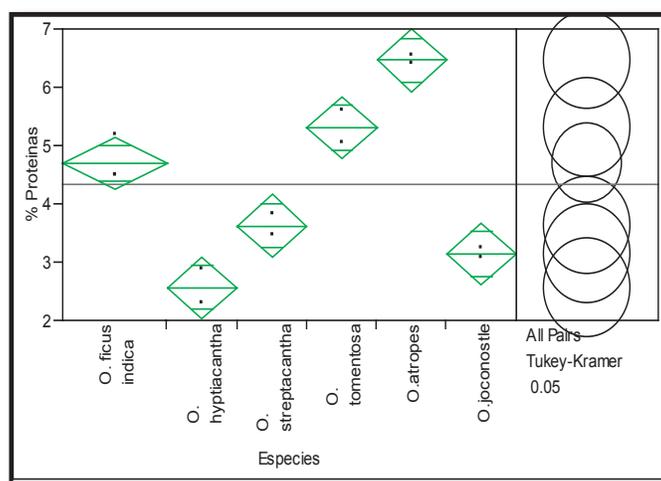


Figura 19. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de los porcentajes de proteína en las Seis especies del RS.

Carbohidratos

Estudios de composición química de nopal revelan que los cladodios de tres años son ricos en carbohidratos, así como de fibra. Se recomienda aprovechar este beneficio consumiendo cladodios de tres años de edad (Loayza y Chávez, 2007).

En la Figura 20 se muestra el gráfico correspondiente al ANOVA ($p<0.0001^*$) con un $p<0.05$ fue significativo, para carbohidratos presentes en el RS, la especie *O. atropes* presentó el porcentaje más alto (23.8%) y *O. tomentosa* el valor más bajo (3.7%), la media de *O. hyptiacantha* fue la más cercana a la media general (14.3%). En la misma figura la comparación de medias indica que *O. atropes* mantuvo similitud con *O. streptacantha* y *O. joconostle*, en cuanto a *O. hyptiacantha* y *O. ficus-indica* presentaron similitud estadística entre sí, mientras que *O. tomentosa* presentó diferencia estadística con las especies ya mencionadas. La especie *O. atropes* tienen cantidades considerables de carbohidratos, por lo tanto, pueden ser aprovechadas como suministro de energía para el ser humano.

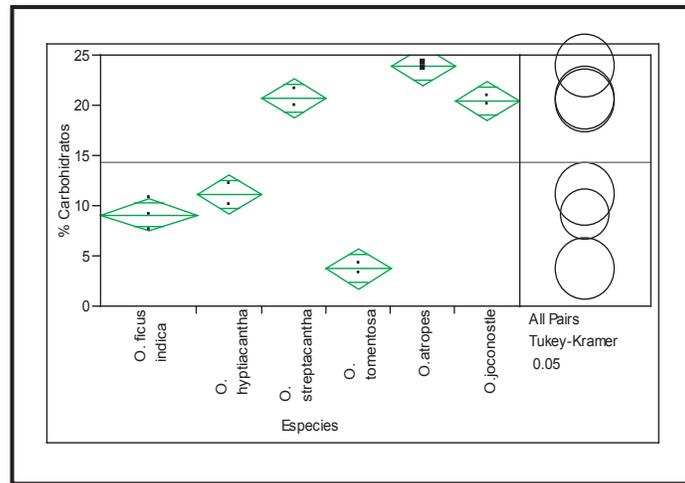


Figura 20. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de los porcentajes de Carbohidratos en la seis especies del RS.

Fibra dietética

La fibra presente en el nopal contiene infinidad de beneficios, ayuda a la regulación del colesterol, previene el cáncer de colon, regula el tránsito intestinal y el contenido de glucosa en sangre, aumenta el volumen de las heces y la sensación de saciedad, lo cual ayuda en las dietas de control de peso (Suriguez, s.f.). Una de las principales características del nopal es que presenta excelentes contenidos de FS y de FI; presentando variabilidad entre las distintas especies de nopal (Bautista-Justo, *et al.* 2010).

La especie *O. tomentosa* presentó el mayor porcentaje de FI (60%), las otras cuatro especies silvestres y la especie *O. ficus-indica* (comercial) presentaron valores de alrededor del 51%. En el caso de la FS la especie que obtuvo el mayor valor fue *O. tomentosa* (7.7%) y la que presentó el menor valor fue *O. streptacantha* (3.5%). Por otra parte la FDT muestra que *O. tomentosa* obtuvo el valor más elevado (67.7%) y el valor más bajo resultó para *O. joconostle* (42.8%). Los porcentajes anteriores muestran que *O. tomentosa* representa una fuente importante de FI por lo que podría ser utilizada en la industria alimentaria y farmacéutica. En la Tabla 15 se muestran los porcentajes de FD de las seis especies de *Opuntia*.

Tabla 15. Porcentajes de FDT, FS e FI de las seis especies de *Opuntia*.

Especies	Composición química		
	fibra insoluble %	fibra soluble %	fibra dietética total %
<i>O. atropes</i>	39.3±0.007 ^d	4.4±0.005 ^b	43.7±0.5 ^{cd}
<i>O. hyptiacantha</i>	51.4±0.003 ^b	5.3±0.005 ^{ab}	56.6±0.8 ^b
<i>O. joconostle</i>	35.9±0.02 ^d	6.2±0.02 ^{ab}	42.8±0.6 ^d
<i>O. streptacantha</i>	44.6±0.01 ^c	3.5±0.003 ^b	48±0.8 ^c
<i>O. tomentosa</i>	60±0.03 ^a	7.7±0.02 ^a	67.7±4.2 ^a
<i>O. ficus-indica</i>	50.16±0.01 ^b	6.2±0.002 ^{ab}	56.2±1.2 ^b

Nota: Los valores fueron expresados como promedios ± desviación estándar. Valores con letras diferentes dentro de una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0.05$).

Fibra insoluble

En la Figura 21 se muestra el gráfico correspondiente al ANOVA ($p<0.0001^*$) con una $p<0.05$ fue significativo. Para la FI presente en el RS de nopal, la especie *O. tomentosa* presentó el porcentaje más alto (60%) y *O. joconostle* el valor más bajo (35%), la media de *O. streptacantha* fue la más cercana a la media general (46.7%). En la misma figura la comparación de medias indica diferencias estadísticas entre *O. tomentosa* y las demás especies, *O. hyptiacantha* y *O. ficus-indica* no presentaron diferencia estadística, al igual que *O. joconostle* y *O. atropes* las cuales son estadísticamente iguales.

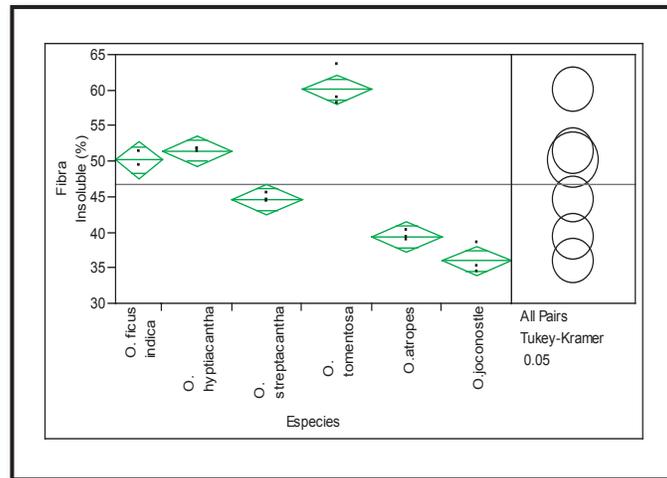


Figura 21. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de los porcentajes de FI en las seis especies de *Opuntia*.

Fibra Soluble

En la Figura 17 el ANOVA ($p<0.0001^*$) con una $p<0.05$ fue significativo. El RS presentó un mayor contenido de cenizas para la especie

El gráfico de la Figura 22 muestra el ANOVA ($p=0.013^*$) con una $p<0.05$ fue significativo. Para la FS presente en el RS de nopal, la especie *O. tomentosa* presentó el porcentaje más alto (7.7%) y *O. streptacantha* el más bajo (3.5%), la media de *O. hyptiacantha* fue la más cercana a la media general (5.5%). En la misma figura, la comparación de medias indica diferencias estadísticas entre *O. tomentosa*, *O. atropes* y *O. streptacantha*, por otra parte *O. joconostle*, *O. ficus-indica*, *O. hyptiacantha*, *O. atropes* y *O. streptacantha* presentaron similitud estadística.

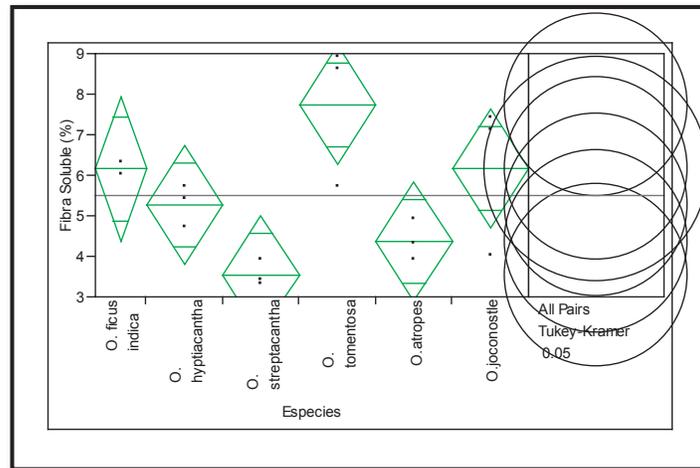


Figura 22. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de los porcentajes de FS en las seis especies de *Opuntia*.

Fibra Dietética Total

Un alto contenido de FDT en productos alimentarios les confiere algunas propiedades funcionales importantes en la tecnología de alimentos (absorción de agua elevada). Tales propiedades funcionales proporcionan un mayor potencial de uso en la industria de alimentos (Ramírez y Delahaye, 2009).

El gráfico correspondiente al ANOVA ($p < 0.0001^*$) con una $p < 0.05$ fue significativo. La FDT presente en el RS de nopal se muestra en la Figura 23, la especie *O. tomentosa* presentó el porcentaje más alto (67.7%) y *O. joconostle* el valor más bajo (42.8%), la media de *O. streptacantha* fue la más cercana a la media general (52.1%). En la misma figura la comparación de medias indica que *O. tomentosa* presentó diferencias estadísticas respecto a las cinco especies restantes, *O. hyptiacantha* y *O. ficus-indica* no presentaron diferencias estadísticas, por otra parte *O. streptacantha* y *O. atropes* mantienen similitud estadística, de igual manera *O. atropes* mantiene similitud estadística con *O. joconostle*.

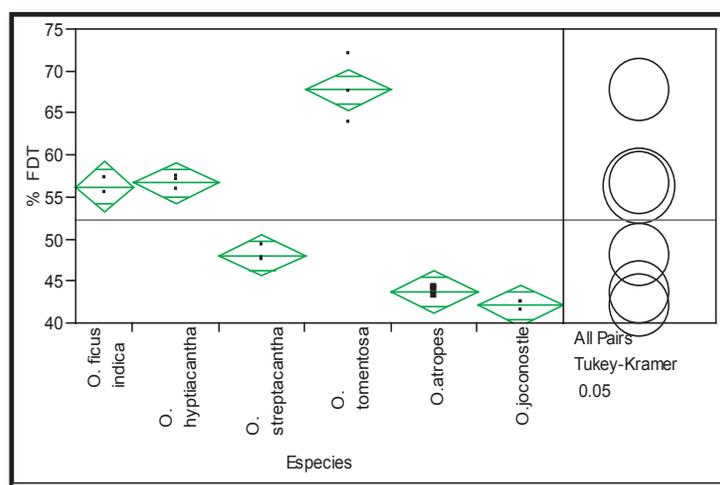


Figura 23. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de los porcentajes de FDT en las seis especies de *Opuntia*.

El contenido de FDT presente en el RS del nopal de las especies analizadas es comparable con productos comerciales como la Fibra Kania, Fibra Tarasca y Nopalinaza Plus considerados fuentes de FD, los cuales aportan 50.57%, 33.60%, 33.32% de FD. Respectivamente; por lo tanto el contenido de FD en el RS de las diferentes especies de *Opuntia* que va de 42 a 67.7% puede considerarse como una fuente importante de FD para su incorporación a productos alimenticios (Molina y Martin, 2007).

