



COLEGIO DE POSTGRADUADOS
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE BOTÁNICA

**Contenido y caracterización reológica de los
polisacáridos estructurales de nopalitos
(*Opuntia* spp.) en un gradiente de
domesticación**

CRISTIAN LÓPEZ PALACIOS

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2011

La presente tesis, titulada “**Contenido y caracterización reológica de los polisacáridos estructurales de nopalitos (*Opuntia spp.*) en un gradiente de domesticación**”, realizada por el alumno: **Cristian López Palacios**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
BOTÁNICA**

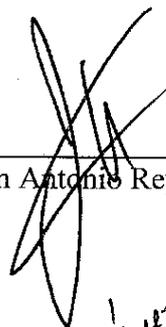
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA



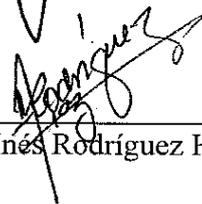
Dra. Cecilia Beatriz Peña Valdivia

ASESOR



Dr. Juan Antonio Reyes Agüero

ASESORA



Dra. Adriana Inés Rodríguez Hernández

ASESOR



Dr. José Rodolfo García Nava

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Noviembre de 2010

CONTENIDO Y CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE LOS POLISACÁRIDOS ESTRUCTURALES DE NOPALITOS (*Opuntia* spp.) EN UN GRADIENTE DE DOMESTICACIÓN

Cristian López Palacios, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2011

Evidencias diversas indican que la domesticación del género *Opuntia* comenzó con la selección de variantes de *O. streptacantha*, seguida de *O. hyptiacantha* y *O. megacantha* y se centró en *O. albicarpa* y *O. ficus-indica*. Las causas por las cuales se domesticó *Opuntia* fueron por sus frutos y nopalitos. Los polisacáridos más abundantes en los nopalitos son del tipo estructural. La hipótesis que se plantea es que los polisacáridos muestran un gradiente de concentración y sus propiedades reológicas han sido modificadas en función del grado de domesticación de *Opuntia*. Los polisacáridos estructurales fueron extraídos de cladodios jóvenes de 14 variantes pertenecientes a especies representantes del gradiente de domesticación (*O. streptacantha*, *O. hyptiacantha*, *O. megacantha*, *O. albicarpa* y *O. ficus-indica*) con disolventes acuosos (agua, oxalato de amonio e hidróxido de potasio), precipitados con etanol, purificados por lavado acuoso y diálisis contra agua y cuantificados gravimétricamente después de ser liofilizados. La caracterización reológica se efectuó a 25°C de las soluciones/dispersiones al 0.5 % (p/v) de cada grupo de polisacáridos de las variantes Coloradita, Amarillo Montesa y Atlixco, de *O. streptacantha*, *O. megacantha* y *O. ficus-indica*, respectivamente, con una geometría de cilindros concéntricos de doble pared. Hubo diferencias significativas ($p < 0.05$) entre variantes y especies en contenido de los polisacáridos. Los mucílagos fueron los más abundantes ($p < 0.05$) en *O. hyptiacantha* y *O. ficus-indica*. El contenido de pectinas, hemicelulosas débilmente y fuertemente unidas fue mayor ($p < 0.05$) en *O. streptacantha* y *O. megacantha* en comparación con las otras tres especies. Las cinco especies presentaron contenido similar de celulosa, fibra soluble e insoluble ($p > 0.05$); pero, *O. streptacantha* presentó más fibra alimentaria ($p < 0.05$). Aunque el contenido de mucílago o pectinas no mostró relación inversa con el grado de domesticación, el análisis de componentes principales con la proporción de los polisacáridos estructurales y fibra alimentaria demostró la cercanía entre *O. streptacantha*, *O. megacantha* y *O. ficus-indica*; esto puede tomarse como evidencia de que la domesticación de *O. ficus-indica* inició con la selección de variantes de estas dos especies. Las curvas de flujo de cada grupo de polisacáridos fueron similares entre las especies y se ajustaron al modelo Ostwald-De Waele (Ley de la Potencia). En mucílago *O. megacantha* tuvo el índice de flujo mayor (0.6158) mientras que en las pectinas fue el menor (0.53) ($p < 0.05$); para las

hemicelulosas débilmente unidas el valor menor (0.8168) lo registró *O.ficus-indica*. La celulosa de *O. streptacantha*, el mucílago y las hemicelulosas débilmente unidas de *O. ficus-indica* presentaron el coeficiente de consistencia mayor ($0.0851 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.17}$, $0.1770 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.53}$ y $0.0094 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.82}$, respectivamente). El contenido de polisacáridos estructurales de *Opuntia* fue modificado durante la domesticación, así como sus propiedades reológicas. Las características reológicas de los polisacáridos que constituyen la fibra alimentaria soluble pueden haber sido parte de los criterios de selección por los humanos de unas u otras variantes de nopalito durante el proceso de humanización.

Palabras clave: *Opuntia*, gradiente de domesticación, reología, fibra alimentaria, mucílagos, pectinas, hemicelulosas, celulosa.

**CONTENT AND RHEOLOGICAL CHARACTERIZATION OF STRUCTURAL
POLYSACCHARIDES OF NOPALITOS (*Opuntia* spp.) IN A
DOMESTICATION GRADIENT**

**Cristian López Palacios, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2011**

There is diverse evidence that the domestication of *Opuntia* began with the selection of variants of *O. streptacantha*, followed by *O. hyptiacantha* and *O. megacantha* and it was intensified on *O. albicarpa* and *O. ficus-indica*. In nopalitos, the polysaccharides are mainly of structural type. The hypothesis is that the nopalitos polysaccharides show a concentration gradient and their rheological properties have been modified in direct proportion of the *Opuntia* domestication gradient. The structural polysaccharides of 14 variants of nopalitos of *Opuntia* spp. in a domestication gradient (*O. streptacantha*, *O. hyptiacantha*, *O. megacantha*, *O. albicarpa* and, *O. ficus-indica*) were extracted. The polysaccharides were sequentially extracted with aqueous solvents (water, ammonium oxalate and potassium hydroxide), precipitated with ethanol, purified by water-washing and dialysis against water and gravimetrically quantified after being lyophilized. The rheological characterization was carried out at 25°C using concentric cylinders of double wall; there were used solutions/dispersions of 0.5 % (w/v) of each polysaccharide of the Coloradita, Amarillo Montesa and Atlixco variants, of *O. streptacantha*, *O. megacantha* and *O. ficus-indica*, respectively. There were significant differences ($p < 0.05$) between variants and species in the polysaccharides content. Mucilages were more abundant ($p < 0.05$) in *O. hyptiacantha* and *O. ficus-indica*. The content of pectins, loosely and tightly bound hemicelluloses was higher ($p < 0.05$) in *O. streptacantha* and *O. megacantha* in comparison with the other three species. All five species contained similar proportion of cellulose, soluble and insoluble fiber ($p < 0.05$); but, *O. streptacantha* presented the highest dietary fiber content ($p < 0.05$). Although mucilage or pectins content did not show a relationship with domestication, the analysis of principal components of the proportion of structural polysaccharides demonstrated the closeness of *O. streptacantha* and *O. megacantha*; it can be an evidence that *O. ficus-indica* domestication began with selection of variants of these two species. The flow curves of each polysaccharide were similar between species and they followed the Ostwald-De Waele or Power Law model trend. Mucilages and pectins of *O. megacantha* had the higher and the lower flow index 0.62 and 0.53, respectively, and loosely bound hemicelluloses the lower in *O. ficus-indica* was the lowest (0.8168). The flow index for loosely bound hemicelluloses (0.90 and 0.97) and cellulose (0.17 and 0.41) were similar between species ($p > 0.05$).

The consistence coefficient of cellulose of *O. streptacantha*, pectins and loosely bound hemicelluloses of *O. ficus-indica* was the highest ($0.0851 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.17}$, $0.1770 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.53}$ and $0.0094 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.82}$, respectively). The content of structural polysaccharides of *Opuntia* was modified during domestication as well as the rheological properties. The rheological characteristics of the polysaccharides from soluble dietary fiber could be part of the selection criteria by the humans during the domestication process.

Keywords: *Opuntia*, domestication gradient, rheology, dietary fiber, mucilages, pectins, hemicelluloses, cellulose.

A mis padres, Manuela y Antonio, por todo su cariño y apoyo, los quiero.

A mis hermanos, Lulú, July, Toño, Luis y Cesar, que siempre están para apoyarme y alentarme a seguir.

A México, tierra de gente buena, trabajadora y honesta.

Agradecimientos

Al pueblo de México que gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología me otorgó la beca que permitió formarme como MC.

Al Colegio de Postgraduados, a sus profesores, trabajadores y compañeros, gracias por permitirme ser parte de esta comunidad y contribuir en mi formación de posgrado.

A la Dra. Cecilia Peña, mi consejera, gracias por su disposición de tiempo, paciencia, comprensión, calidez humana y por compartir sus conocimientos y experiencia en la investigación.

Al Dr. Toño Reyes, quien me impulsó a ingresar al Colegio de Postgraduados para realizar mis estudios de maestría, gracias por sus consejos, recomendaciones y asesoría para la investigación; también agradezco todo su apoyo en la cosecha de los nopalitos.

A la Dra. Adriana Rodríguez, agradezco su tiempo, asesoría y recomendaciones en la parte reológica. Sin su ayuda no hubiera sido posible entender este tema completamente nuevo para mí.

A los Dres. Rodolfo García y Carlos Trejo por calidad y calidez humana.

Agradezco de manera especial al Dr. Clemente Gallegos del CRUCEN por facilitarme el material vegetativo para el desarrollo del experimento.

Al Dr. Miguel Ángel Ruíz de la Facultad de Ciencias Químicas de la UASLP y al equipo de trabajo a su cargo por facilitarme el liofilizador durante el tiempo en que el Colegio estuvo penosamente cerrado.

A la Dra. Laura Yañez, agradezco el haberme proporcionado los reactivos requeridos para determinar la presencia de lignina.

Al MC Jorge Romero por su amistad y apoyo, gracias.

Al Dr. Hugo Ramírez, por tu amistad y compañerismo, tus consejos tan acertados, por la confianza y las pláticas siempre tan amenas, a ti y a tu familia, que desinteresadamente me abrió las puertas de su hogar, no me queda más que darte las gracias.

A los compañeros de laboratorio Ayné, Erasmo, Mayra, Gisela, Ana B., Huitzi, Fran, Rosario, Dra. Raquel, Dra. Rosario, Dr. Balois y Dr. Trejo con los que compartí ésta etapa, gracias.

A mis grandes amigos Alma, Paty, Oralia, Alex, Lalo, Pepe, Javier y Víctor que a pesar del tiempo y la distancia siempre están ahí para dar ánimos y compartir las alegrías de la vida.

A todos aquellos que en estos momentos no traigo a mi mente, pero que me ayudaron y apoyaron en esta etapa de mi vida, gracias...

Contenido

Capítulo I. Introducción general	1
Literatura citada	3
Capítulo II. Revisión de literatura.....	7
Importancia del nopal	7
Taxonomía y morfología.....	7
Serie Ficus-indicae.....	8
Serie Streptacanthae.....	9
Domesticación.....	11
Concepto	11
Proceso de domesticación de <i>Opuntia</i>	12
Polisacáridos de origen vegetal.....	15
Reología	19
Concepto	19
Esfuerzo y deformación	19
Velocidad de cizalla.....	22
Fluidos Newtonianos y no-Newtonianos	22
Viscosidad.....	23
Modelos reológicos.....	24
Literatura citada	26
Capítulo III. Polisacáridos estructurales de nopalitos (<i>Opuntia</i> spp.) en un gradiente de domesticación	32
Resumen.....	32
Abstract	33
Introducción	34
Materiales y métodos	37
Resultados y discusión.....	39
Características morfológicas.....	39
Polisacáridos estructurales	45
Conclusiones	60
Literatura citada	60

Capítulo IV. Caracterización reológica de polisacáridos estructurales de nopalitas (<i>Opuntia</i> spp.) en un gradiente de domesticación.....	65
Resumen.....	65
Abstract.....	66
Introducción.....	67
Materiales y métodos.....	70
Material biológico.....	70
Extracción y purificación de polisacáridos estructurales.....	70
Mediciones reológicas.....	71
Diseño experimental.....	72
Resultados y discusión.....	72
Atributos morfológicos.....	72
Polisacáridos estructurales.....	73
Conclusiones.....	85
Literatura citada.....	86
Capítulo V. Discusión general.....	91
Literatura citada.....	93
Capítulo VI. Conclusiones generales.....	95

Lista de cuadros

Capítulo II

- Cuadro 2.1** Porcentaje de fibra detergente neutro (FDN) y fibra detergente ácido (FDA) en *Opuntia* spp.19
- Cuadro 2.2** Modelos reológicos para describir el comportamiento de los fluidos independientes del tiempo (Steffe, 1996).....25

Capítulo III

- Cuadro 3.1** Características morfológicas de nopalitos de 17.5 ± 2.5 cm, de cinco especies de *Opuntia*.....40
- Cuadro 3.2** Valores propios y varianza acumulada de los CP1, CP2 y CP3 de siete atributos morfológicos de 14 variantes de nopalitos (*Opuntia* spp.).41
- Cuadro 3.3** Caracterización morfológica de nopalitos de variantes de especies pertenecientes a un gradiente de domesticación de *Opuntia*.43
- Cuadro 3.4** Porcentaje de biomasa seca de nopalitos de variantes de cinco especies de *Opuntia* representantes de un gradiente de domesticación.44
- Cuadro 3.5** Contenido de polisacáridos estructurales de nopalitos de cinco especies de *Opuntia* pertenecientes a un gradiente de domesticación.46
- Cuadro 3.6** Contenido de fibra alimentaria en nopalitos de 14 variantes de *Opuntia* spp.53
- Cuadro 3.7** Valores propios y varianza acumulada de los CP1, CP2 y CP3 de la composición de polisacáridos estructurales y fibra alimentaria de 14 variantes de nopalito (*Opuntia* spp.).55
- Cuadro 3.8** Valores propios y varianza acumulada de los CP1, CP2 y CP3 de las características morfológicas y de la composición de polisacáridos estructurales de 14 variantes de nopalito (*Opuntia* spp.).59

Capítulo IV

- Cuadro 4.1** Características morfológicas de nopalitos de tres variantes correspondientes a tres especies de *Opuntia*.....73
- Cuadro 4.2** Contenido de polisacáridos estructurales (g/100 g de materia seca) de tres variantes de nopalitos representantes de tres especies de *Opuntia*.74

Cuadro 4.3 Coeficiente de consistencia (K) e índice de flujo (n) de polisacáridos estructurales de nopalitos (<i>Opuntia</i> spp.), estimados con la ecuación de Ostwald-De Waele.	76
Cuadro 4.4 Índice de flujo (adimensional) de polisacáridos estructurales de nopalitos de variantes de tres especies de nopalitos de <i>Opuntia</i>	77
Cuadro 4.5 Coeficiente de consistencia ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$) de polisacáridos estructurales de tres especies de nopalitos (<i>Opuntia</i> spp.).....	78

Lista de figuras

Capítulo II

- Figura 2.1** Clasificación de la fibra alimentaria, con base en Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta (2004).16
- Figura 2.2** Representación grafica del típico esfuerzo (σ) aplicado sobre un material (Steffe, 1996).....20
- Figura 2.3** Deformación por cizalla (γ) en una barra según Steffe (1996).21
- Figura 2.4** Comportamiento de la viscosidad (η), en fluidos newtonianos y no-newtonianos (reofluidificantes y reoespesantes), respecto a la velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$).23

Capítulo III

- Figura 3.1** Representación gráfica de los tres primeros componentes principales (CP) de siete atributos morfológicos de 14 variantes de nopalitos de cinco especies (● *Opuntia streptacantha*, ● *O. hyptiacantha*, ▼ *O. megacantha*, ▲ *O. albicarpa*, ■ *O. ficus-indica*) representantes de un gradiente de domesticación.....42
- Figura 3.2** Mucílago en nopalitos de 14 variantes de cinco especies de *Opuntia* representantes de un gradiente de domesticación, + el error estándar.45
- Figura 3.3** Pectina en nopalitos de 14 variantes de cinco especies de *Opuntia* representantes de un gradiente de domesticación, + el error estándar.48
- Figura 3.5** Hemicelulosas (A) débilmente (■) y fuertemente unidas a la celulosa (■) y, celulosa (B) en nopalitos de 14 variantes de cinco especies de *Opuntia* representantes de un gradiente de domesticación, + el error estándar.50
- Figura 3.6** Efecto de la especie en el contenido de fibra alimentaria soluble (■) e insoluble (■) en nopalitos de cinco especies de *Opuntia* representantes de un gradiente de domesticación, + error estándar.....54
- Figura 3.7** Representación gráfica de los tres primeros componentes principales de composición de polisacáridos estructurales y fibra alimentaria en nopalitos de cinco especies de *Opuntia* (● *Opuntia streptacantha*, ● *O. hyptiacantha*, ▼ *O. megacantha*, ▲ *O. albicarpa*, ■ *O. ficus-indica*) representantes de un gradiente de domesticación.56

Figura 3.8 Representación gráfica de los tres primeros componentes principales de once características morfológicas y de composición de polisacáridos estructurales de cinco especies de *Opuntia* (● *Opuntia streptacantha*, ● *O. hyptiacantha*, ▼ *O. megacantha*, ▲ *O. albicarpa*, ■ *O. ficus-indica*) representantes de un gradiente de domesticación.58

Capítulo IV

Figura 4.1 Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de soluciones acuosas al 0.5% de polisacáridos (p:v) estructurales de nopalitas (*Opuntia* spp.) (● mucílagos, ▲ pectinas, ⊕ hemicelulosas débilmente y ▼ fuertemente unidas y ● celulosa). Las barras verticales sobre los símbolos indican el error estándar, n=6.75

Figura 4.2 Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de soluciones acuosas al 0.5 % de mucílagos de nopalitas de tres especies (▲ *O. streptacantha*, ▼ *O. megacantha* y ● *O. ficus-indica*), representantes de un gradiente de domesticación de *Opuntia*. Las barras verticales sobre los símbolos indican el error estándar.....77

Figura 4.3 Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de soluciones acuosas al 0.5 % de pectinas de nopalitas tres especies (▲ *O. streptacantha*, ▼ *O. megacantha* y ● *O. ficus-indica*), representantes de un gradiente de domesticación de *Opuntia*. Las barras verticales sobre los símbolos indican el error estándar.....80

Figura 4.4 Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de soluciones acuosas al 0.5% de hemicelulosas (A) débilmente y (B) fuertemente unidas de tres especies de nopalito (▲ *O. streptacantha*, ▼ *O. megacantha* y ● *O. ficus-indica*) representantes de un gradiente de domesticación de *Opuntia*. Las barras verticales sobre los símbolos indican el error estándar.82

Figura 4.5 Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de dispersiones al 0.5% de celulosa de tres especies de nopalito (▲ *O. streptacantha*, ▼ *O. megacantha* y ● *O. ficus-indica*) representantes de un gradiente de domesticación de *Opuntia*. Las barras verticales sobre los símbolos indican el error estándar.84

Capítulo I. Introducción general

México se considera el centro de origen de las cactáceas, así lo demuestra la riqueza de géneros y especies existentes (Gallegos-Vázquez *et al.*, 2006). El nopal, nombre común que reciben las cactáceas de los géneros *Opuntia* en México, ha estado en contacto con el hombre desde hace 9000 años (Callen, 1966 citado por Reyes-Agüero *et al.*, 2005), lo cual quedó plasmado en los códices y relatos precolombinos (Martín del Campo, 1957; Sodi, 1967). El resultado de la relación de los humanos con los nopales son las variantes de *Opuntia*, denominadas y apreciadas por los recolectores y cultivadores de nopal (Reyes-Agüero *et al.*, 2009). Actualmente se reconoce a *O. ficus-indica* (Bravo, 1978; Griffith, 2004; Reyes-Agüero *et al.*, 2005) y a *O. albicarpa* como las especies con un mayor nivel de domesticación.

Aunque el nopal ha sido importante en México desde época ancestral, debido a una renovada importancia que ha adquirido en México y otros países se han realizado diversos estudios acerca del origen de estas especies y su relación con sus ancestros silvestres con base en características morfométricas y moleculares (Colunga *et al.*, 1986; Griffith, 2004; Reyes-Agüero *et al.*, 2005). Bravo (1978) señaló que las especies de la serie Streptacanthae (*O. hyptiacantha*, *O. lasiacantha*, *O. megacantha* y *O. streptacantha*), que muestran cierto nivel de domesticación, son consideradas ancestros comunes de *O. ficus-indica* y se consideró a *O. megacantha* como su ancestro silvestre (Bravo, 1978). Al respecto Reyes-Agüero *et al.* (2005) desarrollaron una investigación en la que concluyeron que la selección de la serie Stretacanthae pudo comenzar con *O. streptacantha*, posteriormente continuó con especies más locales como *O. hyptiacantha* y *O. megacantha* y finalmente se concentró en variantes con frutos grandes, asociadas a *O. albicarpa* y *O. ficus-indica* y proponen que ésta proviene de la anterior.

Aunque el recolector seleccionó ejemplares con base en características morfológicas, en los que se buscó un tamaño mayor en estructuras de interés antropógeno y la eliminación de otras de defensa con función de protección (Baker, 1971; Casas *et al.*, 1999 y 1996; Reyes-Agüero, 2005), directa o indirectamente también se modificaron algunos componentes químicos, estructurales y fisiológicos (Galindo, 2006; Mondolot *et al.*, 2008; Sótelo *et al.*, 1995). Los polisacáridos, macromoléculas constituidas por unidades de monosacáridos (Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta, 2004), pudieron haber sido algunos de los componentes que se modificaron durante el proceso de selección. Al respecto, Mondolot *et al.* (2008) realizaron un estudio en el que compararon la relación carbono/nitrógeno (C/N) de hojas de yuca (*Manihot esculenta*) de una especie considerada silvestre y una domesticada, y

concluyeron que la mayor relación C/N en el ancestro silvestre refleja una alta presencia de compuestos que contienen carbono, como los componentes de la pared celular. Se sabe que los nopalitos son ricos en polisacáridos del tipo estructural y que éstos grupos de polisacáridos están en proporciones variables en los vegetales según la especie, el órgano o tejido, el estado de madurez o etapa fenológica de la planta y condiciones ambientales (Peña-Valdivia *et al.*, 2010).

García *et al.* (2010) llevaron a cabo un estudio en el que se evaluaron nopalitos de cuatro cultivares de *O. ficus-indica* y de una recolecta de *O. streptacantha* que demostró que la deshidratación del suelo durante 60 días, a partir de capacidad de campo, con un potencial de agua (Ψ_A) de -0.3 hasta -3.27 MPa (equivalente a 4 % de humedad), incrementó significativamente el contenido de polisacáridos estructurales, en proporción variable entre las variantes domesticadas y la silvestre. En esas condiciones el mucílago incrementó hasta 6 %, las pectinas entre 4 y 15 %, las hemicelulosas desde 5 hasta 18 %, y la celulosa desde 5 hasta 21 %. El cultivar Milpa Alta presentó, en general, un patrón de cambio del contenido de polisacáridos dependiente del Ψ_A del suelo diferente al resto de los cultivares (Atlixco, Copena V1, Moradaza y Solferino). Además, la recolecta silvestre de *O. streptacantha* presentó los contenidos significativamente mayores de fibra total y de sus componentes.

La reología es el estudio de los principios físicos que regulan el movimiento y deformación de los fluidos (Steffe, 1996). Los geles, soluciones y suspensiones acuosos de las biomoléculas, como los polisacáridos estructurales de *Opuntia*, han sido evaluados mediante parámetros reológicos (Calvo, 2008; Cárdenas *et al.*, 1997; Medina-Torres *et al.*, 2003; Trachtenberg y Mayer, 1982). El resultado de esas investigaciones, realizadas en mucílago y pectinas, evidenció un gran potencial de uso industrial por su comportamiento similar al de otras gomas que actualmente se utilizan en industrias alimentarias y no alimentarias. Sin embargo, todos estos trabajos se han realizado en variantes de *O. ficus-indica* y no se han considerado otras especies, a pesar de la gran diversidad existente en México (76 especies reconocidas actualmente; Guzmán *et al.*, 2003).

Los trabajos llevados a cabo sobre la domesticación de *Opuntia* (Colunga *et al.*, 1986; Reyes-Agüero *et al.*, 2005) demuestran que la preferencia del recolector se basó en el conjunto de atributos físicos y fisiológicos percibidos a través de los sentidos (López-Palacios *et al.*, 2010); sin embargo, también pudo haber tenido cierta influencia la calidad nutrimental (Harlan, 1992). En el caso de los nopales, los polisacáridos estructurales que conforman la fibra, y sus características reológicas (como reo-fluidez o pseudoplasticidad y consistencia) que mostraban las especies seleccionadas en función del clima de la región, pudieron haber

tenido un efecto en la selección (Colunga *et al.*, 1986; Figueroa, 1984; García *et al.*, 2010; López-Palacios *et al.*, 2010; Ramírez-Tobías *et al.*, 2007).

Con base en lo mencionado en párrafos anteriores, se establecieron los siguientes objetivos:

- Conocer el contenido de polisacáridos estructurales de los nopalitos de 14 variantes pertenecientes a cinco especies de *Opuntia* representantes de un gradiente de domesticación.
- Llevar a cabo la caracterización reológica de los polisacáridos estructurales de nopalitos pertenecientes a tres especies de *Opuntia* representantes de un gradiente de domesticación.

La hipótesis planteada es que los grupos de polisacáridos muestran un gradiente de concentración, y sus propiedades reológicas son modificadas, en función del gradiente de domesticación de *Opuntia*. Las hipótesis particulares son:

- Algunos polisacáridos como el grupo de los mucílagos y las pectinas disminuyen en las especies con mayor nivel de domesticación.
- Algunas características reológicas se modifican con el nivel mayor de domesticación.

Literatura citada

- Baker, H.G. 1971. Human influences of plant evolution. *BioScience* 21(3): 108.
- Bravo H., H. 1978. Las cactáceas de México. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 365 p.
- Calvo A., A.O. 2008. Mapas de preferencia y propiedades reológicas de cuatro cultivares de nopalito (*Opuntia* spp.). Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, estado de México, México. 97p.
- Cárdenas, A.; Higura-Ciapara, I.; Goycoolea, F.M. 1997. Rheology and aggregation of cactus (*Opuntia ficus-indica*) mucilage in solution. *Journal of the Association Professional of Cactus Development*. 2:152-159.
- Casas, A.; Caballero, J.; Valiente B., A.; Soriano, A.; Dávila, P. 1999. Morphological variation and the process of domestication of *Stenocereus stellatus* (Cactaceae) in Central Mexico. *American Journal of Botany*. 86(4): 522-533.