7.4. Propiedades físico-química del RS de las seis especies de *Opuntia*

Las propiedades funcionales de las fuentes de FD han sido estudiadas para conocer sus características individuales y tener una visión de su posible aplicación en alimentos y en la prevención de ciertas enfermedades en el organismo humano como cáncer del colon, además de su participación en la regulación de los niveles de glucosa en sangre y funciones intestinales, así como en la disminución del colesterol en sangre, control de peso corporal y evitar el estreñimiento (Salas *et al.*, 2008). Las propiedades de la FD están asociadas a su composición química, la estructura de la fibra en función del proceso al cual fue expuesta para su obtención, tamaño de partícula y porosidad (Rayas y Romero, 2008).

En la Tabla 17 se observa el porcentaje de la capacidad de absorción de agua donde *O. streptacantha* obtuvo el mayor valor (6.3%), *O. atropes* presentó el menor valor (4.5%). En el caso de la Capacidad de absorción de aceite, *O. streptacantha* mostró el valor más alto (3.6%), la especie que presentó el valor más bajo fue *O. atropes* (2.2%). Por otra parte, en la de terminación de acidez *O. hyptiacantha* obtuvo el mayor valor (0.24ml/100g) y *O. atropes* mostró el valor más bajo (0.1ml/100g).

Tabla 16. Determinación de la capacidad de absorción de agua y aceite, determinación de acidez del RS de seis especies de *Opuntia*.

Especies	Composición físico-química		
	Cap. absorción de agua (%)	Cap. absorción de aceite (%)	Acidez (ml/100g)
<i>O. atropes</i>	4.5±0.07 ^c	2.2±0.45 ^c	0.1±0.004 ^e
<i>O. hyptiacantha</i>	5.4±0.44 ^b	2.9±0.29 ^b	0.24±0.004 ^a
<i>O. joconostle</i>	5.4±0.44 ^b	2.9±0.29 ^b	0.13±0.004 ^d
<i>O. streptacantha</i>	6.3±0.22 ^a	3.6±0.28 ^a	0.16±0.004 ^c
<i>O. tomentosa</i>	5.4±0.23 ^b	2.7±0.16 ^b	0.18±0.004 ^b
<i>O. ficus-indica</i>	4.9±0.14 ^{bc}	2.5±0.09 ^b	0.14±0.004 ^d

Nota: Los valores fueron expresados como promedios ± desviación estándar. Valores con letras diferentes dentro de una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0.05$).

Capacidad de absorción de agua

Expresa la máxima cantidad de agua que puede ser absorbida por gramo de material seco en presencia de un exceso de agua bajo la acción de una fuerza patrón. De esta propiedad depende el efecto fisiológico de la fibra y el nivel máximo de incorporación a un alimento (Molina y Martin, 2007).

La FI absorbe una cantidad discreta de agua, lo cual llena el estómago produciendo sensación de saciedad. La capacidad de absorción de agua depende de la cantidad de grupos polares que posee la muestra disponible para unirse al agua, así como de la porosidad del material, tamaño de partícula y de las condiciones a las que la FD ha sido expuesta, como altas temperaturas ya que pueden alterar la estructura y composición química; cuando esto último ocurre existirá una mayor solubilización de los componentes de la FD con liberación de azúcares neutros y azúcares ácidos, e incluso llegando a una completa destrucción de los mismos; cuando el tratamiento térmico no es intenso entonces existirá una separación parcial de enlaces o fuerzas de atracción que hay entre los compuestos de la FD que interaccionan entre sí, como en el caso de celulosa, hemicelulosa, pectinas, mucílago, entre otros, y con lo cual habrá mayor liberación de grupos hidrófilicos (-OH) que estarán disponibles para ligarse con el agua (Molina y Martin, 2007). El tamaño de partícula es un factor importante que influye en la capacidad de absorción de agua en la FD (Matos-Chamorro y Chambilla-Mamani, 2010), ya que a menor tamaño de partícula el área superficial de contacto entre los componentes de la fibra provoca una mayor captación de agua (Martínez-Flores y Figueroa, 2008).

En la Figura 24 el gráfico del ANOVA ($p=0.0002$) con una $p<0.05$ fue significativo. La capacidad de absorción de agua en el RS, donde *O. streptacantha* presentó el valor más alto (6.3%), mientras que *O. atropes* obtuvo el menor valor (4.5%), también se observa que *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. tomentosa* presentaron la media más cercana a la media general (5.3%). En la misma figura, se muestra la comparación de medias, la cual indica que *O. streptacantha* es estadísticamente diferente de las cinco especies restantes, *O. hyptiacantha* mantiene similitud con *O. joconostle*, *O. tomentosa* y *O. ficus-indica*, a su vez *O. ficus-indica* mantiene similitud con *O. atropes*.

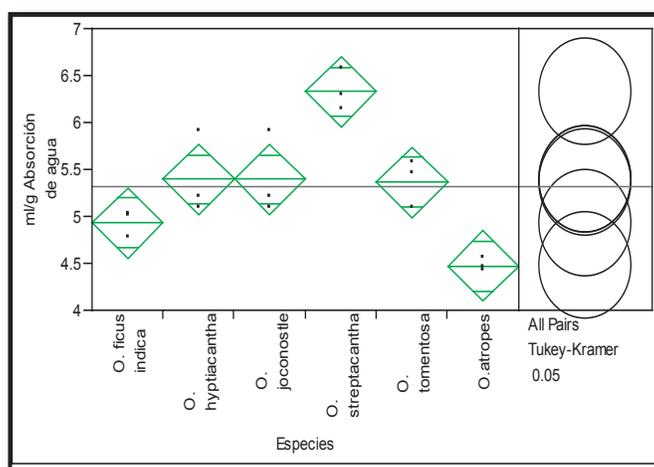


Figura 24. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de la capacidad de absorción de agua en el RS de las seis especies de *Opuntia*.

Capacidad de absorción de aceite

Es la máxima cantidad de aceite que puede ser retenida por gramo de material seco en presencia de un exceso de aceite bajo la acción de una fuerza patrón. Teóricamente las partículas con gran área de superficie y porosidad presentan mayor capacidad para absorber y atrapar componentes de naturaleza aceitosa; la grasa es atrapada en la superficie de la fibra principalmente por medios mecánicos. Se ha observado que las FI presentan mayores valores de absorción de grasa que las FS. Se ha determinado que las FI presentan mayores valores de absorción de aceite por la porosidad presente en la FI (Ramírez y Delahaye, 2009). A esta propiedad se le relaciona con la composición química, el tamaño de las partículas y la porosidad de la fibra. Es importante este último punto ya que en dichos sitios se aloja el aceite.

Con base en los resultados obtenidos es apreciable que las muestras con mayor capacidad de absorción de agua obtuvieron una mayor capacidad de absorción de aceite. Lo anterior, se debe el agua y el aceite compiten por interaccionar con la fibra, cuando hay mayor cantidad de agua enlazada a los componentes de la fibra entonces habrá menos sitios de adhesión del aceite, y cuando el contenido

de agua es menor, entonces el aceite encontrará sitios de absorción en la fibra (Molina y Martin, 2007). Las propiedades de hidratación y absorción de grasas de la FD determinan su uso en alimentos debido a su relación con la textura y a la que se desea obtener en ellos.

Respecto a la capacidad de absorción de aceite en el RS, en la Figura 25 se muestra el gráfico del ANOVA ($p=0.0035$) con una $p<0.05$ significativo, la especie *O. streptacantha* obtuvo el valor más alto (3.6%), mientras que *O. atropes* obtuvo el menor valor (2.1%), se observa que *O. tomentosa* presentó la media más cercana a la media general (2.7%). En la misma figura, se muestra la comparación de medias, la cual indica que *O. streptacantha* es estadísticamente diferente a *O. ficus-indica*, *O. atropes*. *O. hyptiacantha* mantiene similitud con *O. joconostle*, *O. tomentosa*, a su vez *O. tomentosa* mantiene similitud con *O. ficus-indica*, esta última especie mantiene similitud estadística con *O. atropes*.

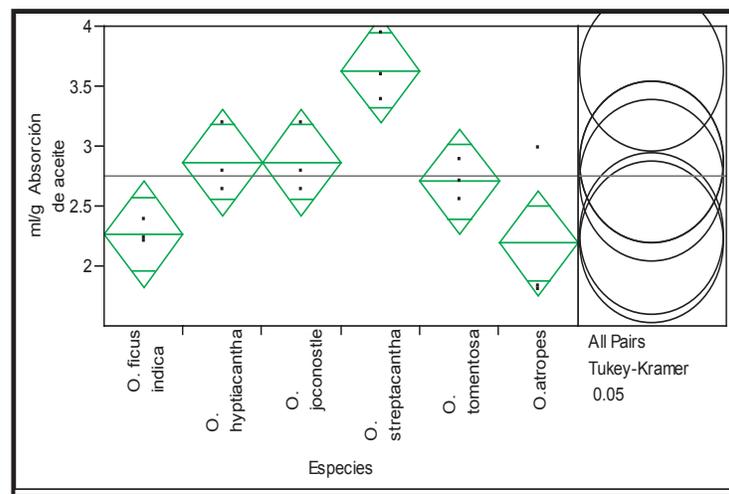


Figura 25. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de la capacidad de absorción de aceite en el RS de las seis especies de *Opuntia*.

Determinación de acidez

Los ácidos más comunes y abundantes en frutas y vegetales son el ácido cítrico y el málico, se localizan principalmente en las vacuolas y en menor grado en el

citoplasma, el ácido málico se presenta en mayor concentración en el nopal (Maldonado, s.f.).

La acidez en los nopales es uno de los atributos sensoriales que más influye en su aceptabilidad, prefiriéndose una acidez baja al momento de su consumo considerando de aceptación moderada los valores de acidez de 0.41 ml/100g y altos los de 0.76 ml/100g (Aguilar-Sánchez *et al.*, 2007); con base en lo anterior, las especies estudiadas en la presente investigación obtuvieron valores menores a los de aceptación moderada, lo que representa valores de acidez aceptables. La acidez en el nopal es un atributo sensorial que depende de varios factores como la especie, la variedad, zona de producción, manejo del cultivo, hora de corte y tamaño del producto, entre otros (García, 2003; Kleber, 2011). Los valores de acidez para *O. ficus-indica* de 0.01 a 0.12 indican que se debe considerar que el nopal presenta un metabolismo ácido, por lo que su acidez varía durante el día y la noche, por lo que este parámetro puede variar dependiendo de la hora de corte. Es necesario continuar estudiando este factor y su manejo, ya que afecta la calidad y el sabor del nopal.

Respecto a la acidez del RS, en la Figura 26 se muestra el gráfico del ANOVA ($p < 0.0001^*$) con una $p < 0.05$ fue significativo. La especie *O. hyptiacantha* obtuvo el valor más alto (0.24 mg/100g) y *O. atropes* obtuvo el menor valor (0.1 mg/100g), se puede observar que *O. streptacantha* presentó la media más cercana a la media general (0.16 mg/100g). En la misma figura, se muestra la comparación de medias, la cual indica que *O. hyptiacantha* es estadísticamente diferente a las cinco especies restantes, *O. tomentosa* presentó diferencia estadística con *O. streptacantha*, la especie *O. ficus-indica* mantuvo similitud con *O. joconostle* y *O. atropes* es estadísticamente diferente a las cinco especies mencionadas.