- Casas, A.; Vásquez, M. del C.; Viveros, J.L.; Caballero, J. 1996. Plant management among de Nahua and the Mixtec in the Balsas River Basin, Mexico: an ethnobotanical approach to the study of plant domestication. *Human Ecology*. 24(4): 465-478.
- Colunga G. M., P.; Hernández X., E.; Castillo M., A. 1986. Variación morfológica, manejo agrícola tradicional y grado de domesticación de *Opuntia* spp. en el Bajío guanajuatense. *Agrociencia*. 65: 7-49.
- Figueroa H., F. 1984. Estudio de las nopaleras cultivadas y silvestres sujetas a recolección para el mercado en el Altiplano Potosino-Zacatecano. Tesis profesional. Escuela de Agronomía, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, S.L.P., México. 171p.
- Galindo Z., M.V. 2006. Cambios ocurridos en las semillas de frijol común bajo domesticación. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. 88p.
- Gallegos-Vázquez, C.; Valdez-Cepeda, R.D.; Barrón-Macías, M.; Barrientos-Priego, A.F.; Andrés-Agustín, J.; Nieto-Ángel, R. 2006. Caracterización morfológica de 40 cultivares de nopal de uso como hortaliza del banco de germoplasma del CRUCEN-UACH. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*. 12: 41-49.
- García R., M.T.; Peña-Valdivia, C.B.; Trejo-López, C. 2010. The effects of soil wáter potential and cultivar on structural polysaccharides of “nopalitos” (*Opuntia* spp.). En proceso de publicación.
- Griffith, M.P. 2004. The origins of an important cactus crop, *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae): new molecular evidence. *American Journal of Botany*. 91(11): 1915-1921.
- Guzmán, U.; Arias, S.; Dávila, P. 2003. Catálogo de cactáceas mexicanas. Universidad Autónoma de México y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, Distrito Federal, México. 315 p.
- Harlan, J. R. 1992. *Crops and Man*. 2nd ed. American Society of Agronomy and Crop Science Society of America. Madison, USA. 284 p.
- López-Palacios, C.; Reyes-Agüero, J.A.; Ramírez-Tobías, H.M.; Juárez-Flores, B.I.; Aguirre-Rivera, J.R.; Yañez-Espinosa, L.; Ruíz-Cabrera, M.A. 2010. Evaluation of attributes associated with the quality of nopalito (*Opuntia* spp. and *Nopalea* sp.). *Italian Journal of Food Science*. 22: 423-431.
- Martín del Campo, R. 1957. Las Cactáceas entre los Mexica. *Cactáceas y Suculentas Mexicanas*. 2: 27-38.

- Medina-Torres, L.; Brito-De la Fuente, E.; Torrestiana-Sanchez, B.; Alonso, S. 2003. Mechanical properties of gels formed by mixtures of mucilage gum (*Opuntia ficus-indica*) and carrageenans. *Carbohydrate Polymers*. 52: 143-150.
- Mondolot, L.; Marlas, A.; Barbeau, D.; Gargadennet, A.; Pujol, B.; McKey, D. 2008. Domestication and defense: foliar tannins and C/N ratios in cassava and a close wild relative. *Acta Oecologica*. 34: 147-154.
- Peña-Valdivia, C.B.; Sánchez-Urdaneta, A. 2004. Polisacáridos de nopalito y tuna (*Opuntia* spp.) En: Flores, V. C. (Ed.). Memoria del X Congreso Nacional y VII Internacional, sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal y del Fifth International Congress on Cactus Pear and Cochineal. Universidad Autónoma Chapingo, Food and Agriculture Organization e International Society for Horticultural Science. Chapingo, México. Edición en CD.
- Peña-Valdivia, C. B.; Sánchez-Urdaneta, B.A.; Trejo-López, C.; Arroyo-Peña, V.B. 2010. Structural polysaccharides and dietary fiber assortment in nopalito and cactus fruit (*Opuntia* spp.). En proceso de publicación.
- Ramírez-Tobías, H.M.; Reyes-Agüero, J.A.; Pinos-Rodríguez, J.M.; Aguirre-Rivera, J.R. 2007. Efecto de la especie y madurez sobre el contenido de nutrientes de cladodios de nopal. *Agrociencia*. 41: 619-626.
- Reyes-Agüero, J.A. 2005. Variación morfológica de *Opuntia* (Cactaceae) y su relación con la domesticación en la Altiplanicie Meridional de México. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 175p.
- Reyes-Agüero, J.A.; Aguirre-Rivera, J.A.; Flores-Flores, J.A. 2005. Variación morfológica de *Opuntia* (Cactaceae) en relación con su domesticación en la Altiplanicie Meridional de México. *Interciencia*. 30: 476-484.
- Reyes-Agüero, J.A.; Aguirre-Rivera, J.R.; Carlín-Castelán, F.; González-Durán, A. 2009. Catálogo de las principales variantes silvestres y cultivadas de *Opuntia* en la Altiplanicie Meridional de México. UASLP, SAGARPA y CONACYT. San Luis Potosí, S.L.P. México. 350p.
- Sodi P., E. 1967. Las Cactáceas en las épocas pre-Colombina y Virreynal, y en el siglo XIX. *Cactáceas y Suculentas Mexicanas*. 1: 3-12.
- Sótelo, A.; Souza, H.; Sánchez, M. 1995. Comparative study of the chemical composition of wild and cultivated beans (*Phaseolus vulgaris*). *Plant Foods for Human Nutrition*. 47: 93-100.

Steffe, J.F. 1996. Rheological process in food process engineering. Freeman Press. United States of America. 418p.

Trachtenberg, S.; Mayer, A.M. 1982. Biophysical properties of *Opuntia ficus-indica* mucilage. *Phytochemistry*. 21: 2835-2843.

Capítulo II. Revisión de literatura

Importancia del nopal

México es considerado un lugar de origen de las cactáceas, así lo demuestran la riqueza de géneros y especies existentes en el país. El nopal ha tenido una gran importancia, histórica y actual para México y es considerado un símbolo nacional (Martín del Campo, 1957). Nopal, derivado del nahuatl *nopalli* o *nochtli* (Martín del Campo, 1957), es el nombre común que reciben las cactáceas de los géneros *Opuntia* y *Nopalea* en México (López-Palacios *et al.*, 2010; Martín del Campo, 1957).

En la actualidad, el nopal ha cobrado mayor importancia debido a su contenido de fibra (paredes celulares) y su relación con el control y prevención de algunas enfermedades como diabetes y obesidad (Paíz, 2007; Sáenz *et al.*, 2004). Según el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), en 2006 y 2008 la superficie cultivada para la producción de nopalito fue de 11,147 y 11,896 ha, respectivamente (SIAP, 2009).

Taxonomía y morfología

El género *Opuntia* pertenece a la tribu Opuntiae, cuyas plantas son arbustivas, arborescentes, decumbentes o rastreras, tienen una altura de 0.61 a 5.58 m; con ramas desde la base que pueden ser erectas, difusas, extendidas o reclinadas; con tallos globosos, claviformes, cilíndricos o aplanados, verdes y por ello fotosintéticos y muy suculentos llamados cladodios (Bravo, 1978; Reyes-Agüero *et al.*, 2009). Los cladodios incluyen, en sus aréolas, yemas axilares con tejido meristemático, a partir de las cuales se desarrollan hojas (pequeñas y pronto caedizas), espinas, flores y los renuevos de los tallos o cladodios, que, por su ternura, comúnmente reciben el nombre de nopalitos (Bravo, 1978; Gibson y Nobel, 1986). El fruto, comúnmente denominado tuna o xoconostle, es una baya unilocular y polispérmica, con forma cilíndrica, obovoide, elíptica, en ocasiones globosas, ovoides o piriformes, con cáscara cerosa o tomentosa; sus coloraciones pueden variar del amarillo pálido al rojo púrpura, así como su longitud, que va de 2.70 hasta 11.60 cm, anchura de 2.30 a 6.90 cm y un peso de 7.50 a 237.90 g (Reyes-Agüero *et al.*, 2009). Los frutos pueden ser de tres tipos: fruto dulce o tuna, con semillas rodeadas por abundante pulpa y cáscara delgada; frutos secos, con semillas rodeadas por pulpa, pero esta de escasa a nula con cáscara delgada; y tuna ácida o xoconostle, con semillas rodeadas con pulpa escasa, pero cáscara gruesa, suculenta, ácida y comestible (Borrego y Burgos, 1986; García-Pedraza *et al.*, 2005; Reyes-Agüero, 2005).

La clasificación taxonómica del nopal es la siguiente:

Dominio	Eukarya
Reino	Plantae
Subreino	Embryophita
División	Magnoliophyta (antes Angiospermae)
Clase	Magnoliopsida (antes Dicotyledonea)
Subclase	Caryophyllidae (antes Dialipetalas)
Orden	Caryophyllales (antes Opuntiales)
Familia	Cactaceae
Subfamilia	Opuntioideae
Tribu	Opuntiae
Genero	<i>Opuntia</i>

El registro inicial de la riqueza de *Opuntia* (en sentido estricto se excluyen los géneros *Cylindropuntia* y *Nopalea*), en México fue de 58 especies (Briton y Rose, 1919), posteriormente aumentó a 66 (Bravo, 1978), y llegó a estimarse en 93 (Hunt, 1999); a la fecha, la cifra más aceptada es de 76 especies (Guzmán *et al.*, 2003).

Para facilitar el análisis de esta riqueza, Bravo (1978), siguiendo en parte a Briton y Rose (1937), conformó para las especies mexicanas de *Opuntia* 17 series. Las cuales dividió en dos grupos, uno con tallos subcilíndricos y otro con tallos discoideos o planos. En este segundo grupo hay 15 series.

Serie Ficus-indicae

Las plantas de la serie Ficus-indicae son arborescentes con artículos casi siempre desprovistos de espinas, cuando están presentes son escasas, aplicadas y blancas; flores grandes, amarillas o anaranjadas. No se conocen en estado silvestre. Se cultivan por sus frutos, nopalitos y como plantas forrajeras. Las especies que pertenecen a esta serie son *O. crassa*, *O. ficus-indica* y *O. undulata*, (Bravo, 1978).

O. ficus-indica

Las plantas de *O. ficus-indica* pueden medir entre 0.70 y 3.0 m de altura, con ramas desde la base; presentan artículos ovalados, oblanceolados o rómbicos de 24.0 a 67.0 cm de longitud, de 12.0 a 51.0 cm de anchura y un grosor de 0.50 a 4.80 cm; aréolas de 34 a 109 por cara, separadas entre sí de 1.08 a 8.32 cm con indumento color castaño, gris o negro; glóquidas

escasas o ausentes de color castaño, amarillo o rojizo; de cero a cuatro espinas por aréola, por lo general ausentes en el cladodio, blancas con una longitud de 0.20 a 3.0 cm; flores amarillas con ovario tuberculado; fruto generalmente rojo, de 4.80 a 11.90 cm de longitud, comestible. Esta especie era conocida por los mexicas con el nombre de *tzapotlnochtli*. Fue una de las primeras cactáceas llevadas de América a Europa, allá se cultivó y pronto se aclimató en la zona del Mediterráneo; sus frutos fueron aceptados y populares, recibieron el nombre de higos de las Indias (Bravo, 1978; Reyes-Agüero *et al.*, 2009). Se cultiva en varias partes de México, en especial las zonas áridas y semiáridas del centro-norte y norte de México y en varios países de todos los continentes, particularmente en donde existen climas áridos, semiáridos y mediterráneos; se utiliza también como planta forrajera y para formar setos vivos (Bravo, 1978; Reyes-Agüero *et al.*, 2005b; 2009).

Serie Streptacanthae

La serie Streptacanthae se caracteriza por incluir plantas arborescentes, ramosas, glabras; espinas blancas o ligeramente amarillentas, aciculares o subuladas; flores amarillas, grandes; fruto carnoso. Se encuentran en la Altiplanicie o Mesa Central, sus frutos tienen sabor agradable y sirven para la elaboración de bebidas y confitería. Las especies que conforman esta serie son: *O. amyclaea* (ahora *O. albicarpa*), *O. chavena*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. lasiacantha*, *O. megacantha*, *O. pachona*, *O. spinulifera*, *O. strephacantha*; mas la especie dudosa *O. crystalenia* (Bravo, 1978).

O. albicarpa

Opuntia albicarpa (Sheinvar, 1999) fue originalmente clasificada como *O. amyclaea* “especie dudosa” por Bravo (1978). Son plantas arbustivas, en ocasiones decumbentes; cladodios oblongos u ovalados que miden entre 10.0 y 81.0 cm de longitud, de 12.0 a 42.0 cm de anchura y un grosor de 0.32 a 5.10 cm, de color verde ligeramente glauco; aréolas pequeñas de 21 a 126 por cara separadas entre sí de 2.0 a 5.49 cm con indumento color castaño, negro, gris o amarillo, glóquidas escasas o ausentes, amarillas o castañas; presenta de una a ocho espinas por aréola, de color blanco aunque pueden ser amarillas, castaño oscuras, negro o translúcidas de 0.17 a 4.10 cm de longitud; flores anaranjadas o amarillas y frutos amarillentos, turbinados, obovoides, ovoides o globosos de 2.40 a 12.40 cm de longitud (Bravo, 1978; Reyes-Agüero *et al.*, 2009; Scheinvar, 1999). Se aprecia por su fructificación abundante y por el sabor agradable de sus frutos. Se cultiva principalmente en Hidalgo y Zacatecas (Bravo, 1978).

O. hyptiacantha

Las plantas de *O. hyptiacantha* alcanzan hasta 5.0 m de altura, tienen numerosas ramas, con artículos oblanceolados, obovados y ovalados de color verde oscuro, de 19.0 a 49.0 cm de longitud, de 15.0 a 38.0 cm de anchura y un grosor de 0.8 a 4.0 cm; aréolas de 46 a 97, separadas entre sí de 1.68 a 4.52 cm, las de los artículos jóvenes tienen hasta tres espinas y algunos pelos cetosos, en cladodios maduros hay de dos a siete espinas por aréola, extendidas y de 0.90 a 4.40 cm de longitud; glóquidas escasas de color castaño, amarillo o rojizo; flores rojas; frutos elípticos, globosos, obovoides, cilíndricos o turbinados de 1.30 a 6.80 cm de longitud, amarillentos y provistos de aréolas con glóquidas (Bravo, 1978, Reyes-Agüero *et al.*, 2009). Se distribuye en la Altiplanicie en Aguascalientes, Puebla, Oaxaca, Estado de México y Distrito Federal (Bravo, 1978).

O. megacantha

Las plantas de *O. megacantha* miden hasta 6.50 m de altura, tienen tronco leñoso, más o menos bien definido, pueden presentar ramas desde la base; artículos oblanceolados, obovados u ovalados, de 15.0 a 63.0 cm de longitud, de 10.0 a 34.0 cm de anchura y un grosor de 0.31 a 4.70 cm, de color verde o ligeramente glauco; aréolas de 31 a 120, pequeñas, distantes entre sí de 1.57 a 5.37 cm, cuando jóvenes presentan indumento castaño; una a siete espinas por aréola, blancas cuando jóvenes, más tarde grises, pueden estar distribuidas en todo el cladodio, en la mitad superior, en los dos tercios superiores y en ocasiones solo en el margen; glóquidas escasas o ausentes de color castaño o amarillo en ocasiones blanco o rojizo; fruto grande, amarillento, de 3.20 a 13.50 cm de longitud y provisto de aréolas sin espinas (Bravo, 1978; Reyes-Agüero *et al.*, 2009). Se cultiva en la Altiplanicie del país (Bravo, 1978).

O. streptacantha

Las plantas de *O. streptacantha* son arbustivas o arborescentes, miden de 1.20 hasta 4.50 m de altura, tienen tronco de 45.0 cm de diámetro y abundancia de ramas; artículos obovados, circulares u ovalados de 19.0 a 43.0 cm de longitud, de 13.0 a 31.0 cm de anchura y de 1.0 a 3.70 cm de grosor, color verde oscuro; aréolas de 39 a 119 por cara, más o menos juntas; espinas numerosas, parcialmente aplanadas, blancas; glóquidas de color castaño rojizo; flores amarillas o anaranjadas, de 7.0 a 9.0 cm de diámetro; entre seis y trece lóbulos del estigma; fruto obovoide, globoso, cilíndrico o elíptico, de 2.90 a 5.50 cm de diámetro, rojo y a veces amarillo, con aréolas sin espinas (Bravo, 1978; Reyes-Agüero *et al.*, 2009).

Esta especie es de las más importantes desde el punto de vista económico, especialmente en el estado de San Luis Potosí. Su distribución es común en la Altiplanicie, mayormente en San Luis Potosí, Zacatecas, Durango, Aguascalientes y Querétaro (Bravo, 1978).

Domesticación

Concepto

Para entender el concepto de domesticación es necesario comprender las diferencias entre cultivo y domesticación. El concepto de cultivo se refiere al conjunto de formas de manejo de poblaciones o comunidades vegetales mientras que la domesticación es la parte final de un proceso evolutivo durante el cual se alteraron características genéticas y morfológicas de las plantas silvestres, como parte de una selección artificial y cultural (Perales y Aguirre, 2008), que las hacen mejor adaptadas a los ambientes creados por los humanos (Casas *et al.*, 1999). El proceso de selección artificial, durante la domesticación, se realiza con base en la variabilidad genética y su correspondiente variabilidad fenotípica; esa variabilidad es influenciada por las modificaciones que, a su vez, le imprimen los humanos durante su cultivo, además de las presiones selectivas realizadas ya sea por intereses económicos, tecnológicos y/o culturales (Colunga *et al.*, 1986).

La domesticación forma parte del proceso de humanización de la biota que presenta tres fases selectivas críticas: 1) la recolección de especies abundantes, persistentes, útiles y reactivas en forma positiva a la humanización; 2) el cultivo incipiente de especies con los mejores resultados en la recolección y que son funcionales en ambientes humanizados; y 3) la diferencia genética de las especies más exitosas en el cultivo, se empiezan a distinguir morfológica, fisiológica y ecológicamente de sus conespecíficas silvestres, esto es, a diferenciarse genéticamente. En los vegetales, los extremos del gradiente de humanización corresponden a las especies silvestres ocasionalmente recolectadas y a las especies producidas exclusivamente en campos agrícolas, es decir, domesticadas. Así, la humanización de la biota es un proceso con al menos tres fases y la domesticación es la última de ellas; por ello, no todas las especies humanizadas son domesticadas, muchas se mantienen en condiciones silvestres y se siguen recolectando (Perales y Aguirre, 2008).

En la escala evolutiva humana, la domesticación es un evento relativamente reciente, en el cual, en general, es posible reconocer e identificar al ancestro silvestre de las especies. El proceso de identificación se basa principalmente en análisis de similitudes morfológicas, genéticas, de distribución geográfica, etc. (Ladizinsky, 1987). En las regiones donde se llevó

a cabo el proceso de humanización se pueden localizar poblaciones con diferentes niveles de asociación con *Homo sapiens* (Reyes-Agüero, 2005).

En el proceso de domesticación se distinguen dos modelos: semicultura y vegeticultura. La semicultura se refiere al proceso de domesticación de plantas propagadas por semillas; este modelo se realiza generalmente en plantas herbáceas anuales (cereales y leguminosas), y es, en parte, consecuencia de su siembra o cosecha durante generaciones sucesivas (Casas *et al.*, 1997). El modelo de vegeticultura se refiere al desarrollo de la domesticación de plantas propagadas vegetativamente (por ejemplo papa (*Solanum* spp.), camote (*Ipomoea* sp.), o nopal) (Casas *et al.*, 1997). La vegeticultura es la domesticación de plantas a partir de órganos vegetativos (ramas, tallos, raíces) que tienen meristemas activos y a partir de los cuales, al ser plantados, pueden desarrollar una planta completa, un clon, ser cultivados y cosechados (Sauer, 1952 citado por Casas *et al.*, 1997).

En Mesoamérica se han registrado los primeros signos de domesticación de plantas ocurrida hace unos 9600 a 7000 años, con selección artificial *in situ* como la forma que pudo haberse utilizado en el proceso de domesticación (Casas *et al.*, 1997). En un principio, la selección por los humanos se enfocó en la producción de alimentos; sin embargo, con el tiempo se amplió a la obtención de otros bienes como fibras, estimulantes, medicamentos, colorantes, forrajes, materiales para construcción de habitación, ornamentales, entre otros (Zohary, 2001).

En plantas con cierto grado de domesticación se observan cambios en la habilidad competitiva, tamaño de algunos órganos, variabilidad morfológica, procesos de dispersión, estructuras y sustancias con funciones de protección, fertilidad seminal en variantes de reproducción vegetativa, cambios de hábitos y respuestas al fotoperiodo, latencia y germinación, procesos de auto compatibilidad, rendimiento, y otros (Baker, 1971; Casas *et al.*, 1999 y 1996; Reyes-Agüero, 2005).

Proceso de domesticación de *Opuntia*

La recolección continua y sistemática de los nopales favoreció que algunas plantas con características excepcionales (forma y tamaño del fruto, sabor y textura de la pulpa o de la cáscara, cantidad y dureza de las semillas, grosor de la cáscara y densidad de glóquidas; y forma, color, abundancia, precocidad, sabor, ternura y fibrosidad de los nopales), fueran sometidas a diferente grado de tolerancia, auspicio o cultivo, y que comenzaran a ser llevadas al ambiente doméstico, esto es, a los huertos o solares alrededor de la casa-habitación, tal y como lo sugieren Figueroa *et al.* (1980) y Colunga *et al.* (1986). En estos lugares los clones

de nopal escogidos (mutaciones somáticas, híbridos y extremos de variación) han recibido las condiciones necesarias para su persistencia (por ejemplo, control de competencia interespecífica, mejores condiciones de humedad, protección contra depredadores, multiplicación y poda), las cuales difícilmente se darían en condiciones naturales como para permitir allí su continuidad (Figuroa *et al.*, 1980; Colunga *et al.*, 1986). Así, las plantaciones de nopal en los solares son la síntesis del esfuerzo de generaciones de recolectores por acopiar lo más útil de la diversidad genética del nopal en sus respectivos territorios de recolecta y de cientos de años de cuidados para preservarlos (Reyes-Agüero *et al.*, 2005a). Parte del producto de esta relación dilatada de los humanos con los nopales son las variantes de *Opuntia*, denominadas y apreciadas por los recolectores y cultivadores de nopal (Reyes-Agüero *et al.*, 2009).

En *Opuntia* existe una relación documentada con *Homo sapiens* de más de 9000 años (Callen, 1966 citado por Reyes-Agüero *et al.*, 2005a). Esta correlación permite suponer que la recolección continua y sistemática de los nopales permitió el reconocimiento de plantas con características de interés para los primeros recolectores-pobladores de América y benefició a los individuos escogidos, ya sea en las nopaleras silvestres o en los campos de cultivo (Reyes-Agüero, 2005; Reyes-Agüero *et al.*, 2009).

En el Bajío guanajuatense (Colunga *et al.*, 1986) fueron registrados cuatro niveles de humanización de *Opuntia*: las especies silvestres en el agostadero, las toleradas o fomentadas en el huamil, las plantadas en el huamil y las plantadas o toleradas en el huerto de la casa. Estos cuatro niveles están relacionados con la dependencia de las diversas variantes hacia los humanos, además de seguir una tendencia a: 1) modificar las características de las poblaciones de *Opuntia* y las condiciones en que se desarrollan y, 2) transformar la comunidad original en una con mayor número de individuos de las variantes apreciadas, sin modificar la diversidad existente.

En *Opuntia*, las especies domesticadas son *O. ficus-indica* (Bravo, 1978; Griffith, 2004; Reyes-Agüero *et al.*, 2005a) y *O. albicarpa* (Reyes-Agüero *et al.*, 2005a); esto se relaciona con el gran número de cultivares utilizados con diversos fines (Gallegos *et al.*, 2006). Según Uphof (1968 citado por Griffith, 2004), la región central de México es señalada como el centro de origen de *O. ficus-indica*. Se señala a la región de la Altiplanicie Meridional de México como la región donde se domesticó *O. ficus-indica* (Reyes-Agüero *et al.*, 2005a). También se ha señalado que el grupo indígena ñahñú u otomí probablemente tuvo un papel determinante en el proceso de domesticación y propagación del nopal (Reyes-Agüero, 2005).

Las especies de la serie *Ficus-indicae* son formas inermes de especies de la serie *Streptacanthae* (Britton y Rose, 1929 citados por Reyes-Agüero, 2005), cuyas especies (*O. hyptiacantha*, *O. lasiacantha*, *O. megacantha* y *O. streptacantha*) deben considerarse como ancestros de *O. ficus-indica* (Bravo, 1978). Sin embargo, *O. ficus-indica* pudo derivarse de *O. megacantha* (Griffith 1914, citado por Bravo, 1978), pero lo más probable es que se derivó de *O. albicarpa* (Reyes-Agüero *et al.*, 2005a). Probablemente la selección de la serie *Streptacanthae* comenzó con *O. streptacantha*, posteriormente pudo haber seguido con especies locales como *O. hyptiacantha* y *O. megacantha* y finalmente concentrado en variantes con frutos grandes, asociadas a *O. albicarpa* y *O. ficus-indica* (Reyes-Agüero *et al.*, 2005a).

Otras especies consideradas con algún nivel de humanización son: *O. atropes*, *O. cantabrigiensis*, *O. chavena*, *O. cochineria*, *O. crassa*, *O. guilanchi*, *O. joconostle*, *O. leucotricha*, *O. pachona*, *O. rastrera*, *O. robusta*, *O. tomentosa* y *O. undulata* (Colunga *et al.*, 1986; Figueroa, 1984).

Reyes-Agüero *et al.* (2005a) dilucidaron la domesticación de *Opuntia*. Para ello realizaron exploraciones en la región de la Altiplanicie Meridional y se recolectaron muestras de variantes utilizadas por sus nopalitos, frutos y cladodios maduros. Se les midieron 42 atributos morfológicos. Con la matriz de datos obtenida, se ordenó con un análisis de correspondencias sin tendencias (decorana) y se clasificó con el programa Twinspan. Se reconocieron los patrones más significativos en la ordenación del decorana, con lo que cada eje o gradiente de ordenación se dividió en 5 segmentos y se describieron los ejes en los que se mostró una tendencia de ordenación a simple vista. Finalmente, el primer gradiente obtenido presentó en un extremo a *O. ficus-indica* y *O. albicarpa*; y en el extremo opuesto la especie silvestre, *O. streptacantha*. Por tanto, este eje representó al gradiente de domesticación que va de *O. streptacantha*, sigue con *O. hyptiacantha* y *O. megacantha* y termina con *O. albicarpa* y *O. ficus-indica*. Además, fueron las especies que registraron el mayor número de variantes. El segundo eje mostró un gradiente, dentro de las especies domesticadas, de variantes de *O. albicarpa* con espinas grandes y más o menos abundantes, a variantes de *O. ficus-indica*.

En *Opuntia*, la selección artificial se ha conducido hacia fruto y nopalito, principalmente (Reyes-Agüero *et al.*, 2005a); en el fruto, uno de los síndromes de domesticación es su gigantismo; este cambio del fruto se acompañó con el desarrollo de cladodios grandes, entre ovalados y rómbicos, con color verde pálido, con gran cantidad de aréolas, ninguna de ellas con espinas, pero sí con abundancia de gloquidias. Específicamente,

en *O. ficus-indica* los frutos también son rojos y con semillas normalmente grandes y abundantes y relativamente suaves en cuanto a su dureza (Colunga *et al.*, 1986; Reyes-Agüero *et al.*, 2005a). Además, Reyes-Agüero *et al.* (2004) reconocieron también en *O. ficus-indica* el síndrome de domesticación para nopalitos, que incluye variantes con cladodios pequeños, sin gloquidias (o cantidad baja), aréolas sin espinas, o sólo algunas de ellas aciculares, aplicadas y setosas. Junto con esos reconocieron cambios en el fruto, como su color amarillo, tamaño pequeño, con pulpa poco dulce, semillas abortivas abundantes y semillas normales escasas y pequeñas (Reyes-Agüero *et al.*, 2005a). Debe señalarse que Colunga *et al.* (1986) ya habían destacado a *O. atropes* como la especie apreciada, únicamente en el Bajío mexicano, por su nopalito delgado, con epidermis tomentosa, de color verde claro, espinas aciculares escasas y erectas, podarios prominentes, mucílago escaso, poco fibroso, oxidación lenta después del corte, aréolas largas y anchas y menor densidad de aréolas en los bordes.