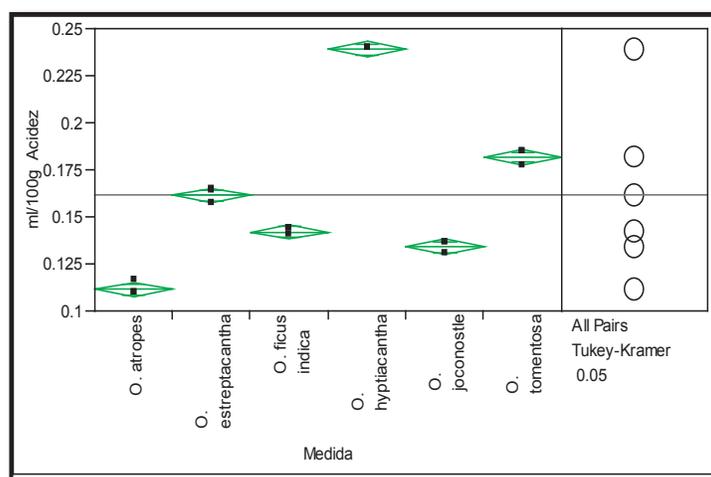


Figura 26. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de acidez en el RS de las seis especies de *Opuntia*.

7.5. Tamaño y diámetro de partícula del RS de las especies de *Opuntia* en estudio

Dependiendo de la granulometría de la fibra será el tipo de alimento o proceso en el cual se incorporará. La fibra fina (de tres a cinco micrómetros) puede emplearse como sustituto de grasas, las de mayor tamaño se aplican en productos donde su textura lo permita. Tamaños mayores pueden afectar la apariencia de un producto e impartir una sensación fibrosa dificultando la masticación y deglución; tamaños menores pueden presentar problemas en la hidratación al favorecerse la formación de grumos, ocasionar apelmazamiento y por lo tanto compresión del producto (García, 2003).

El tamaño de partícula de la fibra está relacionado directamente con algunas propiedades físico-químicas como la capacidad de hidratación debido a que un tamaño de partícula adecuado aumenta el área superficial de contacto entre los grupos funcionales hidrófilos presentes en la fibra y el agua, generando una mayor captación de esta. Dicha interacción, forma geles viscosos que retienen diferentes tipos de moléculas como la glucosa, el colesterol y algunos iones, favoreciendo la disminución de enfermedades como la hipercolesterolemia (Martínez-Flores y Figueroa, 2008). El tamaño de partícula del RS de nopal de

las seis especies puede considerarse como adecuado para su incorporación en alimentos funcionales dirigidos a los humanos (50 a 500 μm) (Linaje Treviño, 2007)

En la Tabla 18 se presenta la distribución del tamaño de partícula referente al RS de las seis especies de *Opuntia*, el mayor peso le corresponde a partículas menores a 106 μm (partículas finas), que representa un promedio de 31.15% del peso total; también se obtuvieron tamaños menores a 250 μm (partículas medianas) con un promedio de 21.26%, seguidas por partículas menores a 180 μm (partículas medianas) en menor proporción representado el 15.3%, las partículas inferiores a 425 μm (partícula grande) se obtuvieron en menor proporción con un promedio de 5.6%. En las Figuras 27 a 32 se muestra las curvas granulométricas en las cuales se visualiza la distribución del tamaño de partícula, las cuales presentaron mínimas variaciones entre especies, indicando un rango de 168-176 μm para el diámetro medio de partícula. El tamaño de partícula mencionado está relacionado con el área superficial de contacto del RS y puede promover una mayor captación de agua y aceite. Estos resultados son similares a los obtenidos por (Mora, 2009) para Nopal Penca (166.6 μm).

Tabla 17. Distribución de partícula de polvo de la fibra insoluble de nopal.

Especies Fracción (g/100g)	No. Malla Abertura (μm)						
	40(425)	60 (250)	80 (180)	100 (150)	120 (125)	140 (106)	Fondo (<160)
<i>O. atropes</i>	6.5 \pm 0.05	20.03 \pm 0.05	16.7 \pm 0.05	5.2 \pm 0.11	17.2 \pm 0.11	3.4 \pm 0.11	30.2 \pm 0.11
<i>O. hyptiacantha</i>	5.2 \pm 0.05	21.7 \pm 0.05	13.2 \pm 0.05	8.5 \pm 0.05	14.6 \pm 0.11	5.1 \pm 0.05	30.3 \pm 0.57
<i>O. jocosostle</i>	3.7 \pm 0.01	22.9 \pm 0.01	16.3 \pm 0.01	5.5 \pm 0.15	11.8 \pm 0.100	6.0 \pm 0.100	33.03 \pm 0.2
<i>O. streptacantha</i>	4.6 \pm 0.05	23.03 \pm 0.05	15.2 \pm 0.05	6.5 \pm 0.05	12.3 \pm 0.05	5.7 \pm 0.05	32.03 \pm 0.05
<i>O. tomentosa</i>	6.7 \pm 0.05	20.3 \pm 0.05	14.7 \pm 0.05	7.1 \pm 0.05	15.1 \pm 0.05	4.2 \pm 0.1	31.2 \pm 0.1
<i>O. ficus-indica</i>	7.4 \pm 0.05	19.6 \pm 0.05	15.7 \pm 0.05	15.7 \pm 0.05	15.1 \pm 0.05	4.4 \pm 0.05	30.1 \pm 0.05

Cada valor representa la media aritmética de 3 repeticiones \pm la desviación estándar

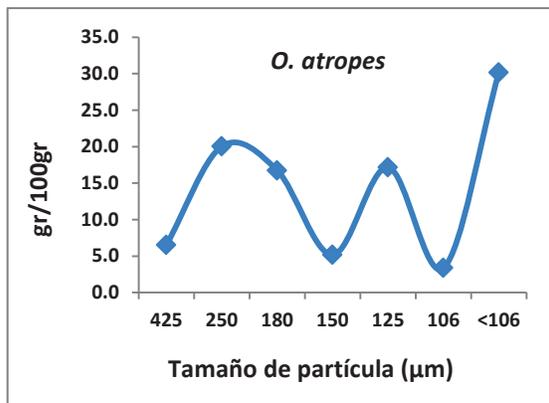


Figura 27. Tamaño medio de partícula (DMP) para *O. atropes*.

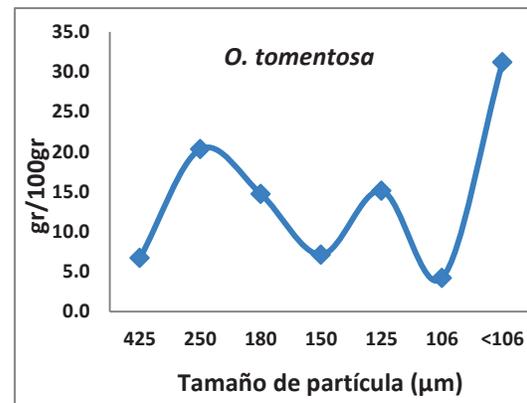


Figura 28. Tamaño medio de partícula (DMP) para *O. tomentosa*.

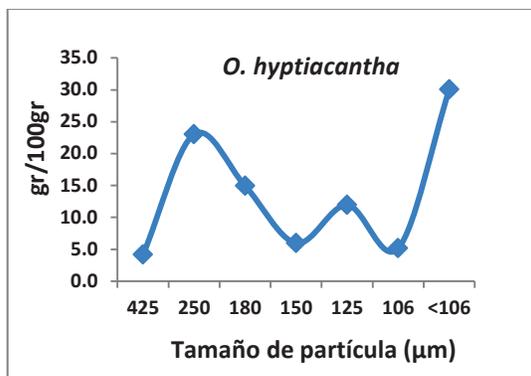


Figura 29. Tamaño medio de partícula (DMP) para *O. hyptiacantha*.

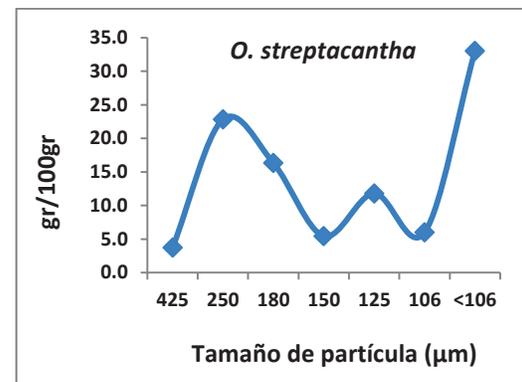


Figura 30. Tamaño medio de partícula (DMP) para *O. streptacantha*.

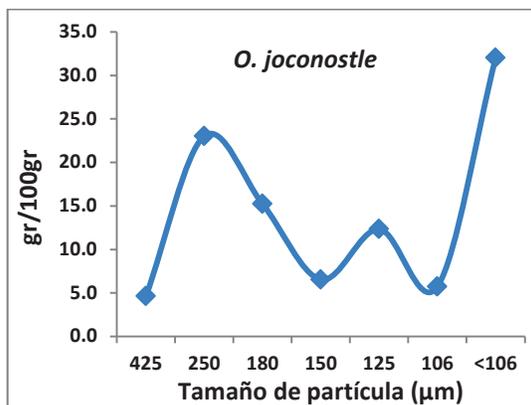


Figura 31. Tamaño medio de partícula (DMP) para *O. joconostle*.

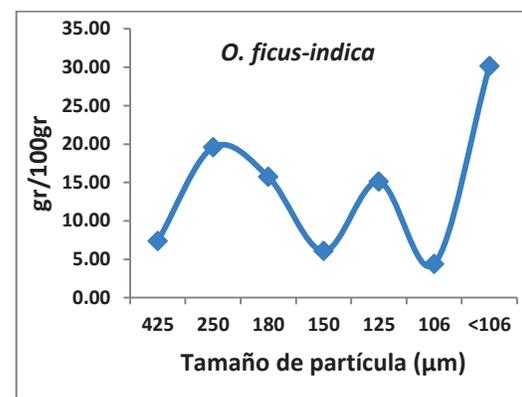


Figura 32. Tamaño medio de partícula (DMP) para *O. ficus-indica*.

Tabla 18. Diámetro medio de partícula (DMP) de cada una de las especies de *Opuntia*.

Especies	DMP (μm)
<i>O. atropes</i>	174
<i>O. hyptiacantha</i>	172
<i>O. joconostle</i>	171
<i>O. streptacantha</i>	168
<i>O. tomentosa</i>	174
<i>O. ficus-indica</i>	176

7.6. Determinación de color del RS de seis especies de *Opuntia*

Se usaron las coordenadas de color L^* , a^* y b^* que son expresadas como atributos del color; donde L se relaciona con la claridad, a^* va de rojo (+) a verde (-), b^* va de amarillo (+) a azul (-) y el **Tono (h^*)** corresponde al tono del color y **Croma (C^*)**, atributo que evalúa la sensación visual “débil-fuerte” o “pálido-intenso” de un color (Rivas, 2010).

El color del nopal varía del verde claro hasta el gris o ceniza, según la edad de la planta. El color está relacionado directamente con el factor de calidad y aceptabilidad de los productos alimenticios (Altan *et al.*, 2008). El color puede ser un indicador de la manera real de la degradación de la clorofila y la aparición de otros pigmentos, lo que se puede relacionar también con la maduración del cladodio. Un ángulo Hue de 0° representa un rojo puro mientras que un ángulo Hue de 180° representa un verde puro. Los resultados de la colorimetría de triestímulo L^* , a^* y b^* se muestra en la Tabla 20.

Un colorante es un compuesto químico que imparte color, puede ser definido como la sustancia obtenida de los vegetales (Badui, 2006). La mayoría de los pigmentos vegetales se localizan en el protoplasma de la célula dentro de los plástidos, en algunos casos cuando los pigmentos son hidrosolubles, se localizan disueltos en las vacuolas de las células (Mandujano, 2006).

En cuanto al color de los RS de las seis especies de *Opuntia* expresados como ángulo Hue los resultados variaron de 92° a 100°. Los colores presentaron luminosidad con un valor de L* alrededor de 70, con valores de a* negativos, los cuales corresponden al color verde; y la coordenada b* positivos mostró una tendencia a las tonalidades amarillas con valores (cerca de 16).

Tabla 19. Colorimetría de fibra insoluble de nopal de seis especies de *Opuntia*. Saturación (Croma) y ángulo de tono °Hue.

Especies	COLORIMETRIA					Color
	L	a*	b*	Saturación (croma)	Angulo de tono (°hue)	
<i>O. atropes</i>	68.1±0.2 ^b	-0.6±0.06 ^a	13.8±0.1 ^c	13.8±0.08 ^c	92.6±2.21 ^c	verde amarillento
<i>O. hyptiacantha</i>	67.3±0.3 ^c	-1.7±0.05 ^b	14.8±0.04 ^{ab}	14.9±0.04 ^a	96.4 ±0.2 ^b	verde amarillento
<i>O. joconostle</i>	66.8±0.1 ^c	-1.6±0.1 ^b	14.7±0.05 ^{ab}	14.8±0.05 ^a	96.3±0.3 ^b	verde amarillento
<i>O. tomentosa</i>	61.1±0.2 ^e	-0.8±0.06 ^a	14.5±0.3 ^b	14.2±0.27 ^b	93.1±0.29 ^c	verde amarillento
<i>O. streptacantha</i>	66±0.1 ^d	-0.8±0.04 ^a	15.1±0.08 ^a	15.1±0.08 ^a	93.09±0.15 ^c	verde amarillento
<i>O. ficus-indica</i>	71.4±0.1 ^a	-2.7±0.04 ^c	13.4±0.06 ^d	13.7±0.06 ^c	100±0.1 ^a	Verde

Nota: Los valores fueron expresados como promedios ± desviación estándar. Valores con letras diferentes dentro de una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0.05$).

En la Figura 33 el ANOVA ($p<0.0001^*$) indica que la luminosidad del RS para la especie *O. ficus-indica* presento el valor más alto (71.4) y para *O. tomentosa* mostro el valor más bajo (61.1), además se puede observar que *O. streptacantha* es la media más cercana a la media general (66.9). En el mismo grafico, la comparación de medias muestra que *O. ficus-indica* es estadísticamente diferente a las cinco especies restantes y que *O. atropes* presentó diferencia con *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha* y *O. tomentosa*, mientras que *O. hyptiacantha* mantiene similitud con *O. joconostle*, por otra parte *O. streptacantha* resultó estadísticamente diferente a *O. tomentosa*.

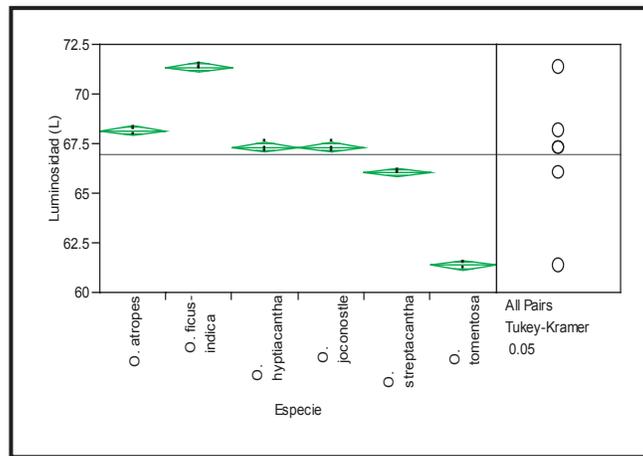


Figura 33. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de luminosidad (L) en el RS de las seis especies de *Opuntia*.

En la Figura 34 se muestra el ANOVA ($p<0.0001^*$) con una $p<0.05$ fue significativo, donde la coordenada “a” (color rojo-verde) del RS de nopal indica que la especie *O. ficus-indica* presentó el valor más alto (-2.7) y *O. atropes* obtuvo el valor más bajo (-0.6). En el mismo gráfico se puede observar que *O. joconostle* y *O. hyptiacantha* presentaron las medias más cercanas a la media general (-1.36). La comparación de medias muestra que *O. atropes* mantiene similitud con *O. tomentosa*, *O. streptacantha* y *O. joconostle* es estadísticamente igual a *O. hyptiacantha*, por otra parte *O. ficus-indica* es estadísticamente diferente a las cinco especies mencionadas anteriormente.

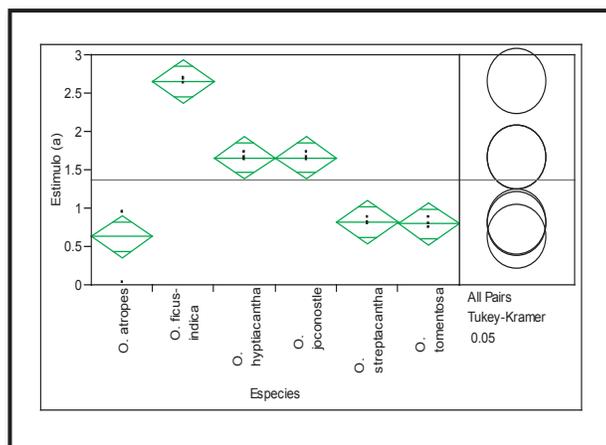


Figura 34. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de estímulo (a^*) en el RS de las seis especies de *Opuntia*.

La Figura 35 muestra el ANOVA ($p < 0.0001^*$) correspondiente a la coordenada de "b" (azul-amarillo) del RS de nopal. La especie *O. streptacantha* obtuvo el valor más alto (15.1) y *O. ficus-indica* presentó el valor más bajo (13.4). También en el gráfico, *O. tomentosa* mostró la media más cercana a la media general (14.3). La comparación de medias muestra que *O. streptacantha* mantiene similitud con *O. joconostle*, *O. hyptiacantha* y *O. tomentosa*, por otro lado *O. atropes* resultó estadísticamente diferente a *O. ficus-indica*.

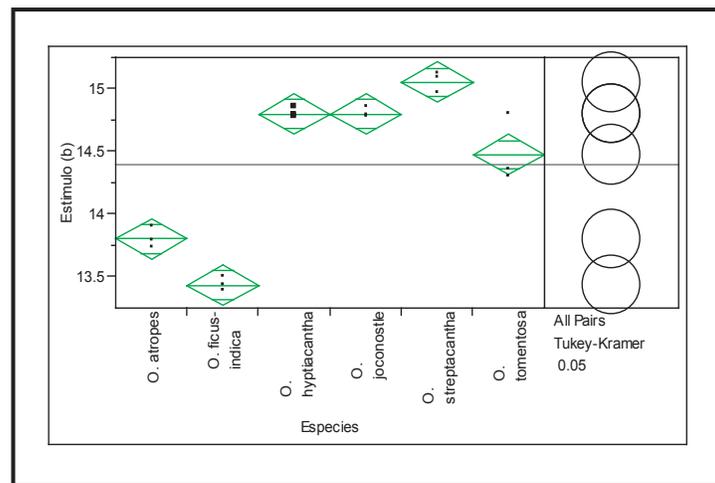


Figura 35. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de estímulo (b*) en el RS de las seis especies de *Opuntia*.

Respecto a la saturación cromática (intensidad de color), en la Figura 36 se muestra el ANOVA ($p < 0.0001^*$) del RS de nopal. La especie *O. streptacantha* presentó el valor más elevado (15.1), mientras que el valor más bajo (13.7) resultó para *O. ficus-indica*, en el mismo gráfico se puede observar que *O. tomentosa* presentó la media más cercana a la media general (14.5). La comparación de medias muestra que *O. streptacantha* mantiene similitud con *O. joconostle* y *O. hyptiacantha*, mientras que *O. tomentosa* presentó diferencia estadística con *O. atropes* y *O. ficus-indica* y que a su vez, estas dos últimas mostraron similitud estadística entre sí.

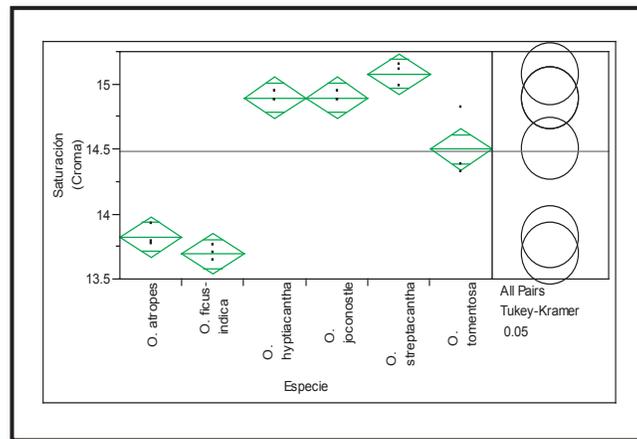


Figura 36. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) de saturación croma en el RS de las seis especies de *Opuntia*.

En la Figura 37, el ANOVA ($p<0.0001^*$) muestra el ángulo Hue (tono del color) del RS de nopal. La especie *O. ficus-indica* presentó el valor más elevado (100°) y *O. atropes* presentó el valor más bajo (92.6°), en el mismo gráfico *O. joconostle* y *O. hyptiacantha* muestran las medias más cercanas a la media general (95.4°). La comparación de medias muestra que *O. ficus-indica* es estadísticamente diferente a las cinco especies restantes, *O. joconostle* mantiene similitud estadística con *O. hyptiacantha*, mientras que *O. tomentosa* presenta similitud estadística con *O. streptacantha* y *O. atropes*.

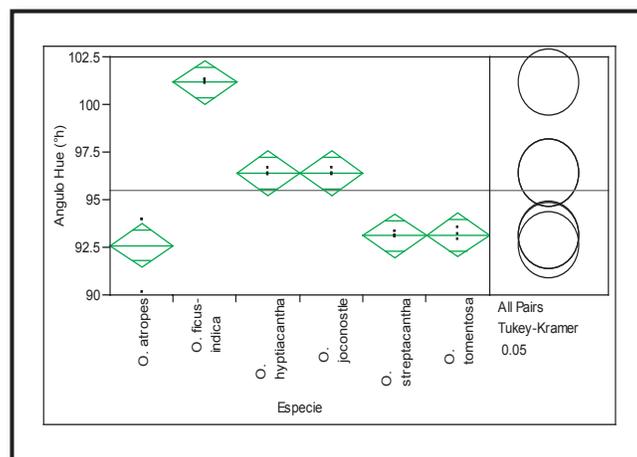


Figura 37. ANOVA y test de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$) ángulo Hue en el RS de las seis especies de *Opuntia*.

Los principales pigmentos de origen vegetal son los carotenoides, clorofila, antocianinas, flavonoides y betalainas se pueden ver afectados por diferentes factores que implican un cambio de coloración en la planta, la coloración se puede perder bajo la influencia de luz, altas temperaturas, oxígeno (Badui, 2006).

Respecto al parámetro de luminosidad L , la disminución en su valor generalmente se asocia degradación de compuestos coloridos o bien formación de nuevos compuestos. Los valores del parámetro a y b son generados principalmente por la presencia de compuestos fenólicos (tono amarillo) (Badui, 2006). Las antocianinas compuestos fenólicos se pueden ver afectadas por el procesamiento de la muestra, afectando los parámetros de color (L , a , b), debido a la sensibilidad de estos compuestos por la temperatura (Brennan *et al.*, 2011; Yagci y Gogus, 2009).

En relación al color se ha realizado un trabajo en la formulación de fideos secos tipo tallarines con harina de nopal (*Opuntia ficus-indica L Millar*) de alto contenido en fibra, la harina presentó luminosidad con un L^* de 65,08, un valor de a^* de -4,19 señalando una tendencia al verde; y el parámetro b^* , mostró una coloración amarillenta con valores alejados del cero (28,66). Sáenz *et al.* (2006) obtuvieron los siguientes valores L^* (73,37), a^* (-5,20) y b^* (26,1), informando que el producto presenta un color verde pálido brillante de baja intensidad. Los trabajos mencionados anteriormente coinciden con los resultados obtenidos en esta investigación (Margalef *et al.*, 2012).

7.7. Determinación de minerales (Ca, Mg, K, Na, Cu, Fe, Ni y Zn) en el RS mediante espectrofotometría de absorción atómica

La cantidad de minerales presentes en los RS de nopal se determinan mediante análisis cuantitativos. De acuerdo con Loubet (2008), el componente principal de las cenizas de nopal es el calcio, pero también se encuentran en menor cantidad el magnesio y el sodio; los cuales predominan principalmente en forma de carbonatos y cloruros.

Un mineral es un elemento inorgánico (comúnmente metal) combinado con algún otro elemento químico como puede ser un óxido, un carbonato, un sulfato, un fosfato, etc. Los minerales son constituyentes esenciales de las estructuras esqueléticas, como huesos y dientes, juegan un papel clave en el mantenimiento de la presión osmótica y regulan el intercambio de agua y solutos dentro del cuerpo, sirven como constituyentes estructurales de tejidos blandos, son esenciales para la transmisión de los impulsos nerviosos y para las contracciones musculares, regulan el pH de la sangre, son cofactores en el metabolismo, catálisis y activadores enzimáticos (Manrique, 1996).