Polisacáridos de origen vegetal

Los polisacáridos son macromoléculas constituidas por unidades de monosacáridos y en la célula se clasifican, como de reserva (almidón) y estructurales (pectinas, hemicelulosas y celulosas). A su vez, los polisacáridos estructurales se dividen en dos grupos: solubles e insolubles en agua (Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta, 2004).

La fibra dietética (fibra alimentaria o fibra de los alimentos) está formada por los polisacáridos no digeribles (pectinas, mucílagos, hemicelulosas y celulosa) por los humanos y la lignina (también indigerible, incluso para los animales rumiantes) que se encuentran en las paredes celulares de las plantas (Anónimo, 2001; Dikeman y Fahey, 2006; Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta, 2004). El contenido de fibra varía entre las especies vegetales, los órganos y el estado de madurez (Sáenz, 1997). En cuanto a su solubilidad, se clasifican como se señala en la Figura 2.1 (Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta, 2004).

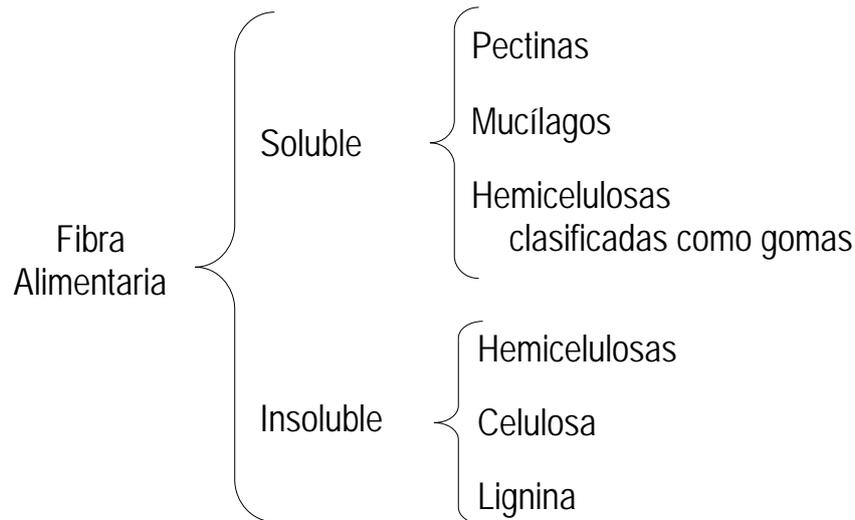


Figura 2.1 Clasificación de la fibra alimentaria, con base en Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta (2004).

Las sustancias pécticas son hidrocoloides con una composición compleja y una función importante como constituyentes primarios de la pared celular (Lutz *et al.*, 2009); varían en composición, propiedades fisicoquímicas y distribución en dependencia de la región en la pared celular donde se encuentren, del órgano del que formen parte y de la especie vegetal que constituyan. Estas sustancias pécticas se concentran principalmente en la lámina media de las Magnoliópsidas (antes dicotiledóneas) y son abundantes en algunas Liliópsidas (antes monocotiledóneas) (García y Peña, 1995). En esa zona de la pared celular funcionan como agente hidratante y como material cementante de la redes de celulosa (Cárdenas *et al.*, 2008). Con base en la composición de su cadena principal, las sustancias pécticas se han clasificado en: ramnogalacturonanas tipo I, homogalacturonanas, arabinanas, ramnogalacturonanas tipo I y II; de ellas las ramnogalacturonanas son las más abundantes. Además, las sustancias pécticas pueden ser macromoléculas ácidas, conocidas como ácidos poliurónicos, y como tales, se han caracterizado en tres tipos: a) ácidos pectínicos, con la cadena poligalacturónica parcialmente metilada, sus sales son denominadas pectinatos; b) ácidos pécticos, carentes o con una mínima proporción de grupos metoxilo, sus sales se denominan pectatos; y c) pectinas, que contienen ácido pectínico como unidad más abundante y con la cadena principal altamente metilada, son hidrosolubles y forman geles fácilmente (García y Peña, 1995). Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta (2004) registraron contenidos de pectinas que variaron entre 5.32 y 14.19 % en 13 variantes de nopalito crudo. En contraste, Cárdenas *et al.* (2008), también en nopalitos, obtuvieron 0.6 % de pectina en *O.*

ficus-indica y señalaron que estaba compuesta de ramnosa (0.6 %), arabinosa (6 %), galactosa (7 %), xilosa (1 %) y ácido urónico (85.4 %).

Fisiológicamente, el mucílago, que es un polisacárido no digerible pero sí soluble, juega un papel importante en la regulación del contenido de agua, la tolerancia a las heladas, en el metabolismo del calcio, así como en el almacenamiento de carbohidratos en las plantas (Felker y Moss, 1994). Las plantas crasas, en especial las cactáceas, se caracterizan por su contenido de mucílago, que es secretado por las células a la pared celular. Aunque existen especies que presentan células mucilaginosas, que se forman por la secreción de granulocrina a través de la membrana plasmática, y el mucílago se acumula debajo de la pared celular; después, el protoplasto se degenera quedando solo mucílago (Trachtenberg y Fahn, 1981).

En *Opuntia*, se encontró que el mucílago se sintetiza en células especializadas. En la formación de estas células se han distinguido seis estadios de desarrollo, en ellos disminuye el protoplasto mientras que el mucílago incrementa su volumen entre el plasmalema y la pared celular, hasta que el mucílago ocupa la célula entera (Trachtenberg y Fahn, 1981). López-Palacios *et al.* (2010) registraron la cantidad de mucílago en nopalitos producidos en invernadero e hidroponía de tres especies de *Opuntia* (*O. ficus-indica*, *O. robusta* ssp. *larreyi* y *O. undulata* x *O. tomentosa*) y encontraron contenidos entre 5.34 y 6.93 %, en base seca, y concluyeron que el contenido de mucílago en nopalito depende de la especie, estadio de desarrollo y posiblemente del estrés hídrico; así, García *et al.* (2010) comprobó que el potencial del agua del sustrato modificó el contenido de mucílago entre variantes; en nopalitos con riego obtuvo valores de 1.5 a 2.8 %, los cuales se incrementaron más del doble (de 5.9 a 6.3 %) al suspender el riego durante 60 días.

El mucílago de *Opuntia* es un polisacárido con peso molecular alto y comportamiento polielectrolito (McGarvie y Parolis, 1981, citados por Medina-Torres *et al.*, 2000). Cárdenas *et al.* (1997) registraron un peso molecular de 2.4×10^6 g mol⁻¹, menor al obtenido por Trachtenberg y Mayer (1981) (4.3×10^6 g mol⁻¹) en el cultivar Burkans de la misma especie y mayor al de Medina-Torres *et al.* (2000) (2.3×10^4 g mol⁻¹) en el cultivar Milpa Alta. Estas diferencias del peso molecular del mucílago de nopal pueden ser reales, pero también existe la posibilidad que se deban al uso de técnicas diferentes para la determinación del peso molecular, o a contaminación de la muestra con otros componentes de la pared celular (Sáenz *et al.*, 2004) como son aquellos que se generan en la pared celular o a los diferentes cultivares utilizados (Medina-Torres *et al.*, 2000). El mucílago se compone de arabinosa (24.6 a 44.04 %), galactosa (20.43 a 40.1 %), ramnosa (7.02 a 13.1 %), xilosa (22.2 a 22.13 %) y ácido galacturónico (6.38 %) (Medina-Torres *et al.*, 2000; Trachtenberg y Mayer, 1981).

Las hemicelulosas son heteropolisacáridos compuestos por xilosa, glucosa, manosa, galactosa, arabinosa, fucosa y ácido 4-*o*-metilglucurónico. Se distinguen tres grupos: a) xilanas, que incluyen las arabinoxilanas y las xiloglucanas; b) mananas, que incluyen a las glucomananas; y c) galactanas, que incluyen las galactomananas y arabinogalactanas tipo II. Las hemicelulosas contribuyen en la plasticidad y porosidad de la pared celular (García y Peña, 1995). Como en el caso de las pectinas y mucílago se ha mostrado cierta variabilidad en el contenido de hemicelulosas en nopalitos. Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta (2004) encontraron en 13 variantes de nopalito un contenido de 2.67 a 10.70 % y de 2 a 4.67 % de hemicelulosas débilmente y fuertemente unidas, respectivamente; mientras que Álvarez y Peña-Valdivia (2009) encontraron un contenido de 3.1 % y mayor al 2 % en frutos de *O. matudae*.

La celulosa es un polisacárido que se encuentra presente en todo el reino vegetal, principalmente en forma de fibras, es un refuerzo de la fase amorfa de la lignina y la hemicelulosa (Johnson *et al.*, 2003). Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta (2004) encontraron que en nopalito la celulosa varía de 4.0 a 15.0%. En *O. matudae* se registró 15.4 % en el fruto (Álvarez y Peña-Valdivia, 2009). Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta (2004) concluyeron que la variabilidad en el contenido de cada clase de polisacárido en nopalitos de *Opuntia* es amplia y no se identificó ningún patrón.

La lignina, un polímero fenilpropano, no se clasifica como un polisacárido, sin embargo se incluye en la definición de fibra dietética como fibra insoluble (Figura 2.1) (Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta, 2004; Dikeman y Fahey, 2006). La lignina es un puente covalente entre los polisacáridos y tiene una composición heterogénea que contiene un tipo o diversos tipos de fenilpropano unidos en una única macromolécula (Anónimo, 2001). En el caso de nopalitos se ha observado que está ausente en el tejido del cladodio, pero ha sido observada en las espinas (Álvarez y Peña-Valdivia, 2009; Peña-Valdivia y Sánchez, 2004).

Para determinar el contenido de fibra insoluble, Van Soest (1978) desarrolló dos métodos: fibra detergente neutro (FDN) y fibra detergente ácido (FDA). La solución acuosa de detergente neutro disuelve el contenido celular, y mantiene como residuo únicamente los componentes insolubles, parte del grupo de las hemicelulosas, la celulosa y lignina (fibra detergente neutro). Luego, al aplicar un detergente ácido a ese residuo se disuelve la hemicelulosa, de tal manera que sólo quedan la celulosa y la lignina (fibra detergente ácido) (Collins y Fritz, 2003; García y Peña, 1995).

Los cladodios de *Opuntia* son considerados como una excelente fuente de fibra de los alimentos. El contenido de FDN y FDA es variable entre las especies (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1 Porcentaje de fibra detergente neutro (FDN) y fibra detergente ácido (FDA) en *Opuntia* spp.

Especie	FDN (%)	FDA (%)
<i>O. ficus-indica</i> ^a	24.7	18.3
<i>O. ficus-indica</i> ^b	34.4	17.6
<i>O. robusta</i> ^a	22.2	17.0
<i>O. robusta</i> spp. <i>larreyi</i> ^b	30.7	15.4
<i>O. rastrera</i> ^a	27.1	16.8
<i>O. undulata</i> x <i>O. tomentosa</i> ^b	28.1	16.8

^a Pinos *et al.*, 2003

^b Ramírez-Tobías *et al.*, 2007

Reología

Concepto

La reología es el estudio de la deformación o el flujo de los materiales en respuesta a fuerzas aplicadas (Steffe, 1996). Las propiedades reológicas de mayor interés en los sólidos es la elasticidad y en los líquidos la viscosidad (Borwankar, 1992). Ciertos materiales son considerados sólido-líquidos, con una combinación de las propiedades de ambos tipos de materiales; a esas propiedades se les denomina viscoelásticas y están en función del tiempo, la temperatura y del esfuerzo aplicado al material (Borwankar, 1992; Jammey *et al.*, 2007).

La importancia de conocer cuál es el comportamiento reológico de la fibra dietética se debe a sus efectos fisiológicos en el intestino (Wood, 2007); los cuales dependen de la capacidad que tienen los polisacáridos solubles para hidratarse rápidamente y así incrementar la viscosidad en el tracto digestivo (Rayment *et al.*, 2000). Además, los polisacáridos vegetales constituyen una interesante fuente de aditivos para la industria, los cuales son usados para modificar las propiedades reológicas de algunos productos alimentarios (Medina-Torres *et al.*, 2000).

Harris y Smith (2006) realizaron una descripción de los principales usos de los polisacáridos constituyentes de la pared celular. Mencionan que durante muchos años, los polisacáridos de la pared celular se han utilizado como agentes que modifican las características y/o textura de los alimentos.

Esfuerzo y deformación

El esfuerzo (σ) se define como el cociente de la fuerza aplicada a un material por unidad de área, es expresado en pascales (N/m^2), y representado en la Ecuación 2.1:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Donde,

σ es el esfuerzo

F es la fuerza aplicada

A es el área en la que se aplica la fuerza

El esfuerzo puede ser de tensión, compresión o de cizalla (o corte). Para ejemplificar la dirección y relación de una fuerza con el esfuerzo se presenta la Figura 2.2, en la que se considera un cuerpo en un plano cartesiano (x_1, x_2, x_3) con un esfuerzo denominado σ_{ij} , donde el subíndice i indica el eje coordenado normal a la superficie donde actúa la fuerza y el subíndice j indica la dirección de la fuerza. Asimismo, σ_{11} es el esfuerzo normal que actúa en el plano perpendicular a x_1 , y en la dirección de x_1 y σ_{23} es el esfuerzo de corte que actúa en el plano perpendicular a x_2 en la dirección de x_3 (Steffe, 1996).

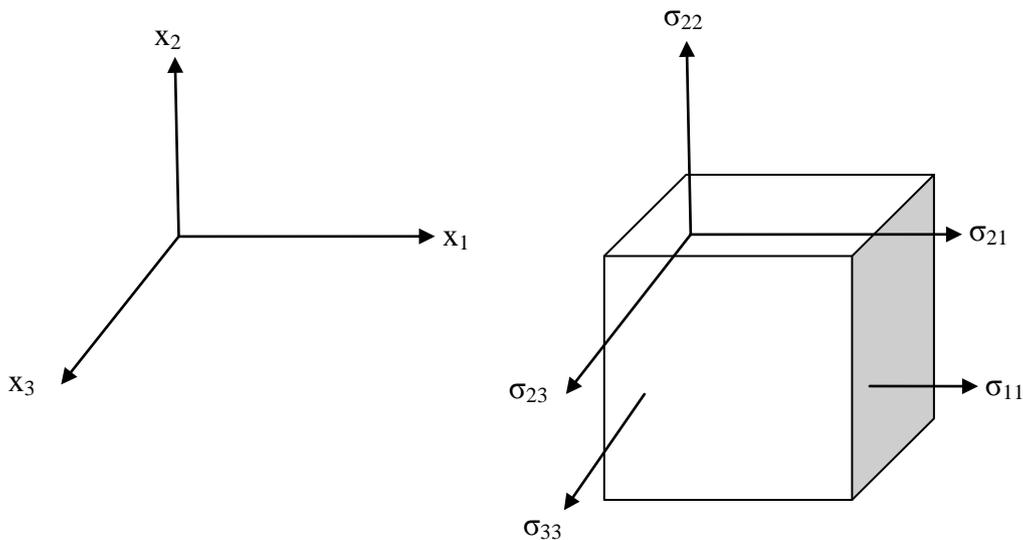


Figura 2.2 Representación grafica del típico esfuerzo (σ) aplicado sobre un material (Steffe, 1996).

El esfuerzo tiene nueve componentes, de ellos $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ son considerados esfuerzos normales y el resto son esfuerzos cortantes. El esfuerzo normal se considera positivo cuando actúa hacia fuera (tensión) y negativo cuando actúa hacia dentro (compresión). La deformación se define como el cambio de forma y/o volumen como

resultado de la aplicación de un esfuerzo. Al aplicar una fuerza de tensión o compresión se modifica la longitud original, al resultado se le denomina deformación ingenieril (Steffe, 1996), y se representa con la Ecuación 2.2:

$$\varepsilon = \frac{\delta L}{L_o} \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

Donde,

ε es la deformación ingenieril

L_o es la longitud original

δL es el incremento o disminución de la longitud

Otro tipo de deformación, cuantificada en la reología, es la deformación por cizalla (γ), provocada cuando se aplica una fuerza paralela a la superficie del cuerpo. En la Figura 2.3 se muestran una barra rectangular con una altura h y superficie inferior estacionaria; al aplicar una fuerza paralela a la cara superior de la barra es provocada una deformación (δL).

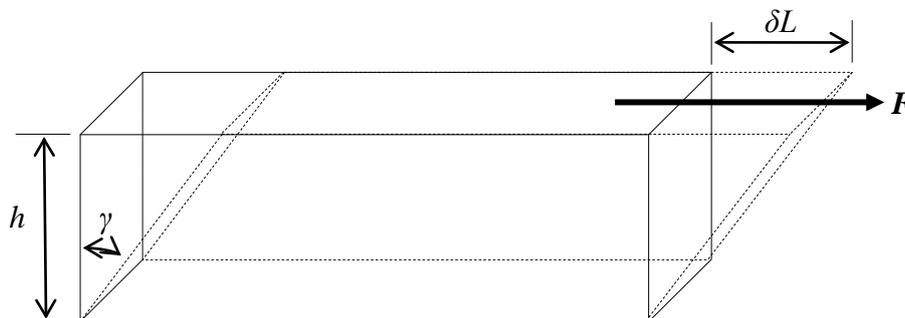


Figura 2.3 Deformación por cizalla (γ) en una barra según Steffe (1996).

Cada elemento de la barra sufre un nivel de deformación y da origen al ángulo de cizalla (γ), el cual se puede obtener mediante la Ecuación 2.3:

$$\tan(\gamma) = \frac{\delta L}{h} = \gamma \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

Donde,

γ es la deformación por cizalla

δL es la deformación de la longitud

h es la altura

Las ecuaciones que muestran la relación entre el esfuerzo y la deformación son llamadas ecuaciones reológicas de estado o ecuaciones constitutivas (Steffe, 1996).

Velocidad de cizalla

La velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$) se define como la derivada con respecto al tiempo de la deformación de cizalla (Ecuación 2.4). En un sistema de flujo la velocidad de cizalla es una medida del gradiente de velocidad que se desarrolla en un fluido entre una frontera fija y una frontera moviéndose a cierta velocidad. La Ecuación 2.4 muestra que la velocidad de cizalla es un gradiente de velocidad (razón de cambio de velocidad, v_x , con respecto a la posición en y) (Steffe, 1996).

$$\dot{\gamma} = \frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\frac{dx}{dy} \right] = \frac{d}{dy} \left[\frac{dx}{dt} \right] = \frac{d}{dy} (v_x) \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

Fluidos Newtonianos y no-Newtonianos

La clasificación de los fluidos en Newtonianos y no-Newtonianos depende del comportamiento de su viscosidad. Los fluidos Newtonianos están caracterizados por su viscosidad constante a temperatura y presión constantes y por su independencia del tiempo (Saleh, 2002). La viscosidad de un fluido Newtoniano es igual al esfuerzo de cizalla dividido entre la velocidad de deformación (Saleh, 2002; Steffe, 1996). La relación entre el esfuerzo y la velocidad de deformación es una línea recta; mientras que en los fluidos no-Newtonianos ésta relación no es lineal (Saleh, 2002). Los líquidos no-Newtonianos se caracterizan por una viscosidad variable y en función de la velocidad de deformación a temperatura y presión constantes (Janmey *et al.*, 2007).

La función viscosidad toma varias formas en dependencia del tipo de fluido. En fluidos no-Newtonianos se tiene de forma general dos tipos de comportamiento: a) fluidos cuya viscosidad (η) decrece con el incremento de la velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$), denominados reofluidificantes a la cizalla o pseudoplásticos (*shear thinning*) y b) fluidos en los cuales la viscosidad se incrementa con la velocidad de cizalla, denominados reoespesantes a la cizalla o dilatantes (*shear thickening*) (Saleh, 2002) (Figura 2.4).

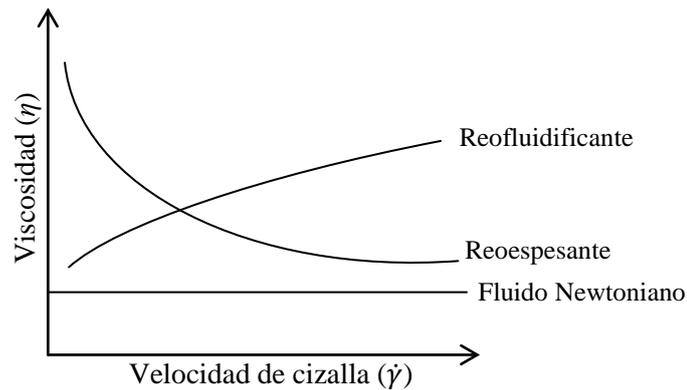


Figura 2.4 Comportamiento de la viscosidad (η), en fluidos newtonianos y no-newtonianos (reofluidificantes y reoespesantes), respecto a la velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$).

Viscosidad

La viscosidad de un fluido es la resistencia que opone a una fuerza de cizallamiento (Saleh, 2002) y es función de la masa molecular de los solutos y el nivel de agregación molecular de ellos. En muchos fluidos la elasticidad es pequeña o nula, lo que deja al comportamiento de la viscosidad como la función de interés principal. La sustancia más simple para considerar es el fluido Newtoniano en el que el esfuerzo de cizalla o esfuerzo cortante (σ) a la cizalla es directamente proporcional a la velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$), con μ como constante de proporcionalidad (viscosidad del fluido o resistencia al flujo). A esta ecuación (Ecuación 2.5) se le conoce como la Ley de Viscosidad de Newton (Steffe, 1996).

$$\sigma = \mu \dot{\gamma} \quad (\text{Ecuacion 2.5})$$

En análisis reológicos del mucílago de *O. ficus-indica*, Medina-Torres *et al.* (2000) encontraron que se observa un incremento en la viscosidad al pasar de mayor a menor velocidad de cizalla y viceversa, es decir tiene un comportamiento no-Newtoniano del tipo reofluidificante o pseudoplástico. Lo mismo identificaron Rayment *et al.* (2000) para soluciones al 1.0 % (p/p) con goma guar/ microcristales de celulosa (al 17 %). Este comportamiento puede explicar la influencia que la fibra soluble produce en el tracto intestinal. Medina-Torres *et al.* (2000) mencionan que la viscosidad del mucílago de *Opuntia* tiene un comportamiento similar al presentado por la goma xantana (usada en la industria

para modificar la reología de los alimentos, como espesante o como estabilizador), lo cual le da un mayor interés al estudio de este polisacárido en *Opuntia*.

En pectinas extraídas de calabaza (*Cucurbita moschata*), la viscosidad muestra, a baja velocidad de cizalla, un comportamiento Newtoniano (Fissore *et al.*, 2009), similar al mostrado en derivados de celulosa (carboximetil celulosa e hidroximetil celulosa) en soluciones a bajas concentraciones (Castelain *et al.*, 1987), mostrando un comportamiento no-Newtoniano al incrementar la velocidad de cizalla y la concentración de las soluciones, respectivamente.

Yassen *et al.* (2005) mencionan que las gomas tienen importantes usos industriales, las cuales no sólo ayudan a la viscosidad, sino que pueden proveer propiedades emulsificantes o potenciadores del sabor. Ellos mismos realizaron un estudio con 12 soluciones de gomas industriales (konjac, carboximetil celulosa, guar, κ -carrageninas, λ -carragenina, xantana, ι -carragenina, pectina, celulosa microcristalina, metilcelulosa y goma arábica) y observaron que la viscosidad de la goma arábica, pectina, celulosa microcristalina y metilcelulosa tienen un comportamiento Newtoniano, mientras que las otras presentaron un comportamiento reofluidificante o pseudoplástico. Cárdenas *et al.* (1997) observó que el mucílago de *O. ficus-indica* en solución salina mostró comportamiento reofluidificante o pseudoplástico y se incrementó con la concentración de mucílago.

Modelos reológicos

Un modelo reológico es una ecuación matemática que describe los datos reológicos del esfuerzo y velocidad de cizalla de los fluidos, a través de coeficientes o parámetros que describen y clasifican su comportamiento al flujo (Lozada, 2007; Rao, 1999). La conveniencia del uso de estos modelos es importante, ya que permiten observar como sus parámetros se modifican por el estado de las variables, como son la concentración, temperatura y el efecto de la estructura/composición. Los modelos de flujo se han dividido en los comportamientos independientes del tiempo y dependientes del tiempo (Rao, 1999).

Entre los modelos más conocidos se encuentran los de Ostwald-DeWaele o Ley de la Potencia, Bingham, Carreau, Cross, Casson y Herschel-Bulkley (Lozada, 2007). La mayoría de las soluciones de polisacáridos tienen un comportamiento pseudoplástico (Wang y Cui, 2005). En diversos trabajos (Cárdenas *et al.*, 1997 y 2008; Fissore *et al.*, 2009; Goycoolea y Cárdenas, 2003; Medina-Torres *et al.*, 2000; Rayment *et al.*, 2000) se ha encontrado que los polisacáridos estructurales son independientes del tiempo, por lo cual solo se describirán algunos modelos de flujo de este tipo (Cuadro 2.2).

Cuadro 2.2 Modelos reológicos para describir el comportamiento de los fluidos independientes del tiempo (Steffe, 1996).

Modelo	Ecuación*
Modelos de un parámetro	
Ley de Newton	$\sigma = \mu\dot{\gamma}$
Modelo de Newton generalizado	$\sigma = \eta\dot{\gamma}$
Modelos de dos parámetros	
Bingham	$\sigma = \sigma_0 + \eta_0\dot{\gamma}$
Casson	$\sigma^{0.5} = (\sigma_0)^{0.5} + K_1(\dot{\gamma})^{0.5}$
Ostwald-De Waele (Ley de la potencia)	$\sigma = K\dot{\gamma}^n$
Modelos de tres parámetros	
Herschel-Bulkley	$\sigma = \sigma_0 + K\dot{\gamma}^n$
Casson modificado	$\sigma^{0.5} = (\sigma_0)^{0.5} + K_1(\dot{\gamma})^{n_1}$
Ellis	$\dot{\gamma} = K_1\sigma + K_2(\sigma)^{n_1}$
Carreau	$\eta = \frac{\eta_0}{[1 + (t_1\dot{\gamma})^2]^{\frac{(1-n)}{2}}}$
Cross-Williamson	$\eta = \frac{\eta_0}{1 + t_1\dot{\gamma} ^{1-n}}$
Modelos de cuatro parámetros	
Carreau de cuatro parámetros	$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{[1 + (t_1\dot{\gamma})^2]^{\frac{(1-n)}{2}}}$

* K_1, K_2 y n_1, n_2 son constantes arbitrarias e índices de potencia, respectivamente, determinados a través del ajuste de los datos experimentales a los modelos.

Modelo de Ostwald-De Waele

Se utiliza para describir el comportamiento de los fluidos no-newtonianos; es un modelo que sólo describe la zona lineal del comportamiento reológico (Lozada, 2007) (Cuadro 2.2). En donde n es el índice de flujo (adimensional) y K el coeficiente de consistencia ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$). Si $n < 1$ el fluido es pseudoplástico; si $n > 1$ el fluido es dilatante; y si $n = 1$ es un fluido newtoniano.

Modelo de Herschel-Bulkley

Es un modelo que incluye un parámetro más (esfuerzo de cedencia, σ_0) al de la ley de potencia (Cuadro 2.2), por lo que se considera una extensión de éste. Se usa para materiales donde la viscosidad tiende al infinito al disminuir la velocidad de cizalla. El parámetro σ_0 del modelo de Herschel-Bulkley es un ajuste matemático, al cual frecuentemente se le asocia un significado de esfuerzo de cedencia (Lozada, 2007).