En las Tablas 21 y 22 se presentan los resultados de minerales en el RS de las seis especies de *Opuntia* estudiadas, en la Tabla 21 se muestran las concentraciones promedio obtenidas mediante los análisis por absorción atómica; el calcio presentó valores de 8,208 hasta 17,880 mg/100g, en el caso del magnesio se obtuvieron valores de 741 hasta 1508 mg/100g, respecto al potasio se registraron valores de 395 hasta 1,084 mg/100g, mientras que el sodio presentó concentraciones de 383 a 532 mg/100g.

Tabla 20. Concentraciones de Ca, Mg, K y Na en el RS de las seis especies de *Opuntia*.

Especies	mg/100g			
	Ca	Mg	K	Na
<i>O. ficus indica</i>	17,880±0.005 ^a	1,000±0.0004 ^a	395±0.0002 ^c	473±0.11 ^{ab}
<i>O. atropes</i>	12,956±0.01 ^b	940±0.0002 ^a	719±0.0004 ^b	383±0.06 ^b
<i>O. tomentosa</i>	8,208±0.001 ^c	741±0.0002 ^a	893±0.003 ^{a,b}	423±0.09 ^{ab}
<i>O. joconostle</i>	11,486±0.008 ^{b,c}	1,508±0.0001 ^a	458±0.0002 ^c	532±0.07 ^a
<i>O. streptacantha</i>	11,431±0.003 ^{b,c}	1,038±0.0002 ^a	1,084±0.0003 ^a	482±0.09 ^{ab}
<i>O. hyptiacantha</i>	14,706±0.002 ^{a,b}	1,293±0.0003 ^a	460±0.0002 ^c	479±0.05 ^{ab}
LD	3	0.2	200	116

Nota: Los valores fueron expresados como promedios ± desviación estándar. Valores con letras diferentes dentro de una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0.05$).

Calcio

El calcio se considera como el catión principal del hueso, el cual es un tejido vivo, cuyas células poseen necesidades nutrimentales igual que las del resto del cuerpo de proteínas y micronutrientes. Desempeña diversos papeles biológicos como: impulsos nerviosos, vasodilatación, reacciones enzimáticas, coagulación de la sangre, entre otros. Se ha demostrado que un consumo adecuado de calcio reduce el riesgo de padecer diversas enfermedades como la osteoporosis, cálculos en el riñón (minerales) (Loubet, 2008). El promedio adecuado de consumo de calcio para el ser humano varía de 800 a 1,200 mg por día (González, 2008); en base a los resultados obtenidos del RS de las seis especies de *Opuntia* presentaron valores mayores a los recomendados por día, donde sobresale *O. ficus-indica* (17,880 mg/100g).

En la Figura 38 el ANOVA ($p < 0.0001^*$) con una $p < 0.05$ fue significativo. La concentración de calcio presente en el RS. Por lo tanto la especie *O. ficus-indica* presentó el valor más elevado (17,880 mg/100g) y *O. tomentosa* presentó el valor más bajo (8,208 mg/100g). En el mismo gráfico se muestra que *O. atropes* presentó la media más cercana a la media general (12,778 mg/100g), la comparación de medias muestra que *O. ficus-indica* mantiene similitud con *O. hyptiacantha*, la cual mantiene similitud estadísticamente con *O. atropes*, con respecto a *O. joconostle* y *O. streptacantha* mantiene similitud entre si, *O. streptacantha* mantiene similitud con *O. tomentosa*.

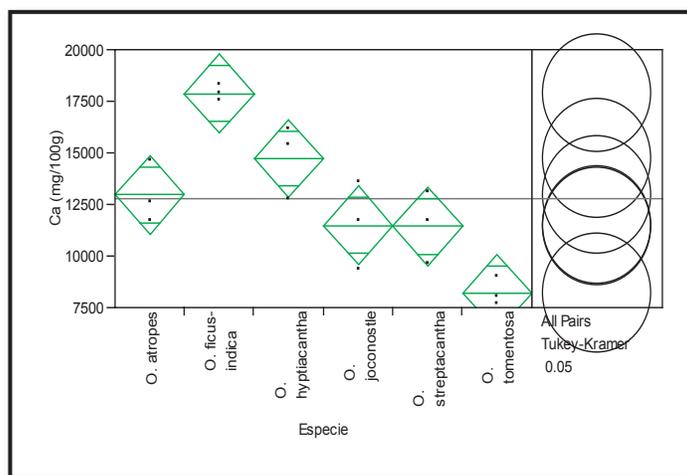


Figura 38. ANOVA y Prueba de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$), en las concentraciones de calcio mg/100g en las seis especies de *Opuntia*.

Magnesio

El magnesio es esencial para la asimilación del calcio y de la vitamina C, es importante para la transmisión de los impulsos nerviosos, equilibra el sistema nervioso central y aumenta la secreción de bilis (Organización para la Agricultura y la Alimentación, s.f.).

El consumo adecuado de magnesio para el ser humano varía de 300 a 400 mg por día (Organización para la Agricultura y la Alimentación, s.f.). Los resultados obtenidos del RS de las seis especies presentaron valores superiores a los recomendados por día, señalando el aporte más elevado de *O. joconostles* (1,508 mg/100g). En el caso del **magnesio** las especies no mostraron diferencias significativas registrando valores de 741 a 1,508 mg/100g (Tabla 21).

Potasio

El potasio regula el contenido en agua de las células y su movimiento, en equilibrio con el calcio y el magnesio, contribuye a la regularización de todas las funciones celulares y en especial a la excitabilidad del corazón, del sistema nervioso y de los músculos, es indispensable para el movimiento del miocardio y activa los sistemas enzimáticos (Organización para la Agricultura y la Alimentación, s.f.).

El consumo recomendado de potasio por día es de 500 mg, los valores obtenidos en el presente trabajo varían de acuerdo a cada especie, *O. streptacantha* (1,084 mg/100g) presentó el mayor aporte y *O. ficus-indica* (395 mg/100g) resultó menor al recomendado.

En la Figura 39 se muestra el ANOVA ($p < 0.0001^*$) con una $p < 0.05$ fue significativo. La concentración de potasio presente en el RS. Se observó que la especie *O. streptacantha* (1,084 mg/100g) mostró el valor más elevado y *O. ficus-indica* presentó el valor más bajo (395 mg/100g). En el mismo gráfico se muestra que *O. atropes* presentó la media más cercana a la media general (668.4 mg/100g), la comparación de medias muestra que *O. streptacantha* mantiene similitud con *O. tomentosa* y a su vez esta mantiene similitud con *O. atropes*, por otra parte *O. hyptiacantha*, *O. joconostle* y *O. ficus-indica* son estadísticamente iguales.

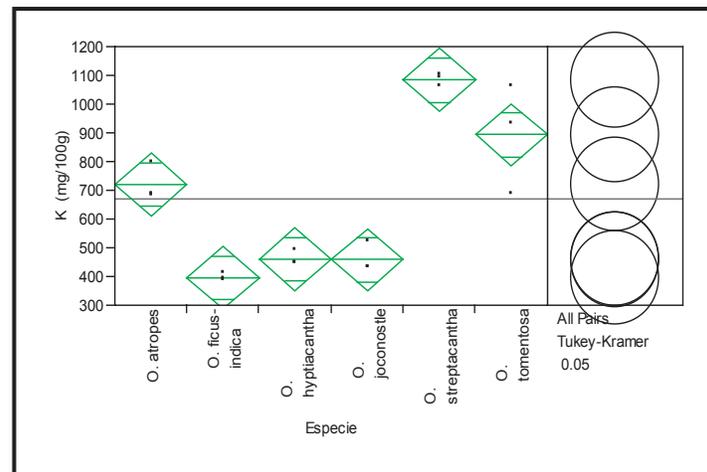


Figura 39. ANOVA y Prueba de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$), en las concentraciones de potasio mg/100g en las seis especies de *Opuntia*.

Sodio

El sodio se absorbe desde el intestino delgado y es llevado a los riñones en donde se infiltra y regresa a la sangre para mantener niveles apropiados, tiene un papel fundamental en el metabolismo celular en la transmisión de impulsos

nerviosos (mediante el mecanismo de bomba de sodio-potasio) y mantiene el volumen y la osmolaridad, también participa en la contracción muscular y la absorción de nutrientes por las células (Organización para la Agricultura y la Alimentación, s.f.). Respecto al sodio el consumo recomendado por día es de 200 a 500 mg, los valores obtenidos para *O. joconostle* (532 mg/100g) presentó el mayor aporte y *O. atropes* (383 mg/100g) resulto menor, cabe mencionar que todas las especies resultaron con valores mayores al consumo recomendado.

En la Figura 40 el ANOVA ($p=0.0115^*$) con una $p<0.05$ fue significativa. La concentración de sodio presente en el RS. Por lo cual la especie *O. joconostle* presentó el valor más elevado (532.5 mg/100g), para *O. atropes* fue el valor más bajo (383.2 mg/100g). En el mismo gráfico se muestra que *O. ficus-indica* presentó la media más cercana a la media general (462.4 mg/100g), la comparación de medias muestra que *O. joconostle* mantiene similitud con *O. streptacantha*, *O. hyptiacantha*, *O. ficus-indica* y *O. tomentosa*, esta ultima especie no presentó diferencia estadística con *O. atropes*.

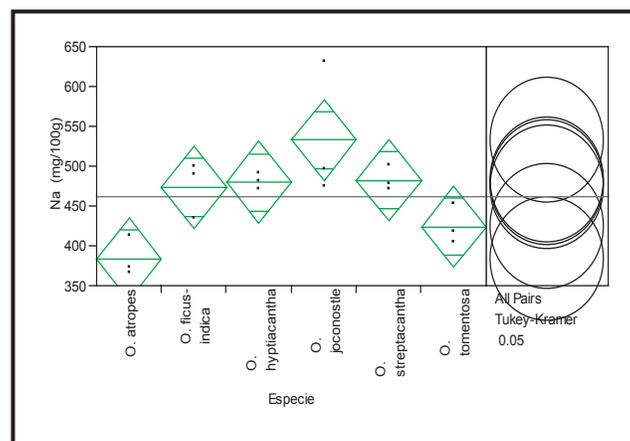


Figura 40. ANOVA y Prueba de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$), en las concentraciones de sodio mg/100g en las seis especies de *Opuntia*.

De acuerdo a los resultados obtenidos sobre el contenido de minerales (Ca, Mg, K y Na) es necesario consumir diariamente las siguientes cantidades de RS del nopal conforme a los requerimientos del organismo humano: (calcio) 8 g, (magnesio) 33 g, (potasio) 100 g y (sodio) 100 g, ya que el RS de las seis

especies de *Opuntia* poseen concentraciones mayores a las recomendadas en la dieta diaria, para calcio >12,500 mg/100g (aprox. 10 veces mayor al requerimiento diario) magnesio >1,000 mg/100g (aprox. 3 veces mayor al requerimiento diario), potasio >650 mg/100g (cercano al requerimiento diario) y sodio >450 mg/100g (cercano al requerimiento diario). Por lo tanto el RS de las seis especies de nopal puede ser considerado como fuente importante de estos minerales, sin embargo es necesario realizar estudios complementarios para confirmar la biodisponibilidad de tales minerales en el organismo.

En la Tabla 22 se muestran los resultados (concentraciones promedio) de cobre, hierro, níquel y zinc del RS de las seis especies de *Opuntia*, mediante los análisis por absorción atómica. El cobre presentó valores de 2.7 a 4.3 mg/100g, la especie *O. tomentosa* presentó el valor más bajo y *O. ficus-indica* presentó el valor más alto; mientras que las otras tres especies resultaron menores al límite de detección (1 mg/100g). En el caso del fierro se obtuvieron valores de 3.6 a 36.6 mg/100g donde *O. joconostle* obtuvo el valor más bajo y *O. ficus-indica* mostró el valor más elevado. Respecto al níquel se registraron valores de 0.6 a 1.5 mg/100g, en el caso de este elemento *O. ficus-indica* presentó la concentración más alta, *O. atropes*, *O. tomentosa* y *O. hyptiacantha* resultaron con los valores más bajos. Por último el zinc presentó concentraciones de 1 a 2 mg/100g, donde *O. atropes*, *O. joconostle* y *O. hyptiacantha* registraron los valores más bajos, *O. ficus indica*, *O. tomentosa* y *O. streptacantha* resultaron con los valores más altos.

Tabla 21. Concentraciones de Cu, Fe, Ni y Zn en el RS de las seis especies de *Opuntia*.

Especies	mg/100g			
	Cu	Fe	Ni	Zn
<i>O. ficus indica</i>	4.3±0.001 ^a	36.3±0.0008 ^a	1.5±0.0006 ^a	2±0.0004 ^a
<i>O. atropes</i>	4.1±0.003 ^a	3.9±0.0004 ^b	0.6±0.0008 ^b	1±0.0003 ^b
<i>O. tomentosa</i>	2.7±0.0003 ^a	5.4±0.0004 ^b	0.6±0.0005 ^b	2±0.0005 ^a
<i>O. joconostle</i>	<LD	3.6±0.0004 ^b	0.9±0.0006 ^b	1±0.0004 ^b
<i>O. streptacantha</i>	<LD	8.9±0.001 ^b	0.7±0.0004 ^b	2±0.0004 ^a
<i>O. hyptiacantha</i>	<LD	9.1±0.0008 ^b	0.6±0.0008 ^b	1±0.0002 ^b
LD	1	2	0.4	0.5

Nota: Los valores fueron expresados como promedios ± desviación estándar. Valores con letras diferentes dentro de una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0.05$). LD (<): limite de detección menor.

En la Figura 41 se muestra el ANOVA ($p<0.0001^*$) con una $P<0.05$ fue significativo. La concentración de hierro presente en el RS. Se muestra que *O. ficus-indica* obtuvo el valor más elevado (36.3 mg/100g) y *O. joconostle* presentó el valor más bajo (3.64 mg/100g), en el mismo gráfico se puede observar que *O. hyptiacantha* obtuvo la media más cercana a la media general (11.2 mg/100g). En el mismo gráfico, la comparación de medias muestra que *O. ficus-indica* (comercial) es estadísticamente diferente a las otras cinco especies (silvestres) en estudio, mientras que *O. hyptiacantha*, *O. streptacantha*, *O. tomentosa*, *O. atropes* y *O. joconostle* son estadísticamente iguales.

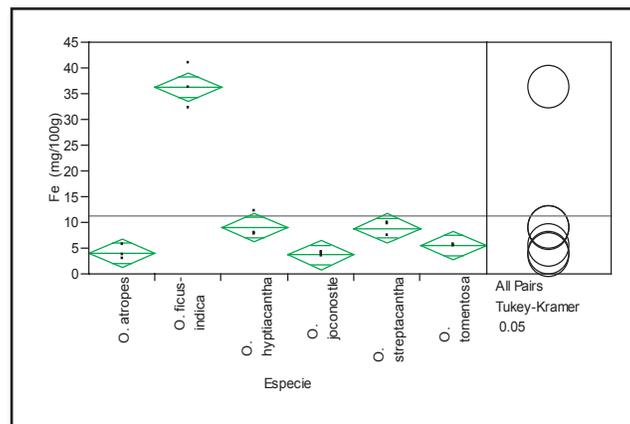


Figura 41. ANOVA y Prueba de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$), En la determinación de hierro mg/100g en las seis especies de *Opuntia*.

El ANOVA ($p=0.0002^*$) con una $p<0.05$ fue significativo. En la Figura 42 muestra las concentraciones de níquel presentes en el RS, *O. ficus-indica* presentó el valor más elevado (1.5 mg/100g) y *O. hyptiacantha* obtuvo el valor más bajo (0.6 mg/100g), también se puede observar que *O. joconostle* obtuvo la media más cercana a la media general (0.81 mg/100g). La comparación de medias muestra que *O. ficus-indica* es estadísticamente diferente a las cinco especies silvestres, mientras que *O. joconostle*, *O. streptacantha*, *O. tomentosa*, *O. atropes* y *O. joconostle* son estadísticamente iguales.

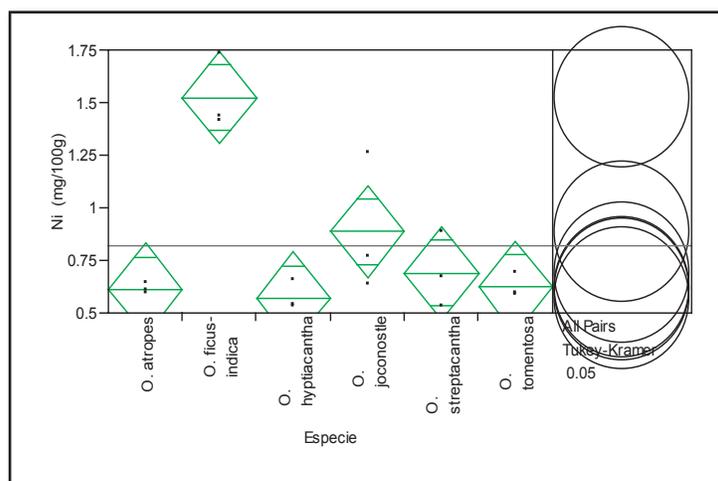


Figura 42. ANOVA y Prueba de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$), en la determinación de níquel mg/100g en las seis especies de *Opuntia*.

En la Figura 43, el ANOVA ($p=0.0008^*$) con una $p<0.05$ fue significativo. Para el zinc muestra que *O. tomentosa* presentó el valor más elevado (1.7 mg/100g) y *O. hyptiacantha* obtuvo el valor más bajo (0.8 mg/100g), también se puede observar que *O. ficus-indica* presentó la media más cercana a la media general (1.25 mg/100g). La comparación de medias indica que *O. tomentosa*, *O. streptacantha* y *O. ficus-indica* son estadísticamente iguales, mientras que *O. atropes*, *O. joconostle*, *O. hyptiacantha* también resultaron estadísticamente iguales.

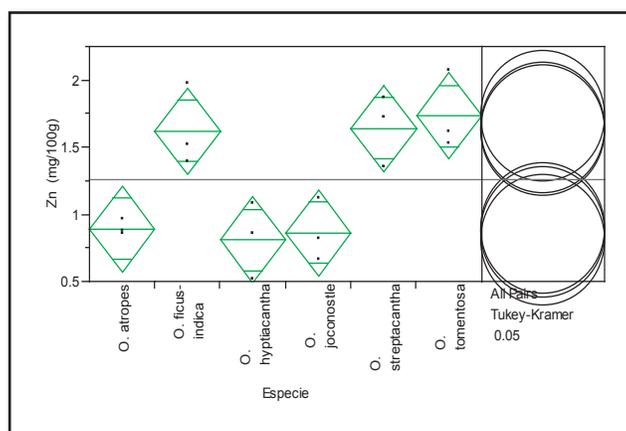


Figura 43. ANOVA y Prueba de Tukey-Kramer HSD ($\alpha=0.05$), en la determinación de zinc mg/100g en las seis especies de *Opuntia*.

De acuerdo a los resultados obtenidos sobre el contenido de minerales (Cu, Fe, Ni y Zn) es necesario consumir diariamente las siguientes cantidades de RS del nopal conforme a los requerimientos del organismo humano: (cobre) 37 g, (hierro) 100 g, (níquel) 4.3 g y (zinc) 1300 g, ya que el RS de las seis especies de *Opuntia* poseen concentraciones mayores a las recomendadas en la dieta diaria, para cobre >3.7 mg/100g (aprox. 3 veces mayor al requerimiento diario) hierro >11.2 mg/100g (cercano al requerimiento diario), níquel >0.8 mg/100g (aprox. 23 veces mayor al requerimiento diario) y zinc >1.5 mg/100g (aprox. 9 veces menor al requerimiento diario). Por lo tanto el RS de las seis especies de nopal puede ser considerado como fuente importante de minerales (excepto el Zn), sin embargo es necesario realizar estudios complementarios para confirmar la biodisponibilidad de tales minerales en el organismo. Las concentraciones de Ca, Mg y Na en RS de las seis especies de *Opuntia* son mayores a la dosis diaria recomendada por la Universidad Nacional de Educación a Distancia de España, mientras que el potasio (K) rebasó la dosis diaria recomendada en las especies de *O. atropes* con 719 mg/100g, *O. tomentosa* con 893 mg/100g y *O. streptacantha* con 1,084 mg/100g. En el caso del Cu y Ni se registraron concentraciones altas, para el Fe (excepto en la especie *O. ficus-indica* obtuvo 36.3 mg/100g) y para el Zn se registraron concentraciones bajas, comparadas con la dosis diaria recomendada para el consumo humano.

Tabla 22. Dosis diaria recomendada de minerales para consumo humano (Minerales).

MINERALES	DOSIS DIARIA RECOMENDADA (mg/día)
Calcio	800-1200
Magnesio	300-400
Sodio	200-500
Potasio	500
Hierro	10-15
Cobre	1.3-1.5
Níquel	0.035
Zinc	12-15

7.8. Microscopía electrónica de barrido

Se llevó acabo la MEB para observar la morfología de las muestras analizadas. De acuerdo a las micrografías de los RS del nopal para las diferentes especies, la morfología observada presentó diferentes características estructurales. *O. ficus-indica* “Nopal 1” (Figura 44) presenta un fragmento agrietado, con estrías, no presenta poros ni partes lisas y mide aprox. 800 μm . En la Figura 45 *O. tomentosa* “Nopal 2” se observa un fragmento de aprox. 400 μm agrietado con estrías más notables, *O. ficus-indica* “Nopal 1” y al igual que ésta, no presenta poros ni partes lisas. En la Figura 46 se observa un fragmento *O. hyptiakantha* “Nopal 3” que mide aprox. 800 μm , presenta estrías, grietas, huecos alargados y no presenta partes lisas. *O. streptakantha* “Nopal 4” presenta un fragmento con un tamaño de aprox. 450 μm , con poros similares a los de un panal, no presenta partes lisas, rugosas ni estrías (Figura 47).

Respecto a la especie *O. atropes* “Nopal 5” (Figura 48), presenta un fragmento de aprox. 450 μm con estrías y huecos lisos y alargados. Finalmente en la Figura 49, *O. joconostle* “Nopal 6” muestra un fragmento de aprox. 300 μm , totalmente agrietado, no presenta porosidad, ni partes lisas. Las micrografías de todas las muestras del RS del nopal presentan estructuras cilíndricas bien definidas con estrías, porosidad o grietas, esto promueve el incremento en índices de absorción de agua y de aceite.