Literatura citada

- Álvarez A., R.; Peña -Valdivia, C.B. 2009. Structural polysaccharides in xoconostle (*Opuntia matudae*) fruits with different ripening stages. Journal of the Association Professional of Cactus Development. 11: 26-44.
- Anónimo. 2001. Dietary reference intakes proposed definition of the dietary fiber. Panel on the Definition of Dietary Fiber Staff; Food and Nutrition Board Staff and Institute of Medicine Staff (eds.) National Academic Press. Washington D.C. United States of America 74p.
- Baker, H.G. 1971. Human influences of plant evolution. BioScience 21(3): 108.
- Borrego E., F.; Burgos V., N. 1986. El nopal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 202 p.
- Borwankar, R.J. 1992. Food texture and rheology: a tutorial review. Journal of Food Engineering. 16: 1-16.
- Bravo H., H. 1978. Las cactáceas de México. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 365 p.
- Britton, N.L.; Rose, J.N. 1919. The Cactaceae. Vol. 1. Carnegie Institution of Washington. Washington, D.C. USA. 241 p.
- Britton, N.L.; Rose, J.N. 1937. The Cactaceae. 2nd Ed. Carnegie Institution of Washington. New York, EE.UU.
- Cárdenas, A.; Gooycolea, F.M.; Rinaudo, M. 2008. On the gelling behavior of 'nopal' (*Opuntia ficus-indica*) low methoxyl pectin. Carbohydrate Polymers. 78: 212-222.
- Cárdenas, A.; Higuera-Ciapara, I.; Gooycolea, F.M. 1997. Rheology and aggregation of cactus (*Opuntia ficus-indica*) mucilage in solution. Journal of the Association of Cactus Development. 2: 152-159.

- Casas, A.; Caballero, J.; Mapes, C.; Zárate, S. 1997. Manejo de la vegetación, domesticación de plantas y origen de la agricultura en Mesoamérica. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 61: 31-47.
- Casas, A.; Caballero, J.; Valiente B., A.; Soriano, A.; Dávila, P. 1999. Morphological variation and the process of domestication os *Stenocereus stellatus* (Cactaceae) in Central Mexico. *American Journal of Botany*. 86: 522-533.
- Casas, A.; Vásquez, M. del C.; Viveros, J.L.; Caballero, J. 1996. Plant management among de Nahua and the Mixtec in the Balsas River Basin, Mexico: an ethnobotanical approach to the study of plant domestication. *Human Ecology*. 24: 465-478.
- Castelian, C.; Doublier, J.L.; Lefebvre, J. 1987. A study of the viscosity of cellulose derivates in aqueous solutions. *Carbohydrate Polymers*. 7: 1-16.
- Collins, M.; Fritz, J.O. 2003. Forage quality. In: Barnes, R.F.; Nelson, C.J.; Collins, M.; Moore, K.J: (Eds.) *Forages: an introduction to grassland agriculture*. 6th edition. Iowa State Press. Ames, Iowa, USA. Pp 363-390.
- Colunga G. M., P.; Hernández X., E.; Castillo M., A. 1986. Variación morfológica, manejo agrícola tradicional y grado de domesticación de *Opuntia* spp. en el Bajío guanajuatense. *Agrociencia*. 65: 7-49.
- Dikeman, Ch. L.; Fahey, G. C. 2006. Viscosity as related to dietary fiber: a review. *Critical Review in Food Science and Nutrition*. 46: 649-663.
- Felker, P.; Moss, R. 1994. Carbohydrate metabolism in cacti: gums and mucilage. *Proceedings Fifth Annual Texas Prickly Pear Council*. McAllen, TX., USA. pp. 7-12.
- Figueroa H., F. 1984. Estudio de las nopaleras cultivadas y silvestres sujetas a recolección para el mercado en el Altiplano Potosino-Zacatecano. Tesis profesional. Escuela de Agronomía, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, S.L.P., México. 171p.
- Figueroa H., F. 1980. Estudio de las nopaleras cultivadas y silvestres sujetas a recolección para el mercado en el altiplano potosino-zacatecano. En: Anónimo. *Avances en la Enseñanza e Investigación*. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México, México. pp. 31-32.
- Fissore, E.N.; Matkovic, L.; Wider, E.; Rojas, A.M.; Gerschenson, L.N. 2009. Rheological properties of pectin-enriched products isolated from butternut (*Cucurbita moschata* Duch ex Poiret). *Food Science and Technology*. 42: 1413-1421.
- Gallegos V., C.; Valdez C., R.D.; Barrón M., M.; Barrientos P., A.F.; Andrés A., J.; Nieto A., R. 2006. Caracterización morfológica de 40 cultivares de nopal de uso como hortaliza

- del banco de germoplasma del CRUCEN-UACH. Revista Chapingo. Serie Horticultura. 12: 41-49.
- García H., E.; Peña V., C. 1995. La pared celular. Componente fundamental de las células vegetales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México, México. 96 p.
- García R., M.T.; Peña-Valdivia, C.B.; Trejo-López, C. 2010. The effects of soil water potential and cultivar on structural polysaccharides of “nopalitas” (*Opuntia* spp.). En proceso de publicación.
- García-Pedraza, L.G.; Reyes-Agüero, J.A.; Aguirre-Rivera, J.R.; Pinos-Rodríguez, J.M. 2005. Preliminary nutritional and organoleptic assessment of xoconostle fruit (*Opuntia* spp.) as a condiment or appetizer. Italian Journal of Food Science 3: 333-340.
- Gibson, A.C. y Nobel, P.S. 1986. The cactus primer. Harvard University Press. Cambridge, Massachusetts, USA. 286p.
- Gooycolea, F.M.; Cárdenas, A. 2003. Pectins from *Opuntia* spp.: a short review. Journal of the Association Professional of Cactus Development. 5: 17-29.
- Griffith, M.P. 2004. The origins of an important cactus crop, *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae): new molecular evidence. American Journal of Botany. 91: 1915-1921.
- Guzmán, U.; Arias, S.; Dávila, P. 2003. Catálogo de cactáceas mexicanas. Universidad Nacional Autónoma de México y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, Distrito Federal, México. 315 p.
- Harris, P.J.; Smith, B.G. 2006. Plant cell wall polysaccharides: structures, properties and uses in food products. International Journal of Food Science and Technology. 41: 129-143.
- Hunt, D. 1999. CITES Cactaceae, check list. Royal Botanical Gardens Kew e International Organization for Succulent Plant Study. Milborne Port. U.K. 315 p.
- Janmey, P.A.; Georges, P.C.; Hvidt, S. 2007. Basic rheology for biologist. In: Wang, Y.L.; Discher, D.E. (eds.) pp 3-27. Methods in Cell Biology Vol. 83. Cell mechanics. Academic Press. United States of America.
- Johnson, R.M.; Mwaikambo, L.Y.; Tucker, N. 2003. Rapra review reports: biopolymers. Vol. 14. Smithers Rapra. United Kingdom. 160p.
- Ladizinski, G. 1987. Pulse domestication before cultivation. Economic Botany. 41: 60-65.
- López-Palacios, C.; Reyes-Agüero, J.A.; Ramírez-Tobías, H.M.; Juárez-Flores, B.I.; Aguirre-Rivera, J.R.; Yañez-Espinoza, L.; Ruíz-Cabrera, M.A. 2010. Evaluation of attributes

- associated with the quality of nopalito (*Opuntia* spp. and *Nopalea* sp.). Italian Journal of Food Science. 22: 423-431.
- Lozada C., M.A. 2007. Extracción y caracterización reológica de polisacáridos tipo pectina de la cáscara de tuna (*Opuntia* spp.). Trabajo de investigación. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Instituto de Ciencias Agropecuarias. Tulancingo de Bravo, Hidalgo. 88p.
- Lutz, R.; Aserin, A.; Wicker, L.; Garti, N. 2009. Structure and physical properties of pectins with block-wise distribution of carboxylic acid groups. Food Hydrocolloids. 23: 786-794.
- Martín del Campo, R. 1957. Las Cactáceas entre los Mexica. Cactáceas y Suculentas Mexicanas 2: 27-38.
- Medina-Torres, L.; Brito-De la Fuente, E.; Torrestiana-Sanchez, B.; Katthain, R. 2000. Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus-indica*). Food Hydrocolloids. 14: 417-424.
- Paíz, R.C. 2007. Efecto hipoglucemiante de *Opuntia joconostle* Web. en ratas diabéticas. Tesis de maestría. Programa Multidisciplinario en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, S.L.P., México. 51p.
- Peña-Valdivia, C.B.; Sánchez-Urdaneta, A. 2004. Polisacáridos de nopalito y tuna (*Opuntia* spp.) En: Flores, V. C. (Ed.). Memoria del X Congreso Nacional y VII Internacional, sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal y del Fifth International Congress on Cactus Pear and Cochineal. Universidad Autónoma Chapingo, Food and Agriculture Organization e International Society for Horticultural Science. Chapingo, México. Edición en CD.
- Perales R., H.R.; Aguirre R., J.R. 2008. Biodiversidad humanizada. En: Capital natural de México. Vol. 1: Conocimiento actual de la biodiversidad. Conabio, México. Pp. 565-603.
- Pinos R., J.M.; Duque B., J.A.; Reyes A., J.A.; Aguirre R., J.R.; González M., S.S. 2003. Contenido de nutrientes en tres especies de nopal forrajero. En: Esparza F., G.; Salas L., M.A.; Mena C., J.; Valdez Z., R.D. (Eds.). Memoria del IX Congreso Nacional y VII Congreso Internacional sobre Conocimientos y Aprovechamiento del Nopal. Gobierno del Estado de Zacatecas. Zacatecas, México. Pp. 60-63.
- Ramírez Tobías, H.M.; Reyes-Agüero, J.A.; Pinos-Rodríguez, J.M.; Aguirre-Rivera, J.R. 2007. Efecto de la especie y madurez sobre el contenido de nutrientes de cladodios de nopal. Agrociencia. 41: 619-626.

- Rao, M.A. 1999. Flow and functional models for rheological properties of fluid foods. En: Rao, M.A. (Ed.) Rheology of fluid and semisolid foods: principles and applications. Aspen Publishers, Inc. Maryland, USA. Pp. 25-57.
- Rayment, P.; Ross-Murphy, S.B.; Ellis, P.R. 2000. Effect of size and shape of particulate inclusions on the rheology of guar galactomannan solutions. Carbohydrate Polymers. 43: 1-9.
- Reyes-Agüero., J.A.; Aguirre R., J.R.; F. Carlín C. 2004. Análisis preliminar de la variación morfológica de 38 variantes mexicanas de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller En: G. Esparza F.; R.D. Valdez Z.; S.J. Méndez G. El nopal, tópicos de actualidad. Universidad Autónoma Chapingo y Colegio de Postgraduados. Chapingo, Méx. Pp. 21-47.
- Reyes-Agüero, J.A. 2005. Variación morfológica de *Opuntia* (Cactaceae) y su relación con la domesticación en la Altiplanicie Meridional de México. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 175p.
- Reyes-Agüero, J.A.; Aguirre-Rivera, J.R.; Flores-Flores, J.L. 2005a. Variación morfológica de *Opuntia* (Cactaceae) en relación con su domesticación en la Altiplanicie Meridional de México. Interciencia. 30: 476-484.
- Reyes-Agüero, J.A.; Aguirre-Rivera, J.R.; Hernández-Hernández, M. 2005b. Systematic notes and a detailed description of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae). Agrociencia 39:395-408.
- Reyes-Agüero, J.A.; Aguirre R., J.R.; Carlín C., F.; González D., A. 2009. Catálogo de las principales variantes silvestres y cultivadas de *Opuntia* en la Altiplanicie Meridional de México. UASLP, SAGARPA y CONACYT. San Luis Potosí, S.L.P. México. 350p.
- Sáenz H., C. 1997. Cladodes: a source of dietary fiber. Journal of the Professional Association of Cactus Development. 2: 117-123.
- Sáenz, C.; Sepúlveda, E.; Matsuhira, B. 2004. *Opuntia* spp. mucilage's: a functional component with industrial perspectives. Journal of Arid Environments. 57: 275-290.
- Saleh, J.M. 2002. Fluid flow handbook. McGraw-Hill. United States of America. 1030p.
- Scheinvar, L. 1999. *Opuntia albicarpa* Scheinvar, una nueva especie para la ciencia del Estado de México. Revista del Jardín Botánico Nacional. 20: 167-169.
- SIAP. 2009. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Resumen Nacional de la Producción Agrícola.

- http://reportes.siap.gob.mx/Agricola_siap/ResumenProducto.do?producto=23000&invitado=true&ciclo=3 (consultado en Agosto de 2009).
- Steffe, J.F. 1996. Rheological process in food process engineering. Freeman Press. United States of America. 418p.
- Trachtenberg, S.; Fahn, A. 1981. The mucilage of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.-development, ultra structure, and mucilage secretion. Botanical Gazette. 142: 206-213.
- Van Soest, P. 1978. Workshop I-Component analysis of fiber in food. Summary and recommendations. The American Journal of Clinical Nutrition. 31: S75-S76.
- Wang, Q. y Cui, S.W. 2005. Understanding the physical properties of food polysaccharides. En: Cui, S.W. (Ed.) Foods carbohydrates: chemistry, physical properties and applications. Taylor & Francis Group. Florida, USA. Pp. 161-218.
- Wood, P.J. 2007. Rheology and physiology of soluble fibres: what are the relationships and what use can be made of them? In: Salovaara, H.; Gates, F.; Tenkanen, M. (Eds.) Dietary fiber components and functions. Wageningen Academic Publishers. Pp. 113-126.
- Yassen, E.I.; Herald, T.J.; Aramouni, F.M.; Alavi, S. 2005. Rheological properties of selected gums solutions. Food Research International. 38: 111-119.
- Zohary, D. 2001. Domestication of crop plants. En: Levin, S.A. (Ed.). Encyclopedia of Biodiversity vol.2. Pp. 217-227.

Capítulo III. Polisacáridos estructurales de nopalitos (*Opuntia* spp.) en un gradiente de domesticación

Resumen

Evidencias diversas indican que la domesticación del género *Opuntia* comenzó con la selección de variantes de *O. streptacantha*, seguida de *O. hyptiacantha* y *O. megacantha* y se centró en *O. albicarpa* y *O. ficus-indica*. Los polisacáridos más abundantes de los nopalitos son principalmente del tipo estructural. El objetivo de este estudio fue conocer el contenido de mucílagos, pectinas, hemicelulosas débilmente y fuertemente unidas y celulosa de nopalitos de especies de *Opuntia* identificadas en un gradiente de domesticación, y se hipotetiza que la proporción de mucílago y pectinas está en relación opuesta al gradiente de domesticación. Las especies (y variantes) evaluadas fueron *O. streptacantha* (Cardona de Castilla, Coloradita y Tuna Loca), *O. hyptiacantha* (Memelo y San Pedreña), *O. megacantha* (Amarillo Montesa, Chapeada y Rubí Reyna), *O. albicarpa* (Copena Z1, Naranjón Legítimo y Villanueva) y *O. ficus-indica* (Atlixco, Copena V1 y Rojo Vigor). El experimento se desarrolló bajo un diseño experimental completamente al azar, con arreglo factorial 5x14, se realizó un análisis de varianza, comparación múltiple de medias de Tukey y multivariable de componentes principales y agrupamiento de los datos morfológicos, la proporción y el tipo de polisacáridos estructurales. Los polisacáridos fueron extraídos en secuencia con disolventes acuosos (agua, oxalato de amonio e hidróxido de potasio), precipitados con etanol, purificados por lavado acuoso y diálisis contra agua y cuantificados gravimétricamente después de ser liofilizados. Hubo diferencias significativas ($p < 0.05$) entre variantes y especies en el contenido de los polisacáridos. El mucílago fue más abundante ($p < 0.05$) en *O. hyptiacantha* y *O. ficus-indica*. El contenido de pectinas, hemicelulosas débilmente y fuertemente unidas fue mayor ($p < 0.05$) en *O. streptacantha* y *O. megacantha* en comparación con las otras tres especies. Las cinco especies presentaron contenido similar de celulosa, fibra soluble e insoluble ($p < 0.05$); pero, *O. streptacantha* presentó más fibra alimentaria ($p < 0.05$). Los contenidos de mucílagos o pectinas no mostraron relación inversa con el grado de domesticación. El análisis de componentes principales con la proporción de los polisacáridos estructurales y fibra demostró la cercanía entre *O. streptacantha* y *O. megacantha*; esto puede tomarse como evidencia de que la domesticación de *O. ficus-indica* inició con la selección de variantes de estas dos especies. Las diferencias de concentración de los polisacáridos entre variantes de una misma especie son tomadas como evidencia de procesos de selección

diversos en *Opuntia*. La concentración alta de mucílago en *O. ficus-indica* puede estar relacionada con la diversidad de ambientes a los que esta especie está adaptada.

Palabras clave: *Opuntia*, polisacáridos estructurales, fibra alimentaria, domesticación.

Abstract

Diverse evidences show that the domestication of *Opuntia* began with the selection of variants of *O. streptacantha*, followed of *O. hyptiacantha* and *O. megacantha* and concentrated on *O. albicarpa* and *O. ficus-indica*. In nopalitos, the polysaccharides more abundant are mainly of structural type. The objective of this study was to know the content of mucilage, pectin, loosely and tightly bound hemicelluloses and cellulose in “nopalitos” from *Opuntia* species identified in the domestication gradient and the hypothesis that the proportion of mucilage and pectins is in opposed relation of the domestication gradient. The species (and variants) evaluated were *O. streptacantha* (Cardona de Castilla, Coloradita y Tuna Loca), *O. hyptiacantha* (Memelo and San Pedreña), *O. megacantha* (Amarillo Montesa, Chapeada and Rubí Reyna), *O. albicarpa* (Copena Z1, Naranjón Legítimo and Villanueva) and, *O. ficus-indica* (Atlixco, Copena V1 and Rojo Vigor). The experiment was a conducted as completely randomized with 5x14 two factor factorial treatment structure and four replications. ANOVA, multiple comparisons by Tukey and multivariate analysis of principal components were performed with the data. The polysaccharides were sequentially extracted with aqueous solvents (water, ammonium oxalate and, potassium hydroxide), precipitated with ethanol, purified by watery washed and dialysis against water and gravimetrically quantified after being lyophilized. There was significant differences ($p<0.05$) between variants and species in polysaccharides content. Mucilages were more abundant ($p<0.05$) in *O. hyptiacantha* and *O. ficus-indica*. The content of pectins, loosely and tightly bound hemicelluloses was higher ($p<0.05$) in *O. streptacantha* and *O. megacantha* in comparison with the other three species. All five species presented similar content of cellulose, soluble and insoluble fiber ($p<0.05$); but, *O. streptacantha* presented more dietary fiber ($p<0.05$). Although mucilage or pectins content did not show an inverse relationship with domestication degree, the analysis of principal components of the proportion of structural polysaccharides demonstrated the nearness between *O. streptacantha* and *O. megacantha*; this could be an evidence that *O. ficus-indica* domestication began with selection of variants of these two species. Polysaccharides concentration differences between variants of the same species are taken as evidence from diverse processes of selection in *Opuntia*. The high

concentration of mucilage in *O. ficus-indica* can be related to the environments diversity to this specie is adapted.

Keywords: *Opuntia*, structural polysaccharides, dietary fiber, domestication.

Introducción

La domesticación es un proceso evolutivo que altera características genéticas y morfológicas de plantas silvestres y es producto de una selección artificial y cultural (Perales y Aguirre, 2008). Con la domesticación las plantas incrementan su adaptación a los ambientes creados por los humanos (Casas *et al.*, 1999). El proceso de humanización se inició con la selección de especies que destacaron por sus atributos y que fueron funcionales en los ambientes humanizados y con el tiempo presentaron diferencias genéticas y morfológicas con respecto a sus parientes silvestres (Perales y Aguirre, 2008).

En México las plantas del género *Opuntia* han recibido atención especial desde épocas prehispánicas (Martin del Campo, 1957), hace más de 9000 años (Callen, 1966 citado por Reyes-Agüero *et al.*, 2005a). Reyes-Agüero *et al.* (2005b) señalaron que la relación *Opuntia* – *Homo sapiens* es una evidencia más de que la recolección favorece el reconocimiento de plantas con ciertas características, en este caso de interés para los primeros pobladores de América, y esto favorece la subsecuente selección de variantes derivadas, que pueden permanecer en las nopaleras silvestres, o, a través de los solares, pasar a los campos de cultivo (Reyes-Agüero, 2005).

Diversos autores coinciden en señalar que *O. ficus-indica* es la especie que presenta el nivel de domesticación más alto (Bravo, 1978; Griffith, 2004; Reyes-Agüero *et al.*, 2005a, 2005b); esto se refleja en un gran número de cultivares de la especie con usos diversos (Gallegos-Vázquez *et al.*, 2006) y a que es exclusiva de ambientes humanos, es decir, está ausente en ambientes silvestres (Reyes-Agüero *et al.*, 2005b). Bravo (1978) menciona que la domesticación de *O. ficus-indica* en el sur de la altiplanicie mexicana pudo ocurrir durante el neolítico y que fue hasta la época colonial cuando fueron establecidos huertos y solares de traspatio para el cultivo de *O. ficus-indica*. Debido a lo anterior la altiplanicie meridional de México es considerada el centro de domesticación de *O. ficus-indica* (Reyes-Agüero *et al.*, 2005a). Pero también hay evidencia de que *O. albicarpa* es una especie con alto grado de domesticación que, aunque algunas de sus variantes han conservado las espinas en sus cladodios, es un carácter deseable para mantenerse en plantaciones del norte de México, muy expuestas a la herbivoría de vertebrados (Reyes-Agüero *et al.*, 2005a).

Las especies *O. hyptiacantha*, *O. lasiacantha*, *O. megacantha* y *O. streptacantha*, muestran diferentes niveles de humanización y son consideradas ancestros de *O. albicarpa* y *O. ficus-indica* (Bravo, 1978; Reyes-Agüero *et al.*, 2005a). Aunque en *O. ficus-indica* seguro hubo una influencia de *O. megacantha*, que es la especie más cercana a la forma silvestre (Griffith 1914, citado por Bravo, 1978), lo más probable es que se derivó de *O. albicarpa* (Reyes-Agüero *et al.*, 2005a). En la región del Bajío mexicano (centro-norte de México) se encontraron variantes silvestres con diferente grado de humanización (*sensu* Perales y Aguirre, 2008) relacionadas con las series Streptacanthae y Ficus-indicae (Colunga *et al.*, 1986).

Probablemente la selección de la serie Streptacanthae comenzó con *O. streptacantha*, posteriormente continuó con especies, como *O. hyptiacantha* y *O. megacantha*, con cierta circunscripción local y finalmente se concentró en variantes con frutos grandes y asociadas a *O. albicarpa* y *O. ficus-indica* (Reyes-Agüero *et al.*, 2005a).

Reyes-Agüero (2005) asegura que, en general, el fruto fue el órgano de mayor interés en la domesticación de *Opuntia* y su gigantismo uno de los síndromes de domesticación más notables; sin embargo, en particular, variantes de *O. ficus-indica* mostraron dos tendencias del síndrome de domesticación: 1) hacia la producción de nopalitos, e incluye variantes con cladodios pequeños, sin glóquidas y varias aréolas con espinas, sus nopalitos presentan hojas largas y algunas espinas aciculares y setosas en sus aréolas, los frutos de estas variantes son amarillos, pequeños, con pulpa poco dulce, semillas abortivas abundantes y las normales son escasas y pequeñas; 2) hacia la producción de fruto, e incluye variantes con cladodio grande, ovalado a rómbico, verde pálido, aréolas numerosas y sin espinas y abundancia de glóquidas, además presentan nopalitos inermes, frutos rojos, grandes con semillas normales y abundantes (Reyes-Agüero *et al.*, 2005a).

Los nopalitos son ricos en polisacáridos del tipo estructural, macromoléculas constituidas por unidades de monosacáridos, que han sido agrupados por sus características fisicoquímicas en mucílagos, pectinas, hemicelulosas y celulosa (Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta, 2004). Estos grupos de polisacáridos están en proporciones variables en los vegetales y varían según la especie, el órgano o tejido, el estado de madurez o etapa fenológica de la planta (García y Peña, 1995).

Los polisacáridos de los nopalitos, exclusivamente de tipo estructural (Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta, 2006), también conocidos como carbohidratos no disponibles o no glucémicos (no son metabolizados por el organismo humano; Englyst y Englyst, 2005), son de dos tipos: solubles o insolubles en disolventes acuosos, y pueden constituir hasta cerca del

90 % de las paredes celulares de los vegetales y la mayor parte de la fibra de los alimentos. Entre los polisacáridos solubles de los nopalitos están los mucílagos. En términos de calidad de los nopalitos, la presencia, y probablemente la proporción y composición del mucílago es uno de los factores que determina la preferencia de un cultivar de *Opuntia* u otro entre los consumidores de nopalitos, o para la selección de estos como materia prima para la manufactura de productos diversos (Huerta y Montes, 2003; Razo y Sánchez, 2002).

La heterogeneidad y complejidad de los polisacáridos estructurales en nopalitos y tunas ha sido demostrada por varios autores (Álvarez y Peña-Valdivia, 2008; Malainine *et al.*, 2003; Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta, 2006 y 2004). Los nopalitos de 13 cultivares de *Opuntia* spp., con importancia comercial, cultivados en un campo experimental y cosechados en el periodo de lluvias mostraron contenido de mucílago desde 4.0 hasta 8.6 %, pectinas entre 5.0 y hasta cerca de 15.0 %, hemicelulosas entre 11.5 y 15.0 % y celulosa entre 4.0 y 15.0 % (Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta, 2006 y 2004). También se ha demostrado que la proporción de los polisacáridos estructurales es variable en tuna dulce de diferentes cultivares y entre etapas de desarrollo de las tunas dulces y ácidas (xoconostle) (Álvarez y Peña-Valdivia, 2008; Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta, 2006 y 2004).

El contenido de mucílagos, pectinas y celulosa, representó una cantidad significativamente superior en la cáscara de los frutos de xoconostle con mayor madurez (7.5 a 14.5 %) con respecto a los menos maduros (2.0 a 10.0 %); mientras que el contenido de hemicelulosas fue estadísticamente igual en tres estados de madurez evaluados (3.2 y 1.5 % de hemicelulosa débilmente y fuertemente unidas, respectivamente) (Álvarez y Peña-Valdivia, 2008). Estos resultados contrastaron con la pulpa de tuna de *O. ficus-indica*; el cultivar Solferino mostró 1 % de mucílago independientemente de la madurez de los frutos, pero en los cultivares Copena V1 y Moradaza incrementó con la maduración, de 0.6 y 0.45 a 1.7 y 0.79 % la concentración de hemicelulosas débilmente y fuertemente unidas, respectivamente. Además, las pectinas y hemicelulosas débilmente unidas de los frutos maduros de los cultivares Moradaza y Solferino representaron únicamente entre 0.7 y 2.1 %, respectivamente (Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta, 2006 y 2004).

En un estudio en el que se evaluaron los nopalitos de cinco cultivares de la especie domesticada *O. ficus-indica* y se compararon con los nopalitos de la especie silvestre de *O. streptacantha*, se demostró que la deshidratación gradual del suelo durante 60 días, a partir de capacidad de campo, con un potencial de agua (Ψ_A) de -0.3 hasta -3.27 MPa (equivalente a 4.0 % de humedad), incrementó significativamente el contenido de polisacáridos estructurales de los nopalitos, en proporción variable entre las variantes domesticadas y la silvestre. En

esas condiciones el mucílago incrementó desde 2.5 a 6.0 %, las pectinas entre 3.8 y 15.0 %, las hemicelulosas desde 4.5 hasta 18.0 %, y la celulosa desde 4.5 hasta 21.0%. El cultivar Milpa Alta presentó, en general, un patrón de cambio del contenido de polisacáridos dependiente del Ψ_A del suelo diferente al resto de los cultivares (Atlixco, Copena V1, Moradaza y Solferino). Además, la especie silvestre, *O. streptacantha*, presentó los contenidos significativamente mayores de fibra total y de sus componentes (García *et al.*, 2010).