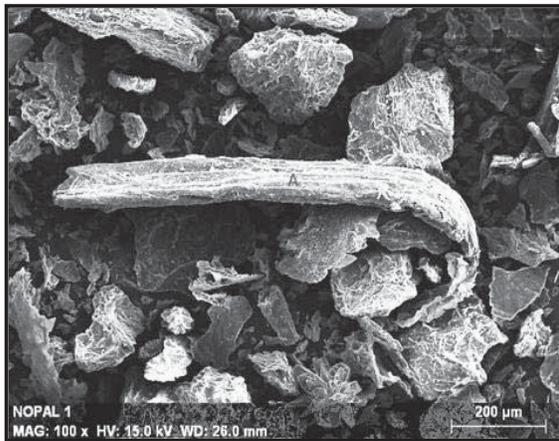


Figura 44. Microfotografía 100 x 200μm del RS de *O. ficus-indica*

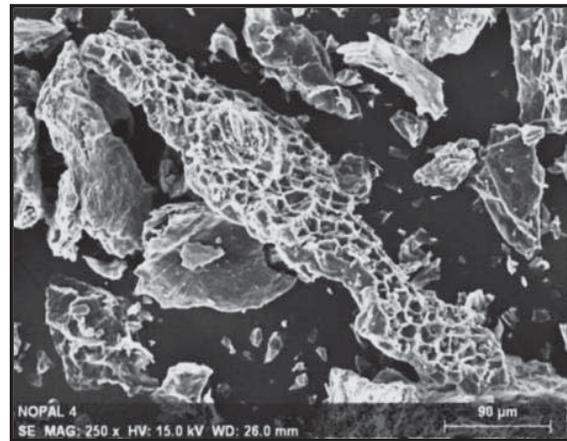


Figura 47. Microfotografía 250 x 90μm del RS de *O. streptacantha*

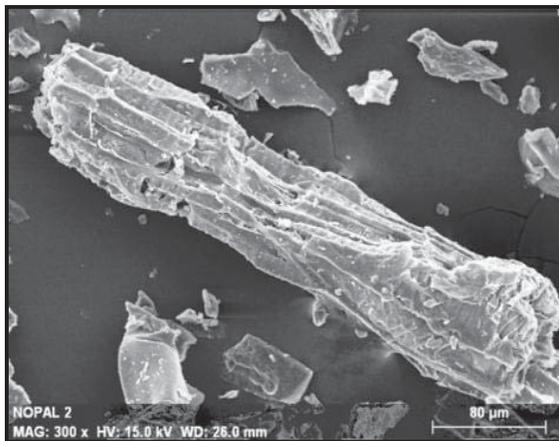


Figura 45. Microfotografía 300 x 80 μm del RS de *O. tomentosa*

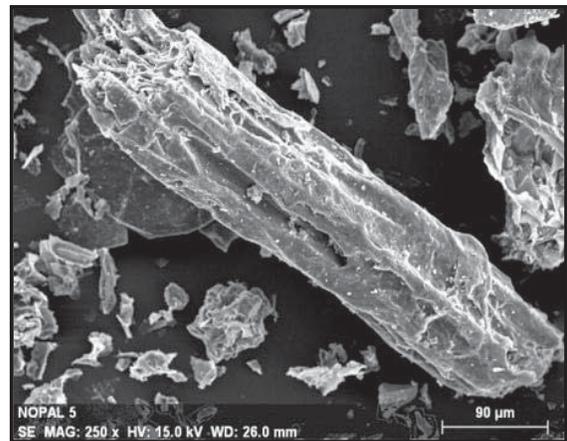


Figura 48. Microfotografía 250 x 90 μm del RS de *O. atropes*

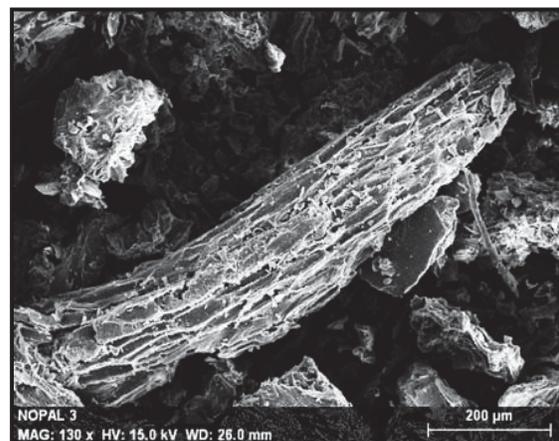


Figura 46. Microfotografía 130 x 200 μm del RS de *O. hyptiicantha*

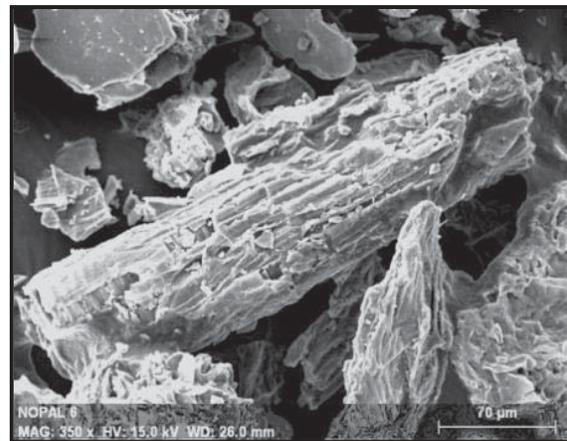


Figura 49. Microfotografía 350 x 70 μm del RS de *O. joconostle*

8. CONCLUSIONES

- La caracterización química de las especies de *Opuntia* muestran variaciones entre especies en cuanto a porcentajes de humedad, cenizas, lípidos y proteínas. Los carbohidratos mostraron diferencias notables entre especies, con porcentajes relativamente bajos para las especies *O. hyptiacantha* 11% y *O. ficus-indica* 9.09% y *O. tomentosa* con 3.7%.
- Los altos contenidos de FDT y FI reflejan que las especies *O. tomentosa* (silvestre) presentó un 67.7% de FDT y FI de 60%, *O. hyptiacantha* (silvestre) y *O. ficus-indica* (comercial) resultaron con aprox. 56% de FDT y alrededor de 50% de FI, lo que representa propiedades funcionales importantes en la tecnología de alimentos.
- Los análisis físico-químicos del RS de las cinco especies silvestres y la comercial resultaron con capacidades de absorción de agua y aceite similares, lo que puede ayudar a modular la velocidad de tránsito de los alimentos por el intestino. Respecto a la acidez, las variaciones indican diferencias entre especies con rangos que pueden ser aceptables en productos alimenticios.
- El tamaño de partícula obtenido para las seis especies de *Opuntia* es el recomendado para suplementos alimenticios que influyen en propiedades funcionales tales como la absorción de agua y aceite.
- El RS presenta características físico-químicas y funcionales que permiten hacer recomendaciones para su empleo en el desarrollo de productos alimenticios como opción para incrementar la ingesta de fibra dietética.
- De acuerdo a los análisis de espectrofotometría de absorción atómica el RS de las seis especies de *Opuntia* son una fuente importante de calcio, potasio y magnesio, y sodio. En el caso del cobre, níquel, se registraron concentraciones altas y para el Zn se registró valores bajos a la dosis diaria recomendada.

➤ Se encontraron diferencias estadísticas significativas en la composición química, físico-química y en los minerales determinados en los RS de las especies estudiadas, no obstante el valor nutricional es considerable para un uso benéfico hacia la salud humana. Sin duda, la posibilidad de utilización integral de estas especies es atractivo y de especial interés para el sector agroindustrial, ya que toda industria busca obtener el máximo aprovechamiento de la materia prima. Es una forma específica de aumentar la rentabilidad de la empresa y además se evita la eliminación de desechos.

9. RECOMENDACIONES

Se recomienda que estudios posteriores (bromatológicos y fisicoquímicos) sobre el RS de nopal se lleven a cabo en diferentes estaciones climatológicas y años, ya que estos aspectos son importantes en el estudio y mejoramiento de variedades de *Opuntia* para identificar aquellas variedades de mejor rendimiento nutricional.

Determinar las propiedades fisiológicas y digestibilidad *in vitro* de la fibra insoluble de las seis especies de *Opuntia* para conocer su comportamiento en el organismo.

10. PERSPECTIVAS

Posible industrialización de algunas especies de *Opuntia* del Estado de Michoacán, generando un aprovechamiento integral del nopal, con la obtención de por lo menos dos productos de valor agregado tales como el mucílago en polvo y la fibra insoluble de nopal, y su aplicación en las áreas farmacéutica y alimentaria.

Realizar un producto funcional a base de fibra insoluble para personas con problemas de estreñimiento y obesidad.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AACC. **American Association of Cereal Chemists**. 2000. Approved Methods. 10th edition. Ed. by the American Association of Cereal Chemists. Minneapolis, MN, USA.
- AACC. **American Association of Cereal Chemists**. 2001. Dietary fiber Technical Committee. The definition of dietary fiber. *Cereal Foods World*, 46:112-126.
- AOAC. **Official Methods of Analysis**. 1990. 15th edition. Association of Official Analytical Chemist, Washington, D. C.
- Abraján M. A. 2008. **Efecto del método de extracción en las características químicas y físicas del mucílago del nopal (*opuntia ficus-indica*) y estudio de su aplicación como recubrimiento comestible**. Tesis de Doctorado. Departamento de Tecnología de Alimentos. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España
- Aguilar-Sánchez, L., Martínez-Damián, T., Barrientos-Priego, A.F.; Aguilar-Gallegos, N., Gallegos-Vásquez, C. 2007. **Potencial Oscurecimiento Enzimático de Variedades de Nopalitos**. *J. PACD* (9):165-184
- Altan, A., McCarthy, K. L., Maskan, M. 2008. **Evaluation of snack foods from barley-tomato pomace blends by extrusion processing**. *Journal of Food Engineering*, 84: 231-242.
- Anderson, R.A., Conway, H.F. 1969. **Effect of Processing on dietary fibre content of wheat bran, pureed green beans and carrots**. *Journal of Food Science* (45):1533-1537.
- Anónimo. 2009. **Fibra dietética: múltiple beneficios para la salud**. <http://nutrahealthfood.com/wp-content/uploads/2010/01/Fibra-Dietetica-Multiples-Beneficios-Para-La-Salud.pdf> (Accesada en Julio de 2012)

Anónimo. s.f. **Guía nutricional**. <http://www.uned.es/pea-nutricion-y-dietetica/l/guia/PDF/Guia%20de%20Alimentacion%20y%20Salud%20%20Guia%20Nutricional.pdf> (Accesada en Julio de 2012)

Anónimo. s.f. **Manual de Nutrición**.

<http://www.lawebdelcalifa.net/manualdenutricion/manualdenutricion.pdf> (Accesada en Junio de 2012).

Anónimo. s.f. **Repositorio Digital**.

<http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/554/2/03%20AGI%20TESIS%20250%20CAPITULO%20%20I-II%20-III.pdf> (Accesada en Mayo 2012)

Anónimo. s.f. **En buena salud**.

http://books.google.com.mx/books?id=kuVS_t3v4S0C&printsec=frontcover&dq=buena+salud+libro&source=bl&ots=GWiA0xlaYk&sig=B_2Q_5_lumsJpSule_5_57k2fSo&hl=es&sa=X&ei=gUFyUM#v=onepage&q=buena%20salud%20libro&f=false (Accesada en septiembre de 2012)

Ávila-García, L., Corona-Nava, R.M., Fernández-Cabrera, J.C. 1994. **Deshidratación del Nopal por fluidización**. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Metropolitana (UAM-Iztapalapa). México, D.F.

Balanzá, R.R. 2008. **Efectos metabólico-terapéuticos a corto y largo plazo de la suplementación con fibra dietética**. Tesis de Doctorado. Universidad de Rovira I Virgili. Barcelona, España.

Bautista-Justo, M., Pineda, R. I., Camarena-Aguilar, E., Alanís-Guzman, G., Da Mota, V.M. y Barboza-Corona, J.E. 2010. **El nopal fresco como fuente de fibra y calcio en panqués**. *Acta Universitaria* (20):11-17.

- Badui, D. S. 2006. Química de los alimentos. 4 ed. Pearson Addison Wesley. México. pp. 92-93.
- Bravo H.H.1978. Las cactáceas de México.Tomo I. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. México,D.F.pp 1-19,62-83,166-170.
- Brennan, C., Brennan, M., Derbyshire, E.,Tiwari, B. K. 2011. **Effects of extrusion on the Polyphenols, vitamins and antioxidant activity of foods.** *Trends in Food Science y Technology*, 22: 570-575.
- Carballo, F. J., González G. K. I. s.f. **Beneficios del nopal en diversas enfermedades.** <http://www.acmor.org.mx/cuam/2008/235-nopal%20.pdf> (Accesada en Julio 2012)
- Casas, A., Barbera, G. 2002. Mesoamerican Domestication and Diffusion. En: P.S. Nobel, Cacti: Biology and Uses. Universidad de California, Los Ángeles. pp. 143-162.
- Castaño, M.E. 2004. **El mayor consumo de fibra no siempre significa mejorar la salud.** *Hacia la promoción de la salud.* (9):17-25.
- Clínica Universidad de Navarra. 2011. **Minerales** <http://www.cun.es/area-salud/salud/nutricion-salud/minerales> (Accesada en Julio de 2012)
- Corrales-García, J. 2010. **Perspectivas agroindustriales de la postcosecha de nopalito y tuna.** Memorias del IX Simposium-Taller Nacional y II Internacional, Producción y Aprovechamiento del Nopal y Maguey. pp. 2-22. Escobedo, Nuevo León.

- Esparza-Sandoval, S. 2010. **Distribución Geográfica del Género Opuntia (Cactaceae) en México**. Tesis de Maestría. Facultades de Ciencias Químicas, Ingeniería y Medicina. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, San Luis Potosí
- Flores-Ortiz, M.A., Reveles-Hernández, M. 2010. **Producción de Nopal Forrajero de Diferentes Variedades y Densidades de Plantación**. Memorias VIII Simposium-Taller Nacional y 1er Internacional “Producción y Aprovechamiento del Nopal”. Monterrey, Nuevo León. p. 198.
- Flores-Valdez, C.A., de Luna Esquivel, J.M. y Ramírez-Moreno, P.P. 1995. **Mercado mundial del nopalito**. Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria (ASERCA), Universidad Autónoma Chapingo (UACH), Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y de la Agricultura Mundial (CIESTAAM), Chapingo, Estado de México.
- García, L. N. I. 2003. **Caracterización fisicoquímica y funcional de los residuos fibrosos de mango criollo (*Mangifera indica L*) y su incorporación en galletas**. Tesis de Licenciatura. Universidad Tecnológica de la Mixteca. Huajuapán de León. Oaxaca.
- García-Zambrano, E.A., Gutiérrez-Diez, A., Salinas-García, G. E., Cárdenas-Cerda, E., Vázquez-Alvarado, R.E., Zavala-García, F., Martínez de la Cerda. 2006. **Clasificación y estimación de la diversidad genética de nopal *Opuntia spp.* En base a descriptores fenotípicos y marcadores genético moleculares**. *J. PHYTON* (75): 125-135.
- Granados, S. Diodoro. 1991. Castañeda P. Ana: **“El nopal (historia, fisiología, genética e importancia frutícola)”** Primera Edición. Editorial Trillas S.A. México.

- Hutchings, B. J. 1999. **Food color and appearance. Second Edition.** Ed. Aspen Publisher. USA p.p. 610.
- Instituto Nacional de Ecología (INE). 2007. **Nopal Verdura**
<http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/71/nverdura.html> (Accesada en Junio 2012)
- Linaje Treviño, M., de la Fuente Salcido. N. 2007. **Evaluación Sensorial de Yogurt adicionado con Nopal (*Opuntia ficus indica*) como Alimento Funcional.** Memorias del IX Congreso de Ciencia de los Alimentos y V Foro de Ciencia y Tecnología de Alimentos. Guanajuato, Gto. 47-54 pp.
- Loayza, D.G., Chávez, J. 2007. **Estudio Bromatológico del cladodio del nopal (*Opuntia ficus-indica*) para el consumo humano.** *Rev. Soc. Quím. Perú*, (73):41-45.
- López-Palacios, C. 2011. **Contenido y caracterización reológica de los polisacáridos estructurales de nopalitos (*Opuntia* spp.) en un gradiente de domesticación.** Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México.
- Loubet, G. A.L. 2008. **Biodisponibilidad de calcio presente en harina de nopal (*Opuntia ficus-indica*) en función a su estado de maduración.** Tesis de licenciatura. Instituto de Ciencias de la Salud. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca, Hidalgo.
- Maldonado, R. E. s.f. **Estudio de los cambios en el metabolismo C3-CAM durante el desarrollo de nopal (*Opuntia inermis*) en base a la actividad específica del fosfoenol piruvato carboxilasa y otros parámetros**
http://tesis.uson.mx/digital/tesis/wsp_tesis_detalle_nuevo.asp?tesis=976
(Accesada en Junio de 2012)

- Mandujano, R. R. R. 2006. **Estudio preliminar de los pigmentos presentes en cáscara de pitaya (*stenocereus stellatus*) de la región mixteca.** Tesis de Licenciatura. Universidad Tecnológica de la Mixteca. Huajuapam de León. Oaxaca
- Manrique, D. O. 1996. **Efecto del mucílago hidrofílico de la pala de la tuna (*Opuntia ficus-indica*) sobre evacuación intestinal en vacunos.** Tesis de Licenciatura. Universidad Católica Santa María. Arequipa, Peru.
- Margalef, M.A., Estrada, L., Susana, L., Jiménez, M.L., Villa, D. 2012. **Formulación de fideos secos tipo tallarines con harina de nopal (*Opuntia ficus indica* L Millar) de alto contenido en fibra.** http://www.publitech.com/system/noticias.php?id_prod=248 (Accesada en septiembre de 2012).
- Martínez-Flores, H.E., Figueroa, J.D.C. 2008 **La fibra dietética y su importancia en la salud. Temas selectos en alimentos, nutrición y salud.** Facultad de Químico Farmacobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán.
- Mateos-Aparicio, C.I. 2008. **Aprovechamiento de subproductos de leguminosas para la obtención de ingredientes funcionales. Comparación de metodologías para la caracterización de la fibra alimentaria.** Tesis de Doctorado, Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España.
- Matos-Chamorro, A., Chambilla-Mamani, E. 2010. **Importancia de la fibra dietética, sus propiedades funcionales en la alimentación humana y en la industria aliemntaria.** *Revist. Investig. Cienc. Tecnol. Aliment.* 1 (1):4-17

Molina, M. M. E., Martín I. A. P. 2007. **La fibra dietética procesada como alimento funcional.** *OFFARM.* 26 (1):70-77.

Montesinos, A.R. 2003. **Especificación cromática de gamas de colores usadas en la industria del calzado.** <http://web.ua.es/es/gvc/documentos/docs/colores-curtidos.pdf> (Accesada en Julio de 2012)

Mora, B.M.T. 2009. **Establecimiento de las propiedades fisicoquímicas de la fibra dietética medidas *In Vitro* que permitan predecir su posible comportamiento fisiológico *In Vivo*.** Tesis de Licenciatura. Facultad de Químico Farmacobiología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán.

Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO). s.f. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/005/w0073s/W0073S00.pdf> (Accesada en Mayo de 2012)

Pincheira P., Ritter E. s.f. **Fibra dietética y sus diversos beneficios para la salud.** http://www.nestleprofessional.com/chile/es/PublishingImages/ProductosMarcas/nutripro_en_10.pdf (Accesada en Junio de 2012)

Priego, M.N. 2007 **Obtención de fibra dietética a partir de sáculos de naranja aplicando un tratamiento con vapor.** Tesis de Licenciatura. Universidad Tecnológica de la Mixteca. Huajuapán de León, Oaxaca

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

- Quiguango., W.K. 2011. **Utilización de la penca del nopal (*Opuntia ficus-indica*) para la elaboración de jugo**. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería en ciencias Agropecuarias y ambientales. Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador.
- Ramírez, A., de Delahaye, E.P. 2009. **Propiedades funcionales de harinas altas en fibra dietética obtenidas de piña, guayaba y guanábana**. *Interciencia*. (34):293
- Rayas, D.P., Romero, B.A. 2008. **Fibra a base de frutas, vegetales y cereales: Función de salud**. *Revista Mexicana de Agronegocios*. (23):613-619
- Rayas P. s.f. **Fiber: Bulk of life**.
<http://pods.dasnr.okstate.edu/docushare/dsweb/Get/Rendition-3973/unknown> (Accesada en Junio de 2012)
- Rivas Reyes, C. 2010. **Microencapsulación y enzimática del jugo de chirimoya (*Annona Cherimola Mill*)**. Tesis de Maestría. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología. Instituto Politécnico Nacional. Mexico, D.F.
- Rodríguez-Félix, A., Villegas-Ochoa, M. A., Fortiz-Hernández, J. 2007. **Efecto de cubiertas comestibles en la calidad de nopal verdura (*Opuntia spp.*) durante el almacenamiento refrigerado**. *Journal of the professional asosation for cactus develoment*. (S/V):22-42
- Ruiz, H.F., Guerrero, B.J.A. 2009. **Aplicación de las películas comestibles a base de quimostato y mucílago de nopal en fresa (*Fragaria ananasa*) en refrigeración**. Tesis de maestría. Ciencia en alimentos. Universidad de las Américas Puebla. Puebla, Puebla.

- Sáenz, C., Berger H., Corrales García J., Galletti L., García de Cortázar V., Higuera I., Mondragón C., Rodríguez A., Sepúlveda E., y M. Varnero 2006. **“Utilización Agroindustrial del Nopal” Boletín de Servicios Agrícolas de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación** FAO, Roma, Italia; 162: 60.
- Sáenz, C., Berger, H., Corrales, G.J., Galletti, L., García, C.V., Higuera, I., Mondragón, C., Rodríguez, A.F., Sepúlveda, E. y Vanero, M.T. 2006. **Utilización agroindustrial del nopal.** Boletín de servicios de la FAO. Roma, Italia. pp.13.
- Salas, Y.A., Colque, M.C., Lazo, A.B., Corymanya, R.C., Obregón, C.L. 2008. **Obtención y caracterización fisicoquímica y funcional de las fibras dietéticas del níspero común.** *Rev. Soc. Quím. Perú.* 74 (4):269-281
- Sánchez-Guzmán, B. S. 2005. **Caracterización Fisicoquímica y Funcional de la fibra Dietética del Fruto del Níspero (*Eriobotrya japonica*) y de la Cáscara de Mango Obo (*Mangifera Indica L.*).** Tesis de Licenciatura. Universidad Tecnológica de la Mixteca. Huajuapán de León
- Santos, D.C., Santos, M.V.F., dos Farias, I., Dias, F.M., Lira, M. de A. 2001. **Desempleo productivo de vacas 5/8 Holando/Zebu alimentadas con diferentes cultivares de palma forrageira (*Opuntia e nopalea*).** *R. Bras. Zootec.* 30 (1):12-17.
- Sequeira, A.C. 2005 **Caracterización de propiedades relacionadas con la textura de suspensiones de fibras alimentarias.** Tesis de Doctorado. **Universidad Politécnica de Valencia.** Valencia, España.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2009. Con información de las Delegaciones de la SAGARPA.

Silva M.D.A. 2007. **Documentación y estandarización de la técnica para la determinación de fibra en productos alimenticios para el laboratorio de análisis de agua y alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira.** Tesis de Licenciatura. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia.

Torres-Sales, A. 2010. Composición química del nopal y sus implicaciones en la nutrición de rumiantes (experiencias de Brasil). *IX Simposium-Taller Nacional y II Internacional de Producción del nopal y maguey.* Monterrey, Nuevo León.

Suriguez, M. s.f. **Carbohidratos: clasificación y funciones**

<http://www.enbuenasmanos.com/articulos/muestra.asp?art=57> (Accesada en Junio de 2012).

Torres-Sales, A. 2010. **Composición química del nopal y sus implicaciones en la nutrición de rumiantes (experiencias de Brasil).** Memorias del *IX Simposium-Taller Nacional y II Internacional de Producción del nopal y maguey.* Monterrey, Nuevo León. 143-151 pp

Valdez, R.D., Macías, F.D., Vázquez, A.R.E., Quintanar, R.F. 2008. **Producción y usos del nopal para verdura.** *Revista Salud Pública y Nutrición. Edición especial.* (14):1-19

Vázquez, G. O. 1994. **Extracción de coagulantes naturales del nopal y aplicaciones en la clarificación de aguas superficiales.** Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, Nuevo León

Villa, G.I., Muñoz-Jiménez, J.L. 2011. **Efecto del nopal en el control del paciente diabético en el municipio de Amatlán de los reyes, Veracruz.** Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Veracruzana. Orizaba, Veracruz.

Yagci, S., Gogus, F. 2009. **Effect of incorporation of various food by-products on some nutritional properties of rice-based extruded foods.** *Food Science and Technology International*, 15(6): 571- 581.

Zavala, M.E. 2012. **Optimización del proceso de extracción del mucílago de cinco especies de Opuntia (L.) Miller de Michoacán.** Tesis de Maestría, Facultad de Químico Farmacobiología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán.

Zegarra, M.G., Montesinos, S. s.f. **Aplicaciones de la microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis de fractura de una aleación de Cu- 10 Al.** <http://cabierta.uchile.cl/revista/28/articulos/pdf/edu3.pdf> (Accesada en Julio de 2012).