Las características morfológicas de los órganos fueron utilizadas para describir el gradiente de domesticación del género *Opuntia* (Reyes-Agüero *et al.*, 2005a); sin embargo, se desconoce la relación de los cambios en este gradiente de la composición química de las plantas. Los polisacáridos son particularmente interesantes por su abundancia, diversidad y proporción elevada tanto en cladodios como en los frutos. Con base en lo anterior, el presente estudio tuvo como objetivo conocer el contenido de polisacáridos estructurales de los cladodios jóvenes de 14 variantes de nopal de cinco especies de *Opuntia* representantes de un gradiente de domesticación, con la hipótesis de que polisacáridos como los mucílago y las pectinas, disminuyen en las especies con mayor nivel de domesticación.

Materiales y métodos

Se utilizaron nopalitos de 14 variantes de cinco especies: *O. streptacantha* (variantes Cardona de Castilla, Coloradita, y Tuna Loca), *O. hyptiacantha* (Memelo 1 y San Pedreña), *O. megacantha* (Amarillo Montesa, Chapeada y Rubí Reyna), *O. albicarpa* (Copena Z1, Naranjón Legítimo y Villanueva) y *O. ficus-indica* (Atlixco, Copena V1 y Rojo Vigor), representantes del gradiente de domesticación reconocido por Reyes-Agüero *et al.* (2005a). En éste, *O. streptacantha* está en el extremo silvestre y *O. ficus-indica* en el de mayor domesticación. Los cladodios se obtuvieron del banco de germoplasma del Centro Regional Universitario Centro Norte de la Universidad Autónoma Chapingo (CRUCEN-UACH), localizado a 4 km al suroeste de la ciudad de Zacatecas, México, en la localidad de “Huertas del Orito” (22° 44.7’ latitud Norte y 102° 36.4’ longitud Oeste), clima BS1kw(w), con lluvias en verano e invierno frío (García, 2004). En ese banco, las plantas muestreadas han crecido los últimos diez años en condiciones ambientales homogéneas; es decir, han estado sometidas a las mismas temperaturas, precipitación, tipo de suelo, etc.

En mayo de 2009 se obtuvieron nopalitos con una longitud de 17.5 ± 2.5 cm (estadio de crecimiento 2, según Ramírez-Tobías *et al.*, 2007 y López-Palacios *et al.*, 2010) y sin evidencia de producción de yemas. Al momento de la cosecha se midió: anchura máxima del

nopalito, grosor del podario, grosor en el ápice y centro del nopalito, número de aréolas con y sin espinas por cara y en el margen. Luego, los nopalitos fueron trasladados conservados en hielo al laboratorio de Biofísica del Posgrado de Botánica, del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Edo. de México. En ese laboratorio se determinó el contenido de polisacáridos; para ello los nopalitos fueron seccionados en trozos pequeños y congelados a -20°C , se deshidrataron por liofilización (Labconco® modelo Free Zone 6, Kansas city, MO, EE.UU.), se determinó el porcentaje de materia seca y los segmentos deshidratados fueron triturados en un mortero hasta obtener un polvo.

Para la extracción, purificación y cuantificación de los polisacáridos se empleó el método descrito para nopalitos y tunas por Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta (2004) y probado por Álvarez y Peña-Valdivia (2009) en frutos de xoconostle. La metodología incluye la extracción en secuencia de los polisacáridos con disolventes acuosos (agua caliente, oxalato de amonio e hidróxido de potasio), precipitación con etanol, purificación por lavado acuoso y diálisis contra agua y cuantificación gravimétrica después de ser liofilizados.

El mucílago se extrajo con agua destilada y calor de 1g de muestra deshidratada, en una relación 1:20 (peso: volumen); del residuo, ya sin mucílago, también con calor fueron solubilizadas las pectinas con oxalato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$ acuoso al 0.5% en una relación 1:15 (peso original:volumen). El residuo sólido, ya sin mucílago ni pectinas, fue usado para extraer dos grupos de hemicelulosas, las clasificadas como débilmente y fuertemente unidas a la celulosa. El primer grupo fue disuelto en hidróxido de potasio (KOH) acuoso al 5.0 %, en relación 1:10 (peso original:volumen) y las fuertemente unidas con KOH al 24.0 %. La fase sólida residual, después de disolver los cuatro grupos de polisacáridos (mucílagos, pectinas y los dos tipos de hemicelulosas), se lavó con agua hasta alcanzar pH neutro, se congeló y luego se deshidrató con liofilizador, lo que representó la celulosa.

Para asegurar la extracción exhaustiva, cada extracción se realizó por triplicado en la misma muestra. Cada grupo de polisacáridos se concentró al precipitarlo con etanol en proporción 4:1 (v:v), se separó de la fase acuosa por centrifugación (Damon modelo IEC HN-S, EE.UU.) y se purificó mediante diálisis en membrana tubular contra agua destilada durante 72h. Después de la diálisis, los polisacáridos fueron congelados y deshidratados mediante liofilización, ya secos, se cuantificaron en una balanza analítica (Scientech® modelo SA 120, $\pm 0.0001\text{g}$, EE. UU.). El contenido de cada polisacárido fue representado como porcentaje del tejido seco original.

Se determinó la presencia o ausencia de lignina por tinción con fluoroglucinol acuoso en el residuo del tejido identificado como celulosa de acuerdo con la metodología descrita por Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta (2004).

La recolección de las muestras, su procesamiento y análisis, se desarrollaron en un diseño experimental completamente al azar, con arreglo factorial 5x14, con cinco repeticiones. Los factores y niveles fueron: especie de *Opuntia* (5) y variante (14). Con los datos se realizó un análisis de varianza, comparación múltiple de medias de Tukey y multivariable de componentes principales y agrupamiento de los datos morfológicos, así como de la proporción y el tipo de polisacáridos estructurales con el paquete estadístico SAS (SAS, 1999-2000). La representación gráfica de los resultados se realizó con el programa de SigmaPlot de Jandel Scientific (Versión 10.0).

Resultados y discusión

Características morfológicas

Los nopalitos de las cinco especies mostraron ser homogéneos morfológicamente de sus nopalitos, pues la anchura mayor del nopalito, el grosor del podario, del ápice y del centro del nopalito, el número de aréolas en una cara y en el margen fueron significativamente similares ($p > 0.05$) entre ellas. Al contrario, el número de aréolas con espinas por cara y en el margen mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$). En ambos atributos se observó un gradiente amplio, entre 23 y 2, y 29 y 3, respectivamente en *O. streptacantha* y *O. ficus-indica*, con una clara posición intermedia de *O. megacantha* y *O. albicarpa* (Cuadro 3.1).

Los resultados morfológicos de las especies del presente estudio coinciden con los documentados por Reyes-Agüero *et al.* (2005a), en los que señalan que en los cladodios de dos años de edad de especies con el menor nivel de domesticación presentan una densidad alta de aréolas con espinas. Fue el caso de los nopalitos de *O. streptacantha* y *O. hyptiacantha*, en oposición a las especies con mayor grado de domesticación. Al respecto, los mismos autores indicaron que la tendencia en la selección de variantes de *O. ficus-indica* pudo haber sido determinada por la preferencia de cladodios con pocas hileras de aréolas y densidad baja de ellas y con pocas espinas. Aunque en nopalito con tamaño estandarizado, como en el presente estudio, la semejanza estadística de la cantidad y densidad de aréolas de las cinco especies, indica que no fue un factor de selección durante la domesticación, como al parecer, si lo fue la presencia de espinas; en parte, por que entre las funciones de estas estructuras está la protección mecánica contra vertebrados herbívoros en el ambiente silvestre (Baker, 1971; Casas *et al.*, 1999 y 1997; Reyes-Agüero *et al.*, 2005a).

Cuadro 3.1 Características morfológicas de nopalitos de 17.5 ± 2.5 cm, de cinco especies de *Opuntia*.

Atributo	Especie				
	Str ¹	Hyp ²	Meg ³	Alb ⁴	Fic ⁵
Peso (g)	69.23 a*	63.33 a	58.92 a	72.99 a	69.10 a
Anchura (cm)	9.21 a	8.62 a	8.16 a	9.23 a	9.33 a
Grosor del podario (cm)	1.39 a	1.45 a	1.51 a	2.54 a	1.42 a
Grosor en el ápice (cm)	0.35 a	0.41 a	0.41 a	0.34 a	0.31 a
Grosor en el centro (cm)	0.57 a	0.55 a	0.58 a	0.57 a	0.54 a
Aréolas por cara (Núm.)	56.33 a	57.83 a	53.00 a	57.44 a	55.77 a
Aréolas con espinas por cara (Núm.)	23.17 a	21.75 a	17.77 ab	10.19 bc	2.12 c
Aréolas en el margen (Núm.)	62.11 a	69.33 a	60.64 a	62.13 a	66.71 a
Aréolas con espinas en el margen (Núm.)	29.11 a	27.08 a	18.64 ab	13.19 bc	3.18 c

¹Str= *O. streptacantha*; ²Hyp= *O. hyptiacantha*; ³Meg= *O. megacantha*; ⁴Alb= *O. albicarpa*; ⁵Fic= *O. ficus-indica*. *Valores con la misma letra en las hileras son significativamente similares (Tukey, $p < 0.05$).

La variación entre los datos morfológicos evaluados en el presente estudio acumuló 99.42 % en los primeros tres componentes principales. La representación gráfica de este análisis (Figura 3.1) mostró tres grupos en el eje de las abscisas (Figura 3.1A y 3.1B), uno con variantes de *O. ficus-indica* en un extremo del eje, en el extremo contrario un segundo grupo con dos variantes de *O. streptacantha* y el tercero, intermedio con las especies restantes; el análisis mostró que, en gran parte, el número de aréolas con espinas del margen determinaron la separación de los grupos. Esta tendencia coincidió con el resultado del análisis univariable (Cuadro 3.1), que mostró que *O. ficus-indica* presentó el menor número de aréolas con espinas en el margen entre las cinco especies y la variabilidad entre las tres variantes representantes de esta especie, incluidas en el estudio, mostraron diferencias pequeñas en este carácter (Cuadros 3.2 y 3.3). Lo anterior se relaciona con uno de los principales factores morfológicos que han caracterizado el estudio de esta especie (Reyes-Agüero *et al.*, 2005a). Además del número de aréolas con espinas en el margen, el número de aréolas por cara y el número de aréolas con espinas en el margen fueron los otros factores que determinaron la separación de los grupos en el CP2. Para el CP3 (Figuras 3.1B y 3.1C) se presentó nuevamente el número de aréolas por cara y del margen. Del grupo con las cuatro especies, *O. megacantha* destacó por que, aunque se mezcló parcialmente con las otras tres, formó una nube compacta entre las coordenadas -4 y 2 de las abscisas (Figura 3.1C); esta especie presentó el número intermedio de aréolas con espinas en el margen (19 espinas) y de aréolas con espinas por cara (18) entre *O. ficus-indica* y las otras especies (Cuadros 3.1 y 3.3). Con lo que se ratifica esa posición intermedia que tiene en el proceso de domesticación (Reyes-Agüero, 2005). *Opuntia streptacantha* también destacó, pues con algunos de los

valores mayores de esos dos parámetros mostró la distribución más amplia en el CP1 y CP2 (entre 0 y 48 en el CP1, y 18 en el CP2).

Cuadro 3.2 Valores propios y varianza acumulada de los CP1, CP2 y CP3 de siete atributos morfológicos de 14 variantes de nopalitos (*Opuntia* spp.).

Atributo	CP1	CP2	CP3
Anchura	-0.001574	0.043352	0.048486
Grosor del podario	0.002093	-0.001998	0.008288
Grosor del ápice	0.001685	0.000078	-0.004119
Grosor en el centro	0.000769	-0.001526	0.004409
Aréolas por cara	0.031839	0.382414	0.921363
Aréolas en el margen	-0.164330	0.912322	-0.374371
Aréolas con espinas en margen	0.985886	0.139793	-0.092093
Varianza acumulada	0.6671	0.9047	0.9942

La cercanía de los grupos de *O. ficus-indica* y *O. megacantha* coincide con lo señalado por Colunga *et al.* (1986), respecto a que la primera procede de la segunda. Aunque es importante aclarar que en el área de estudio de la autora citada, *O. albicarpa* estuvo ausente. La predominancia de variantes con aréolas sin espinas es considerada un síndrome de la domesticación del género. Los puntos dispersos en una región distante de la agrupación principal respectiva en la Figura 3.1 pueden ser representativos de procesos de selección diversos entre las variantes de cada especie. Estas características concuerdan con dos de las tendencias de selección durante la domesticación, una hacia nopalitos y otra hacia fruto (Reyes-Agüero *et al.*, 2005a).

El porcentaje de biomasa seca fue estadísticamente similar ($p > 0.05$) entre las 14 variantes de las cinco especies, y fluctuó entre 7.0 y 9.5 % (Cuadro 3.4). Estos valores fueron mayores a los de nopalitos de tres especies de *Opuntia*, pero del mismo estado de crecimiento seleccionado para la presente investigación, obtenidos en invernadero (3.9 a 4.6 %), en un sistema hidropónico, por Ramírez-Tobías *et al.* (2007) y menores a los registrados por Pinos-Rodríguez *et al.* (2006) en cladodios de un año de edad (18.3 %) y creciendo en condiciones de campo.

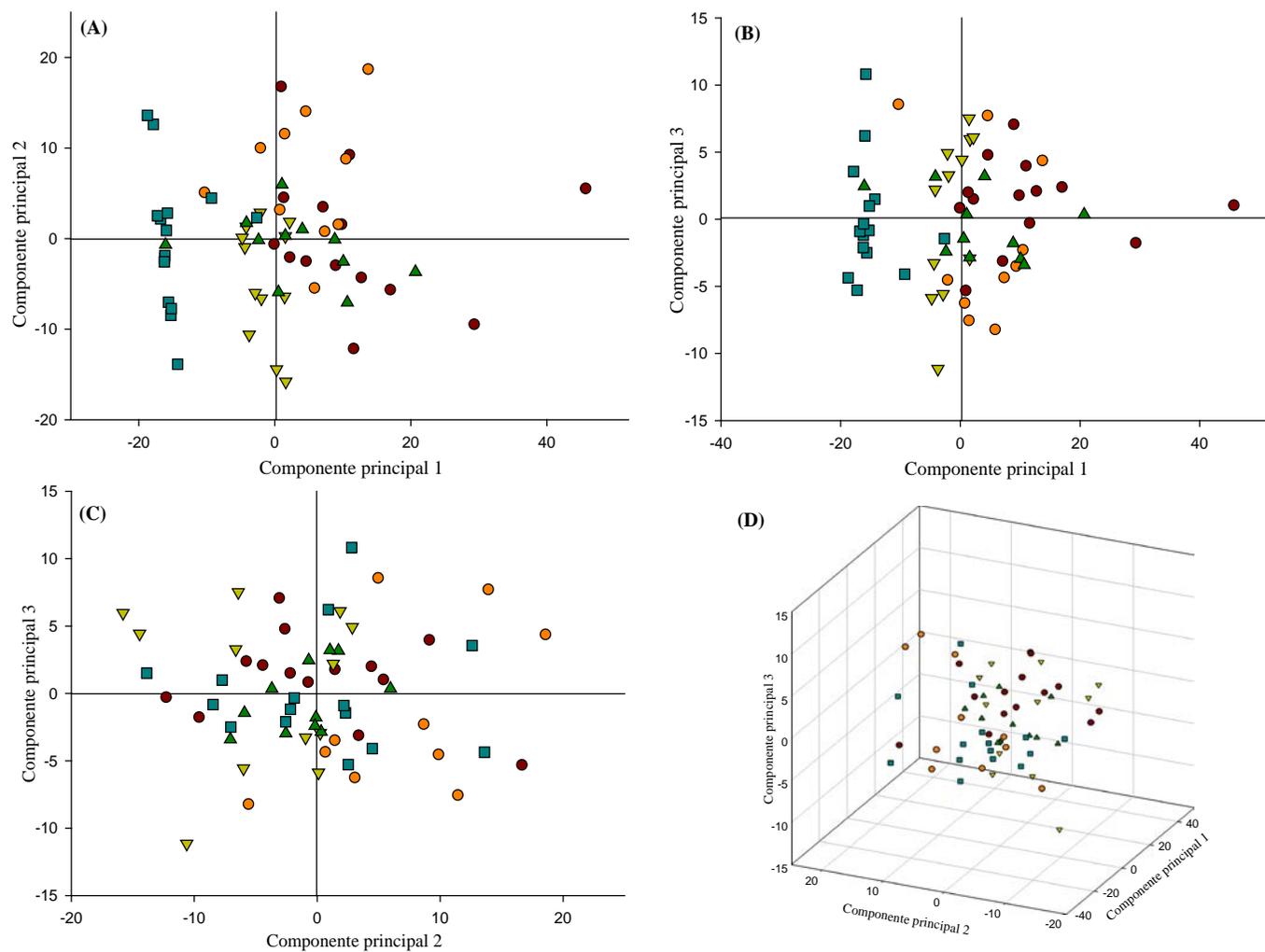


Figura 3.1 Representación gráfica de los tres primeros componentes principales (CP) de siete atributos morfológicos de 14 variantes de nopalitos de cinco especies (● *Opuntia streptacantha*, ● *O. hyptiacantha*, ▼ *O. megacantha*, ▲ *O. albicarpa*, ■ *O. ficus-indica*) representantes de un gradiente de domesticación.

Cuadro 3.3 Caracterización morfológica de nopalitos de variantes de especies pertenecientes a un gradiente de domesticación de *Opuntia*.

Variante	Atributos morfológicos								
	Peso (g)	Anchura (cm)	Grosor (cm)			Aréolas (Núm.)			
			Podario	Ápice	Centro	Por cara	Con espinas por cara	En el margen	Con espinas en margen
<i>O. streptacantha</i>									
Cardona de Castilla	62.48	8.60	1.50	0.40	0.57	54.2	36.3	61.3	46.0
Coloradita	83.89	9.20	1.33	0.28	0.56	57.7	17.3	60.3	20.3
Tuna Loca	61.32	9.83	1.33	0.36	0.58	57.2	15.8	64.7	21.0
<i>O. hyptiacantha</i>									
Memelo	60.03	7.68	1.36	0.41	0.53	55.8	17.3	70.7	18.0
San Pedreña	66.63	9.55	1.54	0.41	0.57	59.8	26.2	68.0	36.2
<i>O. megacantha</i>									
Amarillo Montesa	55.89	8.00	1.49	0.51	0.62	48.0	19.3	51.7	19.8
Chavena	55.64	7.75	1.64	0.36	0.52	59.2	19.7	67.0	16.5
Rubí Reyna	56.13	7.55	1.49	0.41	0.66	55.7	18.8	65.3	23.8
Villana Roja	72.58	9.93	1.41	0.30	0.51	47.3	11.0	57.5	12.3
<i>O. albicarpa</i>									
Copena 3	51.00	8.25	1.50	0.39	0.50	52.0	16.0	61.0	25.5
Copena Z1	77.76	9.30	1.71	0.50	0.76	59.0	5.0	73.3	15.3
Naranjón Legítimo	103.32	10.08	2.05	0.33	0.65	63.4	23.2	64.0	22.8
Villanueva	52.65	8.82	3.71	0.24	0.42	53.5	0.0	55.3	0.0
<i>O. ficus-indica</i>									
Atlixco	62.56	9.58	1.48	0.24	0.64	51.4	3.4	63.6	4.4
Copena V1	65.31	8.60	1.33	0.38	0.58	53.7	0.0	63.7	0.0
Rojo Vigor	78.33	9.85	1.47	0.30	0.43	61.5	3.2	72.3	5.3

La similitud de la proporción de materia seca acumulada entre variantes silvestres y domesticadas ha sido documentada en otras especies como frijol (*Phaseolus* spp.) y arroz (*Oryza* spp.) (Cook y Evans, 1983; Smartt, 1988). Aunque cuando hay diferencias, como lo señaló Smartt (1988) en el frijol silvestre, es debido a que las hojas son menores en las especies domesticadas, lo que puede explicar la diferencia de biomasa seca. En cladodios de dos años si es posible advertir esta similitud con *Opuntia*, pues los cladodios de las especies domesticadas son notoriamente más grandes. Sin embargo, en el presente trabajo fue improbable la detección de una relación similar ya que la longitud homogénea de los nopalitos (17.5 ± 1.5 cm) fue un criterio de selección.

Cuadro 3.4 Porcentaje de biomasa seca de nopalitos de variantes de cinco especies de *Opuntia* representantes de un gradiente de domesticación.

Variante	Especie	Materia seca (%)
	<i>O. streptacantha</i>	
Cardona de Castilla		7.04 a*
Coloradita		7.75 a
Tuna Loca		7.88 a
	<i>O. hyptiacantha</i>	
Memelo		7.17 a
San Pedreña		8.23 a
	<i>O. megacantha</i>	
Amarillo Montesa		9.52 a
Chapeada		7.80 a
Rubí Reyna		7.45 a
	<i>O. albicarpa</i>	
Copena Z1		8.21 a
Naranjón Legítimo		7.43 a
Villanueva		8.33 a
	<i>O. ficus-indica</i>	
Atlixco		9.06 a
Copena V1		8.38 a
Rojo Vigor		7.99 a
	<i>O. streptacantha</i>	7.56 a
	<i>O. hyptiacantha</i>	7.70 a
	<i>O. megacantha</i>	8.26 a
	<i>O. albicarpa</i>	7.99 a
	<i>O. ficus-indica</i>	8.48 a

*La misma letra indica similitud estadística (Tukey, $p < 0.05$).

Polisacáridos estructurales

Mucílagos

El contenido de mucílago varió amplia y significativamente entre las 14 variantes, las variantes de cada especie y las cinco especies (Figura 3.2 y Cuadro 3.5). Alcanzó una diferencia del 63 % entre las cinco especies, con los contenidos significativamente menores (7.2 % en promedio) en un grupo conformado por *O. streptacantha*, considerada la más silvestre del grupo, *O. megacantha* y *O. albicarpa* y el mayor en *O. ficus-indica* (11.7 %), en el nivel mayor de domesticación.

Entre variantes, Naranjón Legítimo de *O. albicarpa* y Copena V1 de *O. ficus-indica* mostraron la proporción menor y mayor de este polisacárido, 3.8 y 13.2 %, respectivamente (Figura 3.2). La diferencia mayor del contenido de mucílago dentro de las especies la presentaron las silvestres de *O. streptacantha*, en Cardona de Castilla con la tercera parte del contenido de Tuna Loca, y las de *O. hyptiacantha* en San Pedreña con la mitad del contenido de Memelo.

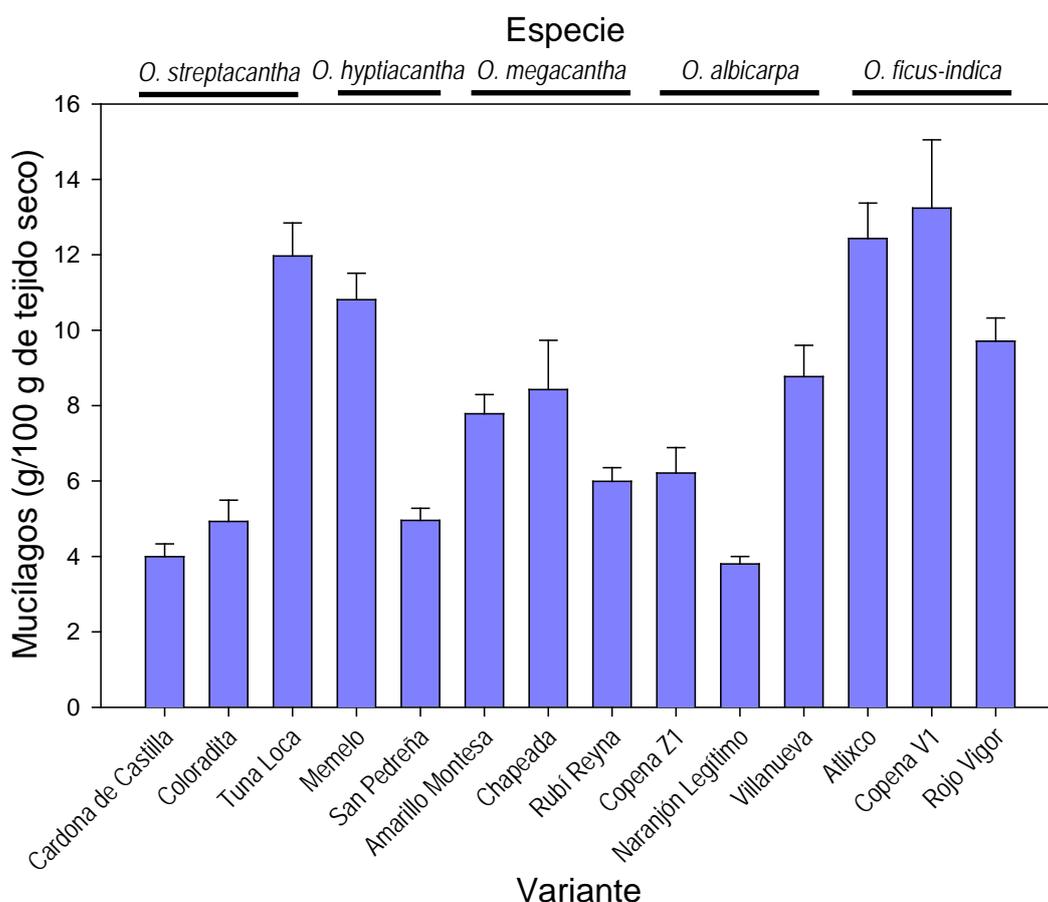


Figura 3.2 Mucílago en nopalitos de 14 variantes de cinco especies de *Opuntia* representantes de un gradiente de domesticación, + el error estándar.

Cuadro 3.5 Contenido de polisacáridos estructurales de nopalitos de cinco especies de *Opuntia* pertenecientes a un gradiente de domesticación.

Polisacárido (%)	Especie				
	Str ¹	Hyp ²	Meg ³	Alb ⁴	Fic ⁵
Mucílago	7.18 b*	8.47 ab	7.40 b	6.89 b	11.72 a
Pectinas	2.53 a	1.58 b	2.59 a	1.88 b	1.83 b
Hemicelulosas					
Débilmente unidas	8.65 a	6.32 bc	7.89 ab	4.89 c	4.59 c
Fuertemente unidas	3.70 a	2.38 b	3.18 ab	1.63 b	2.30 b
Celulosa	4.89 a	5.47 a	4.63 a	5.25 a	5.49 a

¹Str= *O. streptacantha*; ²Hyp= *O. hyptiacantha*; ³Meg= *O. megacantha*; ⁴Alb= *O. albicarpa*; ⁵Fic= *O. ficus-indica*. *Valores seguidos por la misma letra dentro de líneas son significativamente similares (Tukey, $p < 0.05$).

El contenido de mucílago de nopalitos de diferentes cultivares de *O. ficus-indica*, crecidos en ambientes diferentes ha sido documentado. Durante la época de lluvia el mucílago de seis variantes representó entre 4.0 y 8.0 % de la biomasa seca (Peña-Valdivia *et al.*, 2010), mientras que cinco producidas en invernadero, con irrigación, contenían entre 1.5 y 3.0 %. Sin embargo, con 60 días de restricción de humedad el polisacárido aumentó más del doble en algunas de ellas, como Atlixco y Copena V1; en contraste, en Milpa Alta, aunque al inicio tendió a incrementar, al final de ese tiempo el contenido de mucílago se mantuvo igual que en la condición con riego, también se observó que *O. streptacantha* fue una de las especies con menor proporción de mucílago (García *et al.*, 2010). En el presente estudio también se pudo apreciar esto último, aunque sin diferencias estadísticas (Cuadro 3.4). En general, se observa que la diferencia mayor del contenido del mucílago se debe al ambiente, en especial la humedad.

Las funciones probables del mucílago en relación con el agua de la planta y la influencia de los solutos en la planta de nopal han sido analizadas. Nobel *et al.* (1992) sugirieron la acción del mucílago como un capacitor en la zona extracelular, que regula la presencia de los solutos dentro de la célula durante las primeras etapas de sequía, y que, por la diferencia de presión osmótica, se convierte en la fuente de agua para la célula, con lo que permite mantener su turgencia durante ese periodo; lo anterior fue confirmado parcialmente por García *et al.* (2010) con el incremento significativo del contenido de mucílago en tres cultivares de *O. ficus-indica* y una recolecta silvestre de *O. streptacantha* después de permanecer 60 días sin riego. Golstein y Nobel (1994) propusieron que el mucílago actúa como reservorio de agua para la formación de cristales de hielo en el apoplasto de plantas de *O. ficus-indica* mantenidas en temperaturas bajas, lo que genera cierta protección a las células; además, demostraron que la especie de *Opuntia* de las regiones frías del sureste de

Canadá y noreste de los Estados Unidos, *O. humifusa*, incrementó en mayor proporción el contenido de mucílago en reacción al frío respecto a *O. ficus-indica* y *O. streptacantha*. Esto parece indicar que la mayor o menor presencia de mucílago es un indicador de la adaptación de la planta a ciertas condiciones ambientales. Lo anterior muestra que las diferencias de concentración de mucílago entre las variantes de una especie y entre especies son, en parte, debidas a la presión de la selección natural. Por otro lado, el contenido de mucílago determina la selección, aceptación y comercialización del nopalito por los consumidores, lo cual puede variar regionalmente (Razo y Sánchez, 2002) o por factores culturales (López-Palacios *et al.*, 2010).

Pectinas

El contenido de pectinas, al igual que el mucílago, varió significativamente entre las 14 variantes, las variantes de cada especie y entre las especies; aunque los contrastes fueron menores (Figura 3.3 y Cuadro 3.5). Entre las cinco especies se formaron sólo dos grupos; uno lo integraron *O. albicarpa* y *O. ficus-indica*, las dos de mayor nivel en el gradiente de domesticación, junto con una de las silvestres, *O. hyptiacantha*, y en el otro, *O. streptacantha* y *O. megacantha*, con contenido menor y mayor, respectivamente. Así, se puede advertir una cierta tendencia hacia una menor cantidad de pectinas en especies domesticadas o semidomesticadas. Entre las 14 variantes, Copena V1 y Chapeada de *O. ficus-indica* y *O. megacantha*, respectivamente, presentaron la concentración menor (1.4 %) y mayor (2.9 %) de pectinas. El contenido de pectinas entre las variantes de cada especie fue significativamente homogéneo y únicamente entre las variantes de *O. streptacantha* y entre las respectivas de *O. ficus-indica* hubo diferencias significativas ($p < 0.05$).

Las pectinas, como en el caso del mucílago, han sido evaluadas en nopalitos y cladodios maduros con diversos enfoques por diferentes investigadores. En nopalitos de 13 variantes con valor comercial alto, cultivadas en condiciones de campo y cosechadas durante el periodo de lluvias, este polisacárido varió ampliamente, entre 5 y 14 %, en el tejido seco (Peña-Valdivia *et al.*, 2010); mientras que en otro grupo de cinco cultivares de *O. ficus-indica* mantenidos en condiciones de invernadero y riego, la variación fue menor (entre 3.8 y 4.5 %), pero, salvo en uno de ellos, el contenido incrementó significativamente, hasta 10 y 18 %, con la disminución de la disponibilidad de humedad por 60 días (Camacho *et al.*, 2007; García *et al.*, 2010). Goycoolea y Cárdenas (2003) también señalaron la amplitud del contenido de pectinas, entre 1 y 24 %, entre cladodios de *Opuntia* spp.

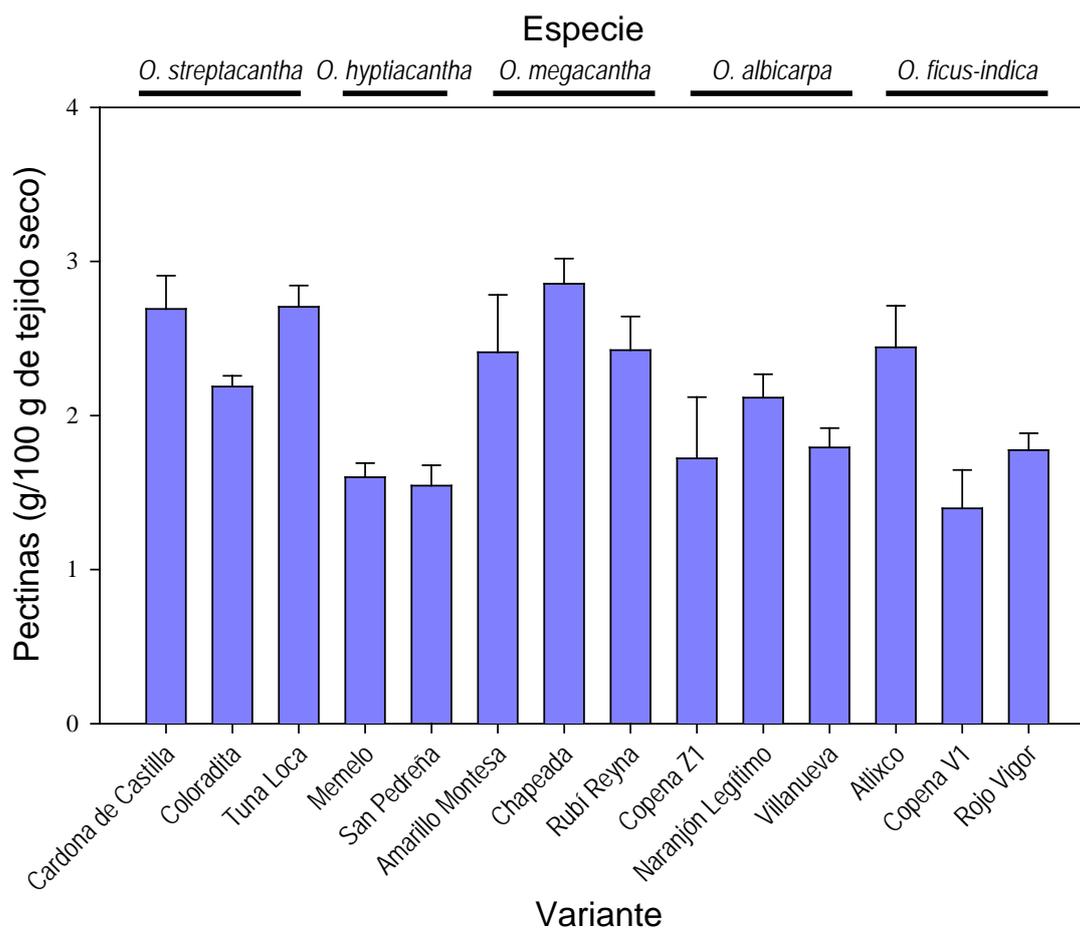


Figura 3.3 Pectina en nopalitos de 14 variantes de cinco especies de *Opuntia* representantes de un gradiente de domesticación, + el error estándar.

La relativa concentración mayor de pectinas en variantes de la especie silvestre (*O. streptacantha*) y de grado intermedio de domesticación (*O. megacantha*), con respecto a las de mayor grado de domesticación, fue similar a la observada por García *et al.* (2010) entre *O. ficus-indica* y *O. streptacantha*. Al respecto, Loveys *et al.* (2004) señalaron que la presencia de cantidades elevadas de polisacáridos extracelulares en los tejidos vegetales puede ser interpretada como una reacción al déficit de humedad que les permite absorber agua y mantener su actividad fisiológica por más tiempo. Lo anterior podría ser importante a considerar, pues la relativa mayor cantidad de polisacáridos en especies silvestres (en este caso *O. streptacantha*) muestra su adaptación a las condiciones silvestres del ambiente seco; en comparación con la especie domesticada (*O. ficus-indica*) que, adaptada a ambientes humanizados, recibe atención especial, como es agua para que sobreviva en la época seca (Colunga *et al.*, 1986).

Hemicelulosas

El contenido de hemicelulosas, tanto débilmente como fuertemente unidas a la celulosa, varió significativamente entre las 14 variantes, las variantes de cada especie y las especies (Figuras 3.4A y Cuadro 3.5). En el nivel de especies, en general si se muestran diferencias significativas de las hemicelulosas débilmente unidas en relación con el gradiente de domesticación (Cuadro 3.5). La diferencia entre las especies alcanzó 100 %, pues *O. albicarpa* y *O. ficus-indica* (las especies domesticadas), con las concentraciones menores de hemicelulosas débilmente unidas promediaron la mitad del contenido de *O. streptacantha* (la especie silvestre), la de contenido mayor (4.7 y 8.7 %, respectivamente; $p < 0.05$).

En el nivel de variantes, las diferencias, si bien mantienen la tendencia, no son tan claras. La variante Rojo Vigor de *O. ficus-indica* con 2.5 % de hemicelulosas débilmente unidas contrastó ($p < 0.05$) ampliamente con las otras variantes. La diferencia mayor la presentó con Cardona de Castilla de *O. streptacantha* que mostró cuatro veces mayor concentración (11 %) de este grupo de polisacáridos. Dentro de las especies, las diferencias entre la variante con menor y mayor contenido de este grupo de polisacáridos alcanzó entre 24 y 89 % en *O. megacantha* y *O. ficus-indica*, respectivamente.

En relación con las hemicelulosas fuertemente unidas, las especies formaron tres grupos diferentes estadísticamente ($p < 0.05$); el de la concentración menor incluyó sólo a la más silvestre del gradiente, *O. streptacantha*, el de concentración intermedia a *O. megacantha*, con nivel intermedio de domesticación en el gradiente estudiado, y el de concentración mayor de este tipo de celulosas incluyó a *O. hyptiacantha*, y dos de las más domesticadas del gradiente, *O. albicarpa* y *O. ficus-indica*, en promedio 43 % menor que *O. streptacantha* (Cuadro 3.5).

En el nivel de variantes, las hemicelulosas fuertemente unidas a la celulosa fueron menos abundantes que las débilmente unidas en todas las variantes evaluadas, en promedio menos de la mitad; además, su contenido fue poco variable entre las variantes de cada especie (Figura 3.4 A y B). Sin embargo, entre las 14 variantes si se observó un contraste amplio ($p < 0.05$) de los contenidos de este tipo de hemicelulosas. Fue el caso de Cardona de Castilla de *O. streptacantha*, que presentó el triple (4.5 %) de este grupo de polisacáridos respecto a Naranjón Legítimo y Villanueva de *O. albicarpa* (1.4 %) y Atlixco de *O. ficus-indica* con las proporciones menores del grupo completo. Respecto a la variabilidad dentro de cada especie, se observó que únicamente las variantes de *O. megacantha* presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre sí.

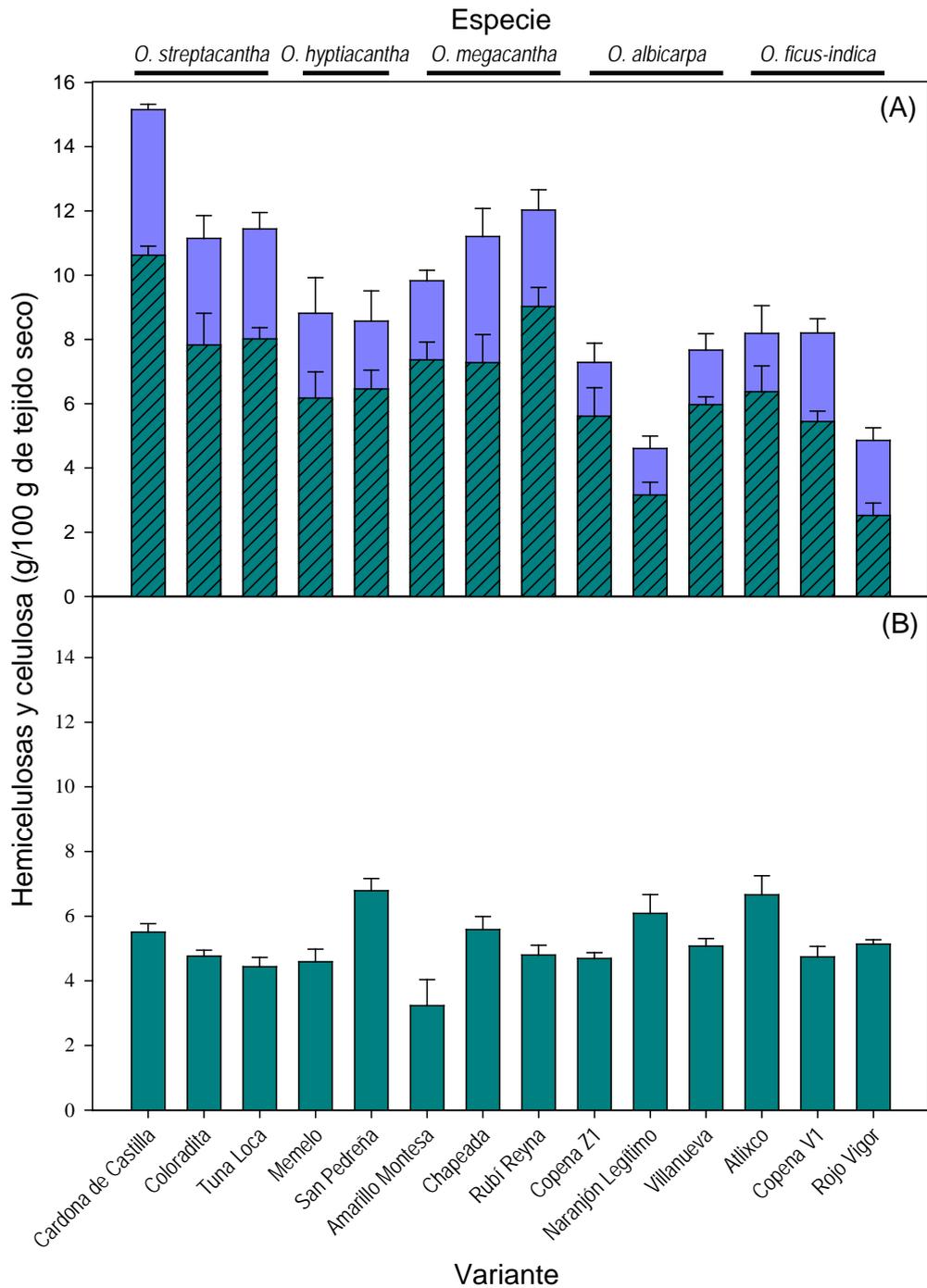


Figura 3.4 Hemicelulosas (A) débilmente (■) y fuertemente unidas a la celulosa (■) y, celulosa (B) en nopalitos de 14 variantes de cinco especies de *Opuntia* representantes de un gradiente de domesticación, + el error estándar.

La proporción de hemicelulosas en nopalitos y cladodios maduros, como el caso de los mucílago y las pectinas, se ha cuantificado en algunas variantes de nopal crecidas en ambientes variados. Es el caso de las hemicelulosas débilmente unidas de los nopalitos de 13 variantes cosechados en la época de lluvia, que varió significativamente desde 2.7 hasta 10.7

% en el tejido seco (Peña-Valdivia *et al.*, 2010); mientras que en cinco cultivares de *O. ficus-indica* y una variante silvestre de *O. streptacantha* crecidos en condiciones de invernadero y riego este grupo de polisacáridos promedió 7.5 % (García *et al.*, 2010). La disminución de la disponibilidad de humedad en el suelo propició el incremento del contenido de hemicelulosas débilmente unidas con una tendencia no lineal y en cantidades variables, hasta alcanzar entre 10 y 18 % en los nopalitos de los cinco cultivares y la recolecta silvestre de *Opuntia* (García *et al.*, 2010). Se ha sugerido que respuestas de este tipo podrían estar relacionadas con la reacción de las plantas a la condición de restricción de humedad y el incremento del contenido de hemicelulosas débilmente unidas tendrían una función protectora de los tejidos durante la deshidratación (Reid, 1985); lo que concuerda con lo señalado para los mucílagos y otros polisacáridos extracelulares (Golstein y Nobel, 1991; Loveys *et al.*, 2004; Nobel *et al.*, 1992). De ser así, puede especularse que las variantes y las especies con mayor contenido de estos polisacáridos reaccionarían mejor ante condiciones extremas de disponibilidad de humedad limitada, como es común en los ambientes naturales de *Opuntia*.

Respecto al grupo de hemicelulosas fuertemente unidas, entre las 14 variantes del presente estudio hubo un grupo de cuatro (Copena Z1, Naranjón Legítimo, Villanueva y Atlixco), pertenecientes a dos de las especies con el nivel superior del gradiente de domesticación (*O. albicarpa* y *O. ficus-indica*), con el contenido menor ($p < 0.05$) que promedió 1.5 %. En contraste, la variante silvestre Cardona de Castilla de *O. streptacantha* tuvo el contenido tres veces mayor (4.7 %) (Figura 3.4A). Entre las variantes de cada especie hubo pocas diferencias, el único contraste ($p < 0.05$) que se observó fue entre las de *O. streptacantha*; no obstante, esta especie, representante del estado silvestre de *Opuntia*, exhibió el contenido medio significativamente mayor de hemicelulosas fuertemente unidas de las cinco especies (Cuadro 3.5).

Celulosas

El contenido de celulosa fue similar ($p > 0.05$) entre las cinco especies (Cuadro 3.5). Este resultado indica que, independientemente de las diferencias entre las variantes de cada especie, que se describen más adelante, de los polisacáridos estructurales evaluados en los nopalitos, la celulosa es el único atributo claramente independiente de los cambios debidos a la domesticación. Sin embargo, el contenido de celulosa varió significativamente entre las 14 variantes, desde 3.2 hasta 6.8 % en Amarillo Montesa de *O. megacantha* y San Pedreña de *O. hyptiacantha*, respectivamente. El contenido de celulosa también varió ($p < 0.05$) entre las variantes y cultivares dentro de cada especie, con excepción de *O. albicarpa*. Las diferencias

dentro de las especies representaron entre 19 % en *O. streptacantha* y 42 % en *O. megacantha* (Figura 3.4B).

El contenido medio de celulosa de los nopalitos del presente estudio (5.1 %) fue similar a los valores obtenidos en nopalitos de 12 variantes con importancia comercial, cosechados en la época de lluvia (entre 5.0 y 15.0 %) (Peña-Valdivia *et al.*, 2010) o cultivados en invernadero con riego frecuente (García *et al.*, 2010). Además, los cultivares Atlixco y Copena V1 presentaron concentraciones similares a los obtenidos por García *et al.* (2010) y Peña-Valdivia *et al.* (2010). En contraste con la persistencia ya señalada del contenido de celulosa, se observó su incremento significativo, entre dos o tres veces, tanto en cultivares de *O. ficus-indica*, como en una variante silvestre de *O. streptacantha* con la disminución de humedad disponible en el suelo durante 60 días.

Aunque la lignina no es polisacárido, si es un componente común presente en la fibra de los alimentos. En este estudio se consideró conveniente confirmar su ausencia en los nopalitos, pues Peña-Valdivia *et al.* (2010) habían señalado que esa macromolécula fenólica estuvo ausente en las 13 variantes que ellos evaluaron. En efecto, en el presente se confirmó la ausencia de lignina en los nopalitos de las cinco especies estudiadas.

Fibra alimentaria

Con la finalidad de abundar en las diferencias o semejanzas de la composición entre las especies fue calculado el contenido de fibra alimentaria soluble, insoluble y total a partir de la proporción de polisacáridos estructurales, de acuerdo con lo señalado por Álvarez y Peña-Valdivia (2009). Se observaron diferencias ($p < 0.05$) en el contenido de los tres tipos de fibra entre las 14 variantes. Entre todas las variantes, destacaron Naranjón Legítimo de *O. albicarpa* y Amarillo Montesa de *O. megacantha* por su menor proporción de fibra soluble e insoluble, respectivamente, y Tuna Loca y Cardona de Castilla, ambas de *O. streptacantha*, por su mayor contenido de ambos tipos de fibra. Como resultado de lo anterior, la variante Tuna Loca presentó la mayor proporción de fibra total de todas las variantes ($p < 0.05$) y duplicó el contenido de la variante Naranjón Legítimo, con el menor contenido (Cuadro 3.6).

Cuadro 3. 6 Contenido de fibra alimentaria en nopalitos de 14 variantes de *Opuntia* spp.

Variante	Fibra alimentaria (g/100 g de tejido seco)		
	Soluble	Insoluble	Total
Cardona de Castilla	17.10 a-c†	10.12 a	27.16 a-c
Coloradita	14.86 b-d	8.20 a-c	22.18 a-d
Tuna Loca	22.35 a	7.86 a-c	30.48 a
Memelo	17.90 a-c	7.43 a-c	25.33 a-c
San Pedreña	13.43 cd	8.71 a-c	21.54 b-d
Amarillo Montesa	17.44 a-c	4.59 d	22.65 a-d
Chavena	19.00 a-c	9.33 ab	26.44 a-c
Rubí Reyna	17.00 a-c	7.80 a-c	24.70 a-d
Copena Z1	14.20 b-d	6.37 cd	20.57 cd
Naranjón Legítimo	8.91 d	7.53 a-c	16.73 d
Villanueva	17.01 a-c	6.63 a-d	22.81 a-d
Atlixco	21.19 ab	8.47 a-c	29.43 ab
Copena V1	18.11 a-c	6.62 b-d	24.73 a-d
Rojo Vigor	13.38 cd	7.47 a-c	20.86 cd
Significancia	0.0001	0.0001	0.0001
EE [§]	1.99	1.37	2.03
CV [¶]	0.24	0.24	0.17

[§] EE= error estándar; [¶] CV= coeficiente de variación; † Columna con la misma letra indica similitud estadística (Tukey, p<0.05).

Al agrupar las variantes por especie, las diferencias en el contenido de cada uno de los tipos de fibra alimentaria se hicieron menos evidentes; por lo que, el contenido de fibra soluble e insoluble resultó significativamente igual entre las cinco especies (Figura 3.5). Sin embargo, es posible indicar que se observó un efecto inverso de la domesticación sobre el contenido de fibra total entre las especies de *Opuntia*. Esto es, *O. streptacantha*, la especie representante de las silvestres o con menor nivel de domesticación, presentó la mayor cantidad ($p < 0.05$) de fibra alimentaria total (30 % de su biomasa seca) respecto a las otras cuatro especies (Reyes-Agüero *et al.*, 2005a), *O. albicarpa* mostró el contenido menor de fibra total (21 % de su biomasa seca). La mayor proporción de fibra total en los nopalitos de *O. streptacantha* respecto a los de *O. ficus-indica* fue documentada previamente por García *et al.* (2010). Los resultados anteriores son evidencia de que esta especie, y quizá algunas otras, han disminuido (25 %) su contenido de fibra (o fibras) total en los nopalitos durante el proceso de domesticación, y que cambios equivalentes han sido distintos entre especies, probablemente en dependencia del objetivo de la selección durante el proceso; es decir, selección de variantes productoras de tuna, de nopalito, de ambas estructuras simultáneamente, de cladodios para forraje u otra. El contenido bajo de fibra en *O. albicarpa* coincide con los caracteres identificados por Colunga *et al.* (1986) como criterios de

selección de variantes para la producción de nopalito, entre los que destacaron el mucílago (o baba) escaso y tejido vascular poco fibroso.

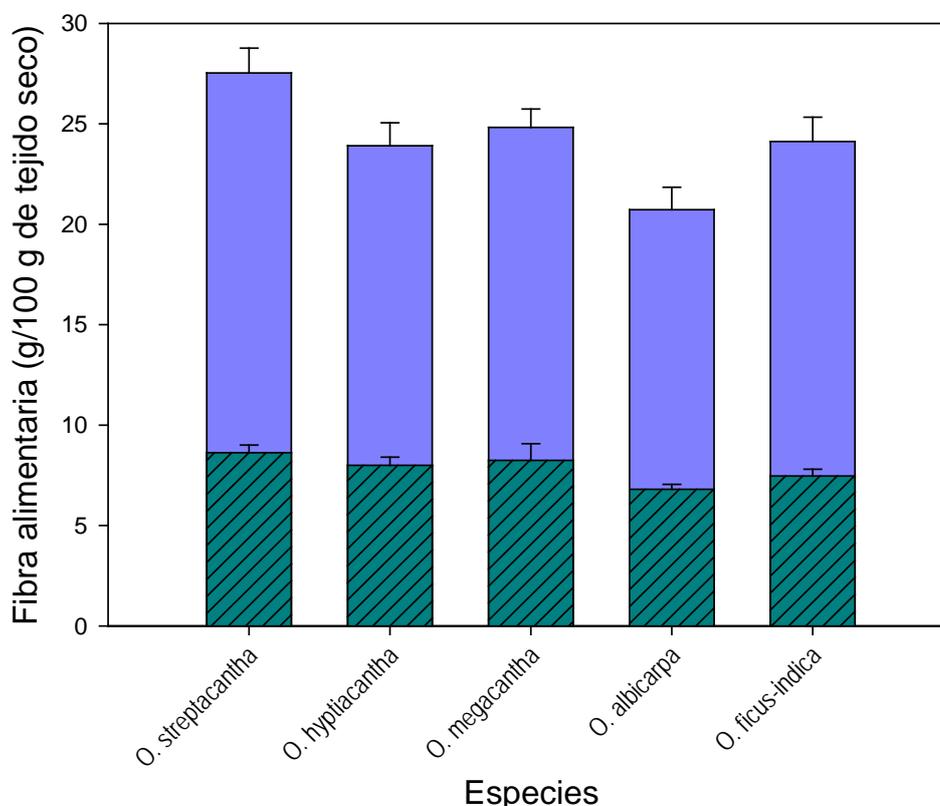


Figura 3.5 Efecto de la especie en el contenido de fibra alimentaria soluble (■) e insoluble (■) en nopalitos de cinco especies de *Opuntia* representantes de un gradiente de domesticación, + error estándar.

Es común reconocer como fibras alimentarias al conjunto de polisacáridos vegetales y la lignina (macromolécula formada por derivados fenólicos, no carbohidrato), que son resistentes a la hidrólisis por las enzimas digestivas de los humanos; la lignina puede ser un componente abundante de la fibra alimentaria insoluble y total (Escudero y González, 2006; García y Peña, 1995). Sin embargo, Peña-Valdivia *et al.* (2010) señalaron que los nopalitos de 13 variantes de *Opuntia* spp. carecieron de lignina y en el presente estudio se comprobó la ausencia de ese compuesto en todas las especies estudiadas. Independientemente de la función de los polisacáridos estructurales en las plantas, se ha señalado que como integrantes de la fibra alimentaria o dietética promueven diversos efectos fisiológicos benéficos, como prevenir la constipación, atenuar los niveles de colesterol y glucosa en sangre, proveer energía para el mantenimiento de la flora intestinal, disminuir los riesgos de cáncer de colon y problemas cardiovasculares, entre otros; por lo que, los efectos fisiológicos o biológicos de

la fibra alimentaria y por tanto su aplicación preventiva o terapéutica son los que tienen mayor importancia en humanos (Álvarez y Peña-Valdivia, 2009; Castañeda-Andrade *et al.*, 1997; Dikeman y Fahey, 2006; García y Peña, 1995; Rose *et al.*, 2007).

Análisis multivariable de componentes principales

Con la finalidad de reconocer si las especies de *Opuntia* estudiadas se ordenan como entidades biológicas individuales por sus nopalitos y cual o cuales de los polisacáridos estructurales, de las fibras alimentarias o atributos morfológicos define dicha ordenación, se realizaron los análisis multivariados de componentes principales.

El análisis que incluyó los parámetros de composición de los nopalitos y fibra soluble mostró que los CP 1, 2 y 3 acumularon 65.78, 26.29 y 4.29 % de la variación total (Cuadro 3.7). El CP1 estuvo definido principalmente por el mucílago y la fibra alimentaria soluble, el CP2 por el mucílago, las hemicelulosas débilmente unidas y la fibra alimentaria soluble y el CP3 por el mucílago, las hemicelulosas débilmente unidas y la fibra alimentaria soluble e insoluble. La representación gráfica (Figura 3.6) mostró que las especies pueden ser caracterizadas por su diversidad y contenido menor de polisacáridos estructurales de los nopalitos, ya que *O. streptacantha*, con el menor nivel de domesticación en el grupo estudiado, se diferenció por su contenido menor de mucílago y mayor de hemicelulosas débilmente unidas respecto a las otras especies. En contraste, *O. ficus-indica* se localizó en el lado positivo del eje definido por el mucílago, es decir, se diferencia por un mayor contenido de estos polisacáridos.

Cuadro 3.7 Valores propios y varianza acumulada de los CP1, CP2 y CP3 de la composición de polisacáridos estructurales y fibra alimentaria de 14 variantes de nopalito (*Opuntia* spp.).

	CP1	CP2	CP3
Mucílagos	0.527578	-0.736838	0.416852
Pectinas	0.017968	0.047682	0.048244
Hemicelulosas			
Débilmente unidas	0.094854	0.444053	0.579795
Fuertemente unidas	0.049081	0.150588	0.181169
Celulosa	-0.045252	0.001969	-0.037617
Fibra alimentaria			
Soluble	0.840890	0.393028	-0.359585
Insoluble	0.028088	0.283657	0.569391
Varianza acumulada	0.4751	0.7792	0.8848

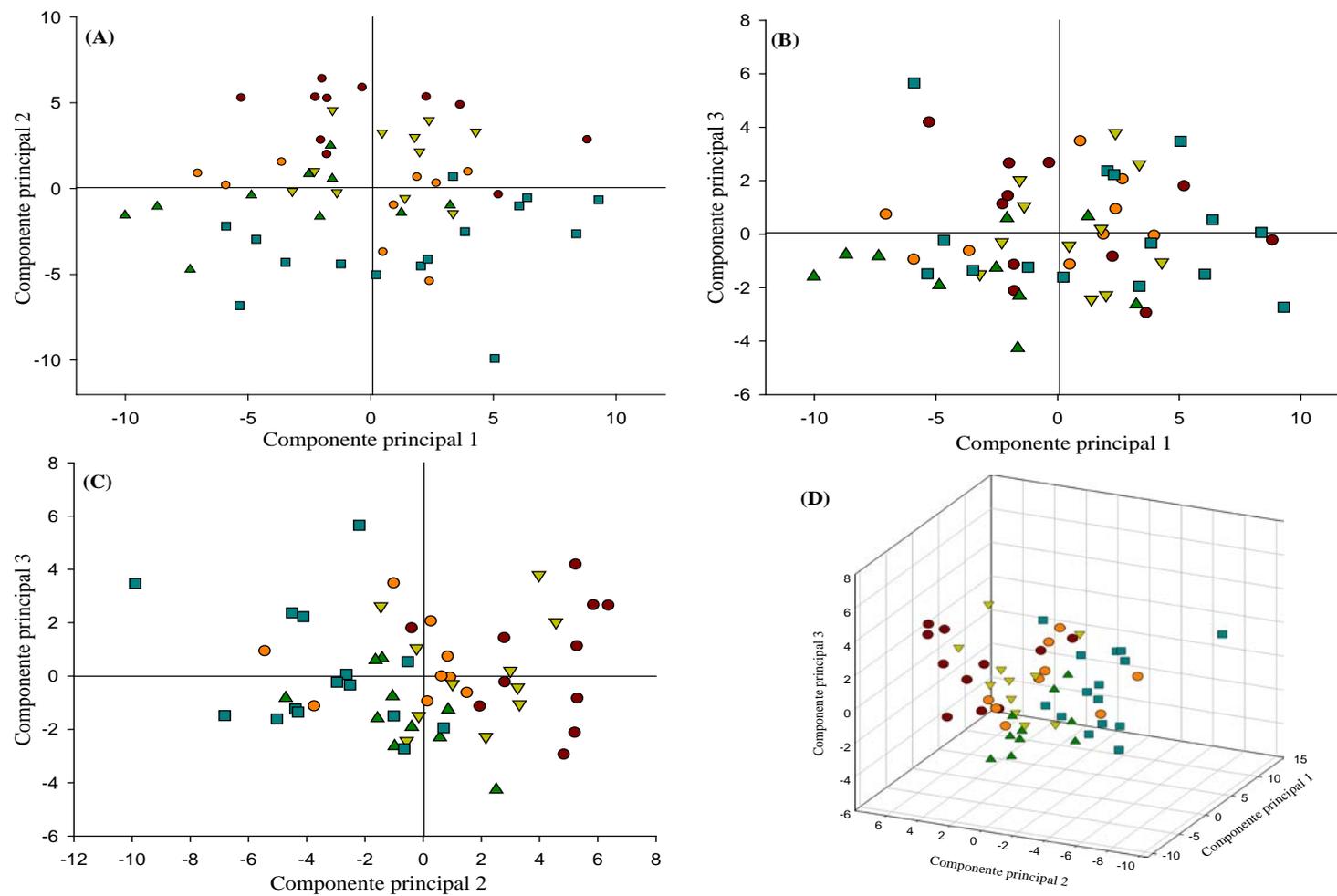


Figura 3.6 Representación gráfica de los tres primeros componentes principales de composición de polisacáridos estructurales y fibra alimentaria en nopalitos de cinco especies de *Opuntia* (● *Opuntia streptacantha*, ○ *O. hytiacantha*, ▼ *O. megacantha*, ▲ *O. albicarpa*, ■ *O. ficus-indica*) representantes de un gradiente de domesticación.

Entre estas dos especies localizadas en los extremos del gradiente de domesticación de *Opuntia*, se ubicaron *O. megacantha* y *O. albicarpa* separadas entre sí por su mayor y menor proporción de hemicelulosas débilmente unidas, respectivamente (Figura 3.6A), y separadas de *O. streptacantha* y *O. ficus-indica* por su contenido intermedio de mucílago (Figura 3.6B). Esta organización y ubicación de las variantes muestran el gradiente de domesticación basado en la proporción y diversidad de polisacáridos estructurales de los nopalitos pues las variantes menos humanizadas o más silvestres y con cierto grado de domesticación rodean a las variantes de *O. megacantha* y *O. albicarpa* con niveles intermedios de domesticación de acuerdo con Reyes-Agüero *et al.* (2005a).

Para saber si la combinación de caracteres morfológicos y de composición de polisacáridos estructurales fortalecían los resultados de los análisis multivariantes independientes (Figuras 3.1 y 3.6) se realizó un análisis del conjunto de ambos grupos de caracteres (Figura 3.8). Los primeros tres CP explicaron 80.15, 9.17 y 9.61 % de la variación total. El CP1 estuvo definido por el peso del nopalito, mientras que en el CP2 los factores determinantes fueron el número de aréolas por cara y el número de aréolas en el margen, los mismos atributos se definieron en el CP3 junto con el mucílago (Cuadro 3.8). Sin embargo, la representación gráfica (Figura 3.8) mostró que las unidades de las cinco especies y la separación de las especies se entremezclaron en los planos generados por los tres CP y contrastaron con los obtenidos en los parámetros morfológicos y los polisacáridos estructurales separados (Figuras 3.1 y 3.6). Este resultado muestra que los cambios de las características físicas, al menos los parámetros morfométricos evaluados, y de composición química, específicamente la proporción de los polisacáridos estructurales, de los nopalitos debidos a la domesticación han sucedido en sentidos diferentes. Sin embargo, tanto la morfología como la composición de las paredes celulares, y por lo tanto de los polisacáridos estructurales, cambia con el crecimiento y edad de los órganos (Álvarez y Peña-Valdivia, 2009; Ramírez-Tobías *et al.*, 2007), y el análisis conjunto de los dos tipos de características de cladodio maduros podría ser diferente al de los nopalitos.

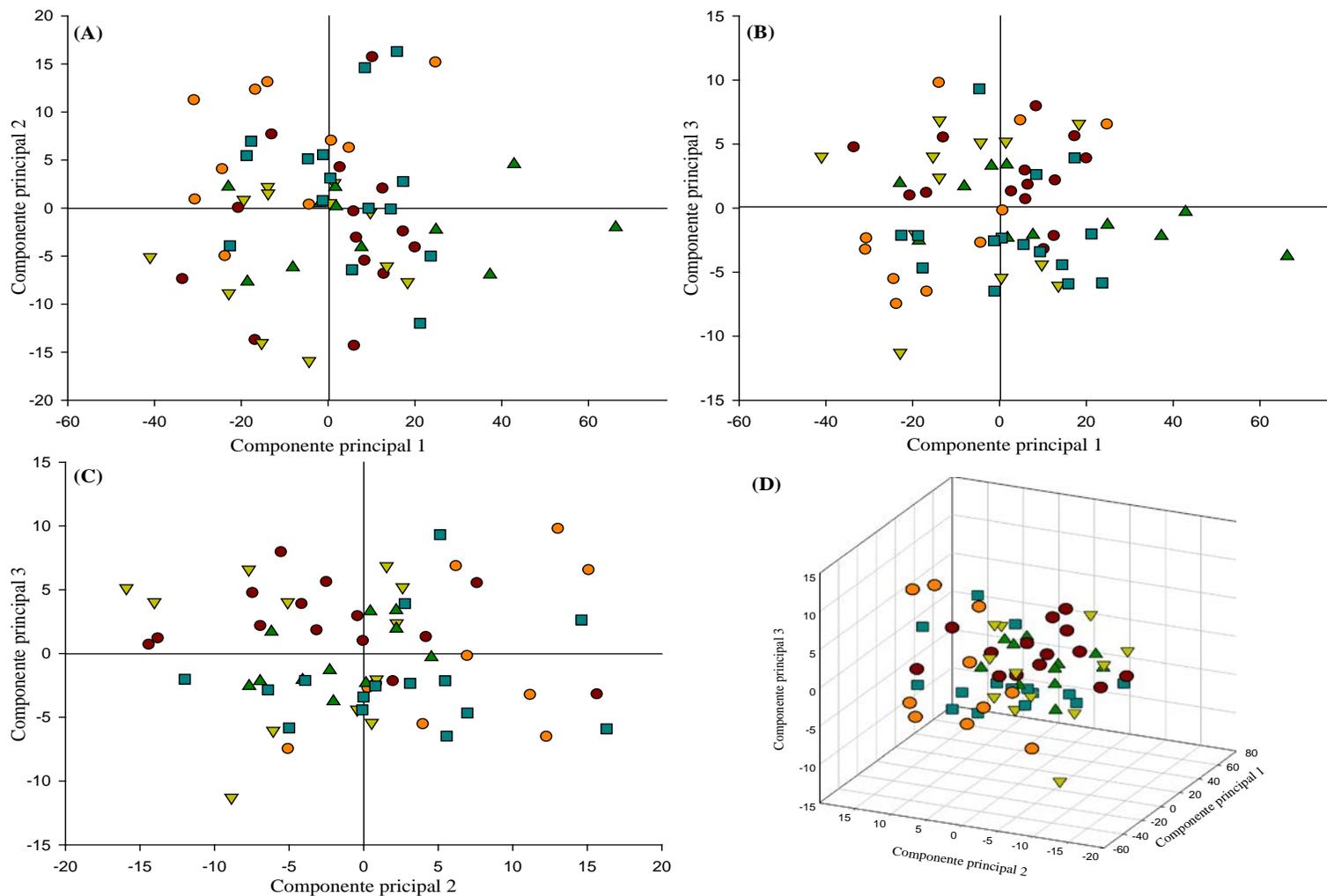


Figura 3.7 Representación gráfica de los tres primeros componentes principales de once características morfológicas y de composición de polisacáridos estructurales de cinco especies de *Opuntia* (● *Opuntia streptacantha*, ○ *O. hyptiacantha*, ▼ *O. megacantha*, ▲ *O. albicarpa*, ■ *O. ficus-indica*) representantes de un gradientes de domesticación.

Cuadro 3.8 Valores propios y varianza acumulada de los CP1, CP2 y CP3 de las características morfológicas y de la composición de polisacáridos estructurales de 14 variantes de nopalito (*Opuntia* spp.).

	CP1	CP2	CP3
Peso	0.998516	-0.033534	-0.025689
Anchura	0.023415	0.035959	0.038988
Grosor del podario	0.005183	-0.004001	0.006851
Grosor del ápice	-0.000715	-0.000469	-0.002217
Grosor en el centro	0.001349	-0.002121	0.003875
Aréolas por cara	0.031948	0.326835	0.933859
Aréolas en el margen	0.023107	0.937270	-0.314111
Mucílago	-0.020399	0.051494	-0.154594
Pectina	-0.003283	-0.010941	0.021095
Hemicelulosa débilmente unida	-0.019001	-0.093238	0.051459
Celulosa	-0.006736	0.028289	-0.001786
Varianza acumulada	0.8015	0.9170	0.9612

Entre los polisacáridos de la fibra soluble, además del mucílago, otros componentes podrían tener efecto en la selección como parte de la domesticación, es el caso del grupo de hemicelulosas débilmente unidas (Figura 3.6). Así, se demostró que la especie con nivel superior de domesticación, *O. ficus-indica*, además de su contenido mayor de mucílago, también presentó menor contenido de hemicelulosas débilmente unidas. Al contrario, una de las especies silvestres, *O. hyptiacantha*, mostró los contenidos mayores de pectina y hemicelulosas débilmente y fuertemente unidas.

La presencia de compuestos químicos, incluyendo los polisacáridos estructurales, puede tener relación con el genotipo y la persistencia de mecanismos de protección contra condiciones propias de los ambientes silvestres. Mondolot *et al.* (2008) observaron que las hojas de mandioca silvestre (*Manihot* spp.) tienen contenido mayor de taninos y carbono, pero menor de nitrógeno respecto a las domesticadas, y señalan que los cambios en las especies domesticadas se deben al ambiente humanizado, ya que el cultivo se realiza en suelos ricos en nutrientes y con protección de depredadores; la reducción de la relación carbono/nitrógeno se relacionó con la menor protección física y la disminución de algunos compuestos carbonados, específicamente los de la pared celular. Esto puede ayudar a explicar las diferencias en los contenidos de los polisacáridos extracelulares de algunas de las variantes y especies incluidas en el presente estudio (Figuras 3.6 y 3.7).

Los cambios de ciertas sustancias se pueden relacionar con el interés del recolector de que el cultivo pierda sustancias y/o mecanismos de protección contra depredadores o factores

ambientales, y aumentar la calidad nutrimental (Mondolot *et al.*, 2008; Smartt, 1988), esto último también pudo haber sido un factor durante la selección de las especies de *Opuntia*. Al respecto, Harlan (1992) menciona la predilección de algunas tribus australianas y africanas por unas pocas especies, abundantes en el área, las cuales satisfacen las necesidades nutrimentales de la población en cuestión. El mismo autor reconoció la mayor calidad nutricional de trigos silvestres comparados con los modernos. Este podría ser el caso de las especies de *Opuntia*. Los resultados del presente trabajo también muestran cierta relación entre *O. streptacantha* y *O. megacantha* en los polisacáridos estructurales (Cuadro 3.4) y la cercanía de ambas especies en los análisis de componentes principales (Figuras 3.6 y 3.7); lo que concuerda con lo señalado por otros autores respecto a que *O. ficus-indica* proviene de *O. megacantha* y *O. streptacantha* (Bravo, 1978; Colunga *et al.*, 1986). Cabe mencionar que ambas especies mostraron la mayor presencia de polisacáridos estructurales (fibra alimentaria) (Cuadro 3.4, Figura 3.5) y sus variantes estuvieron relacionadas (Figura 3.6).

Conclusiones

Las especies de *Opuntia*, que han sido organizadas en un gradiente de domesticación con base en las características morfométricas de sus plantas, nopales y frutos, también pueden ser caracterizadas por su diversidad y contenido de polisacáridos estructurales de los nopalitos. Los grupos de polisacáridos que muestran cambios durante el proceso de domesticación son los incluidos en la fibra soluble, es decir, mucílago(s), pectinas y hemicelulosas débilmente unidas; además, de las hemicelulosas fuertemente unidas, que son parte de la fibra insoluble. En contraste, la celulosa se muestra como un componente extracelular notablemente estable, sin respuesta a las presiones de selección. Los cambios de las características morfológicas y de composición química, específicamente de los polisacáridos estructurales, debidos a la domesticación, han sucedido en sentidos diferentes en los nopalitos.

Literatura citada

- Álvarez A., R.; Peña-Valdivia, C.B. 2009. Structural polysaccharides in xoconostle (*Opuntia matudae*) fruits with different ripening stages. Journal of the Association Professional of Cactus Development. 11: 26-44.
- Baker, H.G. 1971. Human influences of plant evolution. BioScience 21: 108.
- Bravo H., H. 1978. Las cactáceas de México. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 365 p.

- Camacho C., O.; Peña-Valdivia, C.B.; Sánchez-Urdaneta, A. 2007. El potencial de agua del suelo en el crecimiento y contenido de polisacáridos estructurales de nopalito (*Opuntia* spp.). *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)*. 24: 254-259.
- Cárdenas, A.; Goycoolea, F.M...; Rianuado, M. 2008. On the gelling behavior of 'nopal' (*Opuntia ficus-indica*) low methoxyl pectin. *Carbohydrate Polymers*. 73: 212-222.
- Casas, A.; Caballero, J.; Mapes, C.; Zárate, S. 1996. Manejo de la vegetación, domesticación de plantas y origen de la agricultura en Mesoamérica. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 61: 31-47.
- Casas, A.; Caballero, J.; Valiente B., A.; Soriano, A.; Dávila, P. 1999. Morphological variation and the process of domestication os *Stenocereus stellatus* (Cactaceae) in Central Mexico. *American Journal of Botany*. 86: 522-533.
- Castañeda-Andrade, I.; Gonzalez-Sánchez, J.; Frati-Munari, A.C. 1997. Hypoglycemic effect of an *Opuntia streptacantha* Lemaire dialysate. *Journal of the Professional Cactus Development*. 2: 73-75
- Colunga G-M., P.; Hernández X., E.; Castillo M., A. 1986. Variación morfológica, manejo agrícola tradicional y grado de domesticación de *Opuntia* spp. en el Bajío guanajuatense. *Agrociencia*. 65: 7-49.
- Cook, M.G.; Evans, L.T. 1983. Some physiological aspects of the domestication and improvement of rice (*Oriza* spp.). *Field Crops Research*. 6: 219-238.
- Dikeman, Ch.L.; Fahey, G.C. 2006. Viscosity as related to dietary fiber: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 46: 649-663.
- Englyst, K.N.; Englyst, H.N. 2005. Carbohydrate bioavailability. *British Journal of Nutrition*. 94: 1-11.
- Escudero A., E.; González S., P. 2006. La fibra dietética. *Nutrición Hospitalaria*. 21: 61-72.
- Figueroa H., F. 1984. Estudio de las nopaleras cultivadas y silvestres sujetas a recolección para el mercado en el Altiplano Potosino-Zacatecano. Tesis profesional. Escuela de Agronomía. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P. México. 171 p.
- Flores V., C.A.; Aguirre R., J.R. 1979. El nopal como forraje. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, estado de México. México. 80 p.
- Gallegos-Vázquez, C.; Valdez-Cepeda, R.D.; Barrón-Macías, M.; Barrientos-Priego, A.F.; Andrés-Agustín, J.; Nieto-Ángel, R. 2006. Caracterización morfológica de 40 cultivares de nopal de uso como hortaliza del banco de germoplasma del CRUCEN-UACH. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*. 12: 41-49.

- García, E. 2004. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. 5th edition. Instituto de Geografía-UNAM. México, D.F. 90 p.
- García R., M.T.; Peña-Valdivia, C.B.; Trejo-López, C. 2010. The effects of soil water potential and cultivar on structural polysaccharides of “nopalitos” (*Opuntia* spp.). En proceso de publicación.
- García H., E.; Peña V., C. 1995. La pared celular. Componente funcional de las células vegetales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Estado de México. México. 96p.
- Goldstein, G.; Nobel, P.S. 1991. Changes in osmotic pressure and mucilage during low-temperature acclimation of *Opuntia ficus-indica*. *Plant Physiology*. 97: 954-961
- Goldstein, G.; Nobel, P.S. 1994. Water relations and low-temperature acclimation for cactus species varying in freezing tolerance. *Plant Physiology*. 104: 675-681.
- Gooycolea, F.M.; Cárdenas, A. 2003. Pectins from *Opuntia* spp.: A short review. *Journal of the Professional Association of Cactus Development*. 5: 17-29.
- Griffith, M.P. 2004. The origins of an important cactus crop, *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae): new molecular evidence. *American Journal of Botany*. 91: 1915-1921.
- Harlan, J. R. 1992. *Crops and Man*. 2nd ed. American Society of Agronomy and Crop Science Society of America. Madison, USA. 284 p.
- Huerta G., A.; Montes de la R., M.I. 2003. Contenido de mucílago de 10 variantes de nopalito (*Opuntia* spp.) y su efecto en las propiedades físicas y texturales. Tesis de Licenciatura. Departamento de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Autónoma Chapingo. México. 82 p.
- López-Palacios, C.; Reyes-Agüero, J.A.; Ramírez-Tobías, H.M.; Juárez-Flores, B.I.; Aguirre-Rivera, J.R.; Yañez-Espinosa, L.; Ruíz-Cabrera, M.A. 2010. Evaluation of attributes associated with the quality of nopalito (*Opuntia* spp. and *Nopalea* sp.). *Italian Journal of Food Science*. 22: 423-431.
- Loveys, B. R.; Stoll, M; Davies, W. J. 2004. Physiological approaches to enhance water use efficiency in agriculture: exploiting plant signaling in novel irrigation practice. *In: Water use efficiency in plant biology* (ed. Mark A. Bacon). Blackwell Publishing Ltd., London, UK. Pp. 113-141.
- Malanine, M.E.; Dufresne, A.; Dupeyre, D.; Marhouz, M.; Vuong, R.; Vignon, M.R. 2003. Structure and morphology of cladodes and spines of *Opuntia ficus-indica*. Cellulose extraction and characterization. *Carbohydrate Polymers*. 51: 77-83.

- Martín del Campo, R. 1957. Las Cactáceas entre los Mexica. *Cactáceas y Suculentas Mexicanas* 2: 27-38.
- Mondolot, L.; Marlas, A.; Barbeau, D.; Gargadennet, A.; Pujol, B.; McKey, D. 2008. Domestication and defense: foliar tannins and C/N ratios in cassava and a close wild relative. *Acta Oecologica*. 34: 147-154.
- Nobel, P.S.; Cavelier, J.; Andrade, J.L. 1992. Mucilage in cacti: its apoplastic capacitance, associated solutes, and influence on tissue water relations. *Journal of Experimental Botany*. 43: 641-648.
- Peña-Valdivia, C.B.; Sánchez-Urdaneta, A. 2004. Polisacáridos de nopalito y tuna (*Opuntia* spp.) En: Flores, V. C. (Ed.). Memoria del X Congreso Nacional y VII Internacional, sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal y del Fifth International Congress on Cactus Pear and Cochineal. Universidad Autónoma Chapingo, Food and Agriculture Organization e International Society for Horticultural Science. Chapingo, México. Edición en CD.
- Peña-Valdivia, C.B.; Sánchez-Urdaneta, B.A. 2006. Nopalito and cactus pear (*Opuntia* spp.) polysaccharides: mucilage and pectin. *Acta Horticulturae*. 728: 241-248.
- Peña-Valdivia, C.B.; Sánchez-Urdaneta, B.A.; Trejo-López, C.; Arroyo-Peña, V.B. 2010. Structural polysaccharides and dietary fiber assortment in nopalito and cactus fruit (*Opuntia* spp.). En proceso de publicación.
- Perales R., H.R.; Aguirre R., J.R. 2008. Biodiversidad humanizada. En: Capital natural de México. Vol. 1: Conocimiento actual de la biodiversidad. Conabio, México. Pp. 565-603.
- Pinos-Rodríguez, J.M.; Duque-Briones, R.; Reyes-Agüero, J.A.; Aguirre-Rivera, J.R.; García-López, J.C.; González-Muños, S. 2006. Effect of species and age on nutrient content and *in vitro* digestibility of *Opuntia* spp. *Journal of Applied animal research*. 30: 13-17.
- Ramírez-Tobías, H.M.; Reyes-Agüero, J.A.; Pinos-Rodríguez, J.M.; Aguirre-Rivera, J.R. 2007. Efecto de la especie y madurez sobre el contenido de nutrientes de cladodios de nopal. *Agrociencia*. 41: 619-626.
- Razo M., Y.; Sánchez H., M. 2002. Acidez de 10 variantes de nopalito (*Opuntia* spp.) y su efecto en las propiedades químicas y sensoriales. Tesis de Licenciatura. Departamento de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Autónoma Chapingo. México. 104 p.
- Reid G., J.S. 1985. Cell wall storage carbohydrates in seeds biochemistry of seed gums and hemicelluloses. *Advances in Botanical Research*. 2: 125-155.

- Reyes A., J.A. 2005. Variación morfológica de *Opuntia* (Cactaceae) y su relación con la domesticación en la Altiplanicie Meridional de México. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 175p.
- Reyes-Agüero, J.A.; Aguirre-Rivera, J.A.; Flores-Flores, J.A. 2005a. Variación morfológica de *Opuntia* (Cactaceae) en relación con su domesticación en la Altiplanicie Meridional de México. *Interciencia*. 30: 476-484.
- Reyes-Agüero, J.A.; Aguirre R., J.R.; Hernández, H. 2005b. Systematic notes and detailed description of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae). *Agrociencia*. 39: 395-408.
- Rose, D.J.; DeMeo, M.T.; Keshavarzian, A.; Hamaker, B.R. 2007. Influence of dietary fiber on inflammatory bowel disease and colon cancer: importance of fermentation pattern. *Nutrition Reviews*. 65: 51-62.
- SAS, 1999-2000. SAS user's guide: Statistics. Versión 6. SAS Institute Inc. Cary, NC. EU. 1290 p.
- Sepúlveda, E.; Sáenz, C.; Aliaga, E.; Aceituno, C. 2007. Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *Journal of Arid Environments*. 68: 534-545.
- Sodi P., E. 1967. Las Cactáceas en las épocas pre-Colombina y Virreynal, y en el siglo XIX. *Cactáceas y Suculentas Mexicanas* 1: 3-12.
- Smartt, J. 1988. Morphological, physiological, and biochemical changes in *Phaseolus* beans under domestication. En: Gepts, P. (Ed.). *Genetic resources of Phaseolus beans. Their maintenance, domestication, evolution, and utilization*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Holland. Pp. 143-161.
- Villarreal, F.; Rojas, P.; Arellano, V.; Moreno, J. 1963. Estudio químico sobre seis especies de nopales (*Opuntia* spp.). *Ciencia Mexicana*. 22: 59-65.

Capítulo IV. Caracterización reológica de polisacáridos estructurales de nopalitos (*Opuntia* spp.) en un gradiente de domesticación

Resumen

La domesticación como proceso evolutivo altera características genéticas y morfológicas de plantas silvestres, que se relacionan con la composición química de sus tejidos. Los polisacáridos más abundantes de los nopalitos son del tipo estructural y su proporción en los nopalitos ha cambiado con ese proceso. El objetivo de este estudio fue la caracterización reológica de mucílagos, pectinas, hemicelulosas y celulosa de nopalitos (*Opuntia* spp.) en un gradiente de domesticación. La hipótesis fue que los parámetros reológicos, como índice de flujo y coeficiente de consistencia, muestran alteraciones relacionadas con el gradiente de domesticación. Se evaluaron nopalitos de las variantes Coloradita, Amarillo Montesa y Atlixco de *O. streptacantha*, *O. megacantha* y *O. ficus-indica*, respectivamente. El estudio se desarrolló con un diseño experimental completamente al azar y arreglo factorial 5x3. Los polisacáridos fueron extraídos en secuencia con agua, oxalato de amonio e hidróxido de potasio, y celulosa como residuo, precipitados con etanol, purificados por lavado acuoso y diálisis contra agua y cuantificados gravimétricamente después de ser liofilizados. Las características reológicas de los polisacáridos fueron evaluadas en soluciones o dispersiones al 0.5 % (p/v) de cada uno de ellos a 25°C con una geometría de cilindros concéntricos de doble pared. Las curvas de flujo se ajustaron, mediante regresión, al modelo Ostwald-De Waele o Ley de la Potencia y se obtuvieron los parámetros de índice de flujo (adimensional) y coeficiente de consistencia ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$). Se realizó la comparación múltiple de medias de los datos por Tukey ($p < 0.05$), posterior al análisis de varianza. Los mucílagos, pectinas y celulosas mostraron un comportamiento reofluidificante o pseudoplástico mientras que las hemicelulosas tendieron a un fluido newtoniano. *Opuntia megacantha* tuvo el índice de flujo mayor en los mucílagos (0.6158) y el menor en las pectinas (0.53) y *O. ficus-indica* el menor en las hemicelulosas fuertemente unidas (0.8168). Las hemicelulosas débilmente unidas y la celulosa tuvieron coeficientes de consistencia significativamente iguales entre las especies, 0.9368 y 0.1924, respectivamente. El coeficiente de consistencia de los mucílagos y las hemicelulosas débilmente unidas de *O. ficus-indica* fueron los mayores ($0.1770 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.53}$ y $0.0094 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.82}$, respectivamente) y el de la celulosa de *O. streptacantha* fue mayor ($0.0851 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.17}$) que el de *O. ficus-indica* ($0.0234 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.41}$); los coeficientes de las pectinas y las hemicelulosas fuertemente unidas fueron semejantes entre las especies. El proceso de domesticación modificó el índice de flujo de los mucílagos, pectinas y hemicelulosas

débilmente unidas, y la consistencia de los mucílagos, hemicelulosas débilmente unidas y celulosa. Las características reológicas muestran que los polisacáridos estructurales provenientes de *Opuntia* son similares a los obtenidos de otras fuentes, por lo que tienen potencial para uso industrial.

Palabras clave: Celulosa, consistencia, flujo, hemicelulosas, mucílagos, pectinas, reofluidificante, viscosidad.

Abstract

Domestication as an evolutionary process alters genetic and morphologic characteristics of wild plants, these are connected with tissues chemical composition. The more abundant polysaccharides of the nopalitos are structural and their proportion has changed with this process. The aim of this study was the rheological characterization of mucilages, pectins, hemicelluloses and, cellulose of nopalitos (*Opuntia* spp.) in a domestication gradient. The hypothesis was that the rheological parameters, as flow index and consistency coefficient, show different values related to the domestication gradient. Nopalitos of the variants Coloradita, Amarillo Montesa and Atlixco of *O. streptacantha*, *O. megacantha* and *O. ficus-indica* respectively, were evaluated. The study was conducted as a completely randomized design. The polysaccharides were extracted in sequence with water, ammonium oxalate and, potassium hydroxide, and cellulose as a residue, precipitated with ethanol, purified by watery washed and dialyzed against water and gravimetrically quantified after being lyophilized. Rheological characterization of polysaccharides was made in 0.5 % (w/v) solutions at 25°C with double wall concentric cylinders geometry. The flow curves were adjusted by regression to Ostwald-De Waele or Power Law model and flow index (nondimensional) and consistency coefficient ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$) were obtained. Data were analyzed by ANOVA and multiple comparisons of Tukey ($p < 0.05$). The flow curves of mucilages, pectins and celluloses showed a pseudoplastic behavior, whereas hemicelluloses tended to have a behavior of a Newtonian fluid. Mucilages and pectins of *O. megacantha* had the highest (0.62) and lowest (0.53) flow index, respectively. The loosely bound hemicellulose of *O. ficus-indica* had the lower index (0.82) among all groups. Loosely bound hemicelluloses and cellulose had similar flow index among species, 0.94 and 0.19 on average, respectively. Mucilages and loosely bound hemicelluloses of *O. ficus-indica* had the highest coefficients of consistence ($0.1770 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.53}$ and $0.0094 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.82}$, respectively), that of cellulose of *O. streptacantha* was higher ($0.0851 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.17}$) than *O. ficus-indica* ($0.0234 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.41}$) and pectins and tightly bound hemicelluloses were similar among species. Domestication process modified flow index of mucilages,

pectins and loosely bound hemicelluloses and consistence coefficient of mucilages, loosely bound hemicelluloses and cellulose of nopalitos. An industrial potential exist for structural polysaccharides from *Opuntia* similar to that obtained from other sources.

Keywords: Cellulose, consistence, flow, hemicelluloses, mucilages, pectins, pseudoplastic, viscosity.

Introducción

La Altiplanicie Meridional de México es considerada el centro de domesticación del género *Opuntia* (Bravo, 1978; Griffith, 2004; Reyes-Agüero *et al.*, 2005). Las especies *O. hyptiacantha*, *O. lasiacantha*, *O. megacantha* y *O. streptacantha* muestran cierto nivel de humanización y son consideradas ancestros de *O. albicarpa* y *O. ficus-indica* (Bravo, 1978; Reyes-Agüero *et al.*, 2005). Aunque *O. ficus-indica* pudo derivarse de *O. megacantha*, la más cercana a la forma silvestre (Griffith 1914, citado por Bravo, 1978), lo más probable es que se derivó de *O. albicarpa* (Reyes-Agüero *et al.*, 2005). En la región del Bajío mexicano (centro-norte de México) se encontraron variantes silvestres con diferente grado de humanización relacionadas con las series *Streptacanthae* y *Ficus-indicae* (Colunga *et al.*, 1986).

Probablemente la selección de la serie *Streptacanthae* comenzó con *O. streptacantha*, posteriormente continuó con especies como *O. hyptiacantha* y *O. megacantha*, con cierta circunscripción local, y finalmente se concentró en variantes con frutos grandes y asociadas a *O. albicarpa* y *O. ficus-indica* (Reyes-Agüero *et al.*, 2005).

Los polisacáridos se utilizan en la industria alimentaria por su propiedad para modificar las características funcionales de los sistemas alimentarios (Medina-Torres *et al.*, 2000). Se clasifican como de reserva (almidón) y estructurales (pectinas, hemicelulosas y celulosas). Los nopalitos contienen polisacáridos del tipo estructural, clasificados como solubles (pectinas, mucílagos y hemicelulosas clasificadas como gomas) e insolubles (hemicelulosas y celulosa) (García y Peña, 1995).

La reología se define como el estudio de la deformación y flujo de los materiales en respuesta a fuerzas aplicadas (Steffe, 1996). Se han realizado diversos estudios para caracterizar el comportamiento reológico de algunos polisacáridos de *Opuntia* (Calvo, 2008; Cárdenas *et al.*, 1997; Medina-Torres *et al.*, 2003; Trachtenberg y Mayer, 1982); sin embargo, todos estos trabajos se han llevado a cabo principalmente en variantes de *O. ficus-indica*.

Las cactáceas se distinguen por la producción de un grupo complejo de polisacáridos denominado mucílago, que es secretado por las células a la pared celular (Trachtenberg y Fahn, 1981), con comportamiento de polielectrólito (McGarvie y Parolis, 1981, citados por Medina-Torres *et al.*, 2000). El peso molecular de estas macromoléculas es variable. Cárdenas *et al.* (1997) registraron 2.4×10^6 g mol⁻¹ menor al obtenido por Trachtenberg y Mayer (1981) (4.3×10^6 g mol⁻¹) en *O. ficus-indica* cv. Burkans y mayor al de Medina-Torres *et al.* (2000) (2.3×10^4 g mol⁻¹) en cv. Milpa Alta de la misma especie. La composición química de los mucílagos ha sido descrita incipientemente; el de cladodios de *O. ficus-indica* contiene arabinosa (24.60 a 44.04 %), galactosa (20.43 a 40.10 %), ramnosa (7.02 a 13.10 %), xilosa (22.13 a 22.20 %) y ácido galacturónico (6.38 %) (Medina-Torres *et al.*, 2000; Trachtenberg y Mayer, 1981). En relación con las características reológicas, Cárdenas *et al.* (1997) y Medina-Torres *et al.* (2000) observaron que el comportamiento del mucílago de cladodios de *O. ficus-indica* fue similar al de soluciones acuosas de goma guar (polisacárido seminal de *Cyamopsis tetragonoloba*, Fabaceae, de uso común en la industria alimenticia). También se ha documentado un aumento de la viscosidad de las soluciones acuosas del mucílago con el decremento de la temperatura y la concentración de iones Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺, lo que indica que las moléculas de mucílago tienen carga negativa (Medina-Torres *et al.*, 2000; Trachtenberg y Mayer, 1982).

En soluciones acuosas de mucílago se observó comportamiento reofluidificante o pseudoplástico (Calvo, 2008; Cárdenas *et al.*, 1997). Este comportamiento tiene diversas aplicaciones ingenieriles y es similar al de la goma xantana. Lo anterior justifica el interés de estudiar este grupo de polisacáridos relativamente abundantes en nopal (hasta 12 % en biomasa seca; Peña-Valdivia *et al.*, 2010) y la posibilidad de complementar el uso de la costosa goma xantana (Medina-Torres *et al.*, 2000).

Las pectinas son ampliamente utilizadas en la industria alimentaria como gelificantes (Cárdenas *et al.*, 2008). Están formadas por unidades de ácido D-galacturónico, en las que algunos de los grupos carboxilo pueden ser sustituidos por grupos metilo (ésteres o aminos) (Löofgren y Hermansson, 2007). Las pectinas son clasificadas con grado alto o bajo de esterificación pueden formar geles por interacciones hidrofóbicas con puentes de hidrógeno cuando el pH es menor a 3.5 y en presencia de más de 55 % de azúcares y las clasificadas con grado bajo de esterificación forman los geles con la presencia de cationes divalentes, particularmente Ca²⁺ (Cárdenas *et al.*, 2008; Lutz *et al.*, 2009). Goycoolea y Cárdenas (2003) identificaron que las pectinas de nopales de *O. ficus-indica* son del tipo de grado bajo de esterificación.

Las pectinas de nopalito de *O. ficus-indica* están formadas por ácidos urónicos (85.4%) ramnosa (0.6%), arabinosa (6.0%), galactosa (7.0%) y xilosa (1.0%) y con viscosidad intrínseca de 234 ml/g (Cárdenas *et al.*, 2008). En relación con las características reológicas, las pectinas de *O. ficus-indica* generaron una curva sigmoideal de la elevación de los módulos de pérdida (G'') y almacenaje (G') durante el enfriamiento (de ~40 a 10°C); esta información permitió concluir que las pectinas de nopal tienen comportamiento reológico similar al de otros polisacáridos usados industrialmente, como agarosa, *k*-carrageninas y gelana, y se propone que las pectinas provenientes de este género pueden ser utilizadas como texturizadores y estabilizadores en diversas industrias (Cárdenas *et al.*, 2008; Goycoolea y Cárdenas, 2003).

La propiedad que les permite formar geles a las sustancias pécticas (mucílagos y pectinas) tiene importancia biológica, pues se conoce que determina ciertas características fisicoquímicas, como la plasticidad mecánica de las paredes celulares, y por su capacidad de formar hidrocoloides incrementan la tolerancia a la deshidratación de los tejidos (Nobel *et al.*, 1992; Trachtenberg y Mayer, 1982). Las hemicelulosas, como los mucílagos y pectinas, son macromoléculas complejas, formadas por azúcares diversos; en este grupo de polisacáridos están las xilanas, mananas y galactanas identificadas entre las principales hemicelulosas de las paredes celulares (García y Peña, 1995). Además, las galactomananas, xiloglucanas, glucomananas, arabinoxilanas y arabinogalactanas son los tipos de hemicelulosas que tienen un amplio uso en la industria como agentes espesantes, estabilizantes, texturizantes, entre otros (Izydorczyk *et al.*, 2005).

La investigación sobre las propiedades reológicas y usos potenciales de los polisacáridos estructurales, principalmente de *O. ficus-indica*, realizados por Calvo (2008), Cárdenas *et al.* (1997; 2008), Goycoolea y Cárdenas (2003), Lozada (2007) y Medina-Torres *et al.* (2000) y Trachtenberg y Mayer (1982) se enfocaron en las pectinas y sólo algunos a los mucílagos; aún así, confirmaron nuevos usos de los nopales. Sin embargo, es evidente que *Opuntia* spp. es fuente abundante de otros polisacáridos, como las gomas, que podrían sustituir las convencionales que México importa con costos notablemente altos (Estévez *et al.*, 2004). Además, el panorama se amplifica si consideramos la abundancia y riqueza de especies mexicanas, aparte de *O. ficus-indica*. Por tal motivo el presente trabajo tuvo por objetivo extraer los polisacáridos estructurales de nopalitos pertenecientes a tres especies de *Opuntia*, representantes de un gradiente de domesticación, y caracterizarlos mediante algunas de sus características reológicas. La hipótesis es que las características reológicas de los diferentes grupos de polisacáridos se modifican con nivel de domesticación.

Materiales y métodos

Material biológico

Se utilizaron cladodios jóvenes de *O. streptacantha* variante Coloradita, *O. megacantha* variante Amarillo Montesa y *O. ficus-indica* cultivar Atlixco. Las especies utilizadas son representantes del gradiente de domesticación reconocido por Reyes-Agüero *et al.* (2005), en el que *O. streptacantha* está en el extremo silvestre y *O. ficus-indica* en el de mayor domesticación. Los cladodios se obtuvieron del banco de germoplasma del Centro Regional Universitario Centro Norte de la Universidad Autónoma Chapingo (CRUCEN-UACH), localizado a 4 km al suroeste de la ciudad de Zacatecas, México, en la localidad de “Huertas del Orito” (22° 44.7’ latitud Norte y 102° 36.4’ longitud Oeste), clima BS1kw(w), con lluvias en verano e invierno frío (García, 2004). En ese campo, las plantas muestreadas han crecido los últimos diez años en condiciones ambientales homogéneas; es decir, han estado sometidas a las mismas temperaturas, precipitación, tipo de suelo, etc.

En mayo de 2009 se obtuvieron nopalitos con una longitud de 17.5 ± 2.5 cm (estadio de crecimiento 2, según Ramírez-Tobías *et al.*, 2007 y López-Palacios *et al.*, 2010) y sin evidencia de producción de yemas. Al momento de la cosecha se midió: anchura máxima del nopalito, grosor del podario, grosor en el ápice y centro del nopalito, número de aréolas con y sin espinas por cara y en el margen. Luego, los nopalitos fueron trasladados conservados en hielo al laboratorio de Biofísica del Posgrado de Botánica, del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Edo. de México. En ese laboratorio se determinó el contenido de polisacáridos; para ello los nopalitos fueron seccionados en trozos pequeños y congelados a -20° C, se deshidrataron por liofilización (Labconco® modelo Free Zone 6, Kansas city, MO, EE.UU.), se determinó el porcentaje de materia seca y los segmentos deshidratados fueron triturados en un mortero hasta obtener un polvo.

Extracción y purificación de polisacáridos estructurales

Para la extracción, purificación y cuantificación de los polisacáridos se empleó el método descrito para nopalitos y tunas por Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta (2004) y probado por Álvarez y Peña-Valdivia (2009) en frutos de xoconostle. La metodología incluye la extracción en secuencia de los polisacáridos con disolventes acuosos (agua caliente, oxalato de amonio e hidróxido de potasio), precipitación con etanol, purificación por lavado acuoso y diálisis contra agua y cuantificación gravimétrica después de ser liofilizados.

El mucílago se extrajo con agua destilada y calor de 1g de muestra deshidratada, en una relación 1:20 (peso: volumen); del residuo, ya sin mucílago, también con calor fueron

disueltas las pectinas con oxalato de amonio $((\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4)$ acuoso al 0.5 % en una relación 1:15 (peso original:volumen). El residuo sólido, ya sin mucílago ni pectinas, fue usado para extraer dos grupos de hemicelulosas, las clasificadas como débilmente y fuertemente unidas a la celulosa. El primer grupo fue disuelto en hidróxido de potasio (KOH) acuoso al 5.0 %, en relación 1:10 (peso original:volumen) y las fuertemente unidas con KOH al 24.0 %. La fase sólida residual, después de disolver los cuatro grupos de polisacáridos (mucílagos, pectinas y los dos tipos de hemicelulosas), se lavó con agua hasta alcanzar pH neutro, se congeló y luego se deshidrató con liofilizador, lo que representó la celulosa.

Para asegurar la extracción exhaustiva, cada extracción se realizó por triplicado en la misma muestra. Cada grupo de polisacáridos se concentró al precipitarlo con etanol en proporción 1:4 (v:v), se separó de la fase acuosa por centrifugación (Damon modelo IEC HN-S, EE.UU.) y se purificó mediante diálisis en membrana tubular contra agua destilada durante 72 h. Después de la diálisis, los polisacáridos fueron congelados y deshidratados mediante liofilización, ya secos, se cuantificaron en una balanza analítica (Scientech® modelo SA 120, ± 0.0001 g, EE. UU.). El contenido de cada polisacárido fue representado como porcentaje del tejido seco original.

Se determinó la presencia o ausencia de lignina por tinción con fluoroglucinol acuoso en el residuo del tejido identificado como celulosa de acuerdo con la metodología descrita por Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta (2004).

Mediciones reológicas

Las mediciones reológicas se hicieron en el laboratorio de Análisis Especiales del Centro de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de los Alimentos de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Tulancingo, Hidalgo. Se empleó un reómetro de esfuerzo controlado (TA Instruments® Modelo AR2000, USA), con una geometría de cilindros concéntricos de doble pared (radio exterior del rotor = 21.96 mm, radio interno del rotor = 20.38 mm, radio interno de copa = 20.0 mm, longitud inmersa = 59.50 mm, “gap” = 500 μm y temperatura = 25°C). Con excepción de las celulosas, las mediciones se realizaron en el intervalo de velocidad de cizalla desde 0.1 a 300 s^{-1} , esto con la finalidad de conocer si había dependencia del tiempo. En el caso de la celulosa, debido a que es insoluble en agua, fue necesario un precizamiento a 50 s^{-1} durante 1 min, posteriormente se evaluaron las propiedades al flujo en el intervalo de velocidad de cizalla de 100.0 a 0.3 s^{-1} . En todos los casos no se observó dependencia de la viscosidad con el tiempo, por lo tanto se consideraron los valores de la

segunda curva de flujo omitiendo los datos que no cumplieran con el valor mínimo de torque ($\geq 10 \mu\text{N}\cdot\text{m}$) accesible por el equipo.

Las evaluaciones se realizaron en soluciones (o suspensiones) acuosas de cada uno de los polisacáridos (mucílagos, pectinas, hemicelulosas débilmente y fuertemente unidas y celulosa) al 0.5% (p/v). Las soluciones de los mucílagos y pectinas se obtuvieron después de mantener en agitación constante durante 24 h; además, los mucílagos requirieron calentamiento en baño María hasta alcanzar los 70°C. Ambos tipos de hemicelulosas y la celulosa se mantuvieron durante 12 h en un baño (Foss TECATOR modelo 1024, Dinamarca) a 50°C y luego se elevó la temperatura de la solución-suspensión hasta alcanzar 70°C, y se mantuvieron en agitación constante.

Diseño experimental

El experimento fue desarrollado bajo un diseño experimental completamente al azar. Los datos se graficaron en el programa SigmaPlot Jandel Scientific (Versión 10.0) y las curvas se ajustaron al modelo de Ostwal-De Waele o Ley de la Potencia (Ecuación 4.1) dado por:

$$\sigma = K\dot{\gamma}^n \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

donde K es el coeficiente de consistencia ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$) y n el índice de flujo (adimensional). El coeficiente de consistencia es una función de la concentración y la temperatura de la solución (Abraján, 2008; Yasar *et al.*, 2007). Los parámetros K y n son obtenidos del análisis de regresión gráfica del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla. Si $n = 1$ la solución analizada es considerada Newtoniana y si $n < 1$ es considerada un fluido reofluídificante o pseudoplástico. A los datos obtenidos de la regresión y los morfológicos se les realizó un análisis de varianza y comparación múltiple de medias de Tukey (SAS, 1999-2000).

Resultados y discusión

Atributos morfológicos

Las características morfológicas de los nopalitos fueron evaluadas para confirmar si las especies seleccionadas presentaban el gradiente de domesticación descrito por Reyes-Agüero *et al.* (2005). El número de aréolas con espinas por cara y en el margen presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) y los otros atributos fueron iguales estadísticamente ($p > 0.05$). En promedio el número de aréolas con espinas por cara y en el margen fue de 13.94 y

15.47, respectivamente. En ambos atributos, *O. streptacantha* y *O. megacantha* fueron similares y tuvieron los valores mayores. En parte, debido a lo anterior, *O. ficus-indica* tuvo el número menor de espinas en comparación con las otras especies (Cuadro 4.1).

Estos resultados coinciden con lo registrado por Reyes-Agüero *et al.* (2005), en los que las especies con un nivel menor de domesticación presentan densidad mayor de aréolas con espinas, como *O. streptacantha*, y disminuye hasta la especie con el nivel mayor de domesticación, como *O. ficus-indica*. Esta última se caracteriza por tener cladodios grandes, con pocas hileras de aréolas y densidad baja de ellas con número reducido de espinas. La modificación en estos parámetros es característica del síndrome de domesticación; pues las espinas al tener, entre otras, funciones de protección mecánica contra depredadores han disminuido en cantidad en las especies domesticadas como respuesta al ambiente de cultivo, parcialmente protegido (Baker, 1971; Casas *et al.*, 1997 y 1999; Reyes-Agüero *et al.*, 2005).

Cuadro 4.1 Características morfológicas de nopalitos de tres variantes correspondientes a tres especies de *Opuntia*.

Atributo	Especie		
	<i>O. streptacantha</i> Coloradita	<i>O. megacantha</i> Amarillo Montesa	<i>O. ficus-indica</i> Atlixco
Peso (g)	89.89 a*	55.89 a	62.56 a
Anchura (cm)	9.20 a	8.00 a	9.58 a
Grosor del podario (cm)	1.33 a	1.49 a	1.48 a
Grosor en el ápice (cm)	0.28 b	0.51 a	0.24 b
Grosor en el centro (cm)	0.56 a	0.62 a	0.64 a
Aréolas por cara (Núm.)	57.7 a	48.0 a	51.4 a
Aréolas con espinas por cara (Núm.)	17.3 a	19.3 a	3.4 b
Aréolas en el margen (Núm.)	60.3 a	51.7 a	63.6 a
Aréolas con espinas en el margen (Núm.)	20.3 a	19.8 a	4.4 b

*Valores seguidos por la misma letra dentro de líneas son significativamente similares (Tukey, $p < 0.05$).

Polisacáridos estructurales

Con la finalidad de conocer el contenido y proporción de los polisacáridos estructurales de los nopalitos se realizó la comparación múltiple de medias de Tukey, posterior al ANAVA. La proporción de cada tipo de polisacárido varió significativamente entre las especies (Cuadro 4.2).

Cuadro 4.2 Contenido de polisacáridos estructurales (g/100 g de materia seca) de tres variantes de nopalitos representantes de tres especies de *Opuntia*.

Tipo de polisacárido estructural	Especie		
	<i>O. streptacantha</i> Coloradita	<i>O. megacantha</i> Amarillo Montesa	<i>O. ficus-indica</i> Atlixco
Mucílago	4.93 ± 0.56 c*	7.79 ± 0.51 b	12.43 ± 0.94 a
Pectina	2.19 ± 0.07 a	2.41 ± 0.37 a	2.44 ± 0.27 a
Hemicelulosas			
Débilmente unidas	7.83 ± 0.99 a	7.36 ± 0.56 a	6.38 ± 0.80 a
Fuertemente unidas	3.32 ± 0.29 a	2.47 ± 0.44 ab	1.81 ± 0.27 b
Celulosa	4.76 ± 0.18 ab	3.24 ± 0.80 b	6.66 ± 0.59 a

*Media±error estándar, n=6. Valores con diferente letra en cada fila indica diferencia significativa (Tukey, p<0.05).

Opuntia streptacantha presentó el contenido menor de mucílago (4.93 %), el valor intermedio correspondió a *O. megacantha* (7.79 %) y *O. ficus-indica* presentó en promedio cerca de 50 % más de mucílagos (12.43 %) que las otras especies. El contenido de pectinas, estuvo entre 2.19 y 2.44 % y fue similar entre las especies evaluadas. Una tendencia similar se observó en las hemicelulosas débilmente unidas, las que presentaron entre 6.38 y 7.83 % de la biomasa seca de los nopalitos. Las hemicelulosas fuertemente unidas formaron dos grupos (p<0.05), el de mayor concentración (de 3.22 a 2.47 %) estuvo representado por *O. streptacantha* y compartido por *O. megacantha*, el grupo con concentración menor (de 2.47 a 1.81 %) lo representó *O. ficus-indica* y fue compartido con *O. megacantha*. La celulosa presentó una agrupación similar al de las hemicelulosas fuertemente unidas, pero la organización de los grupos cambio parcialmente (Cuadro 4.2). Los resultados obtenidos indican que el proceso de domesticación tuvo efecto en la concentración de mucílagos, hemicelulosas fuertemente unidas y celulosa de los nopalitos. Estos son parcialmente diferentes a los obtenidos con el análisis que incluyó nopalitos de 14 variantes y cinco especies de *Opuntia* (Capítulo 3, de esta tesis). La diferencia más notoria es que en los resultados de ese análisis se demostró que la proporción de celulosa de los nopalitos es constante entre las especies, independientemente del grado de domesticación; aunque si se presentan diferencias significativas entre variantes.

Independientemente de la especie, ninguno de los polisacáridos en solución ni la celulosa en suspensión presentó dependencia del tiempo durante la deformación. Además, las curvas de viscosidad en función de la velocidad de cizalla mostraron que todos los polisacáridos tuvieron un comportamiento pseudoplástico típico, independientemente de la especie (Figura 4.1)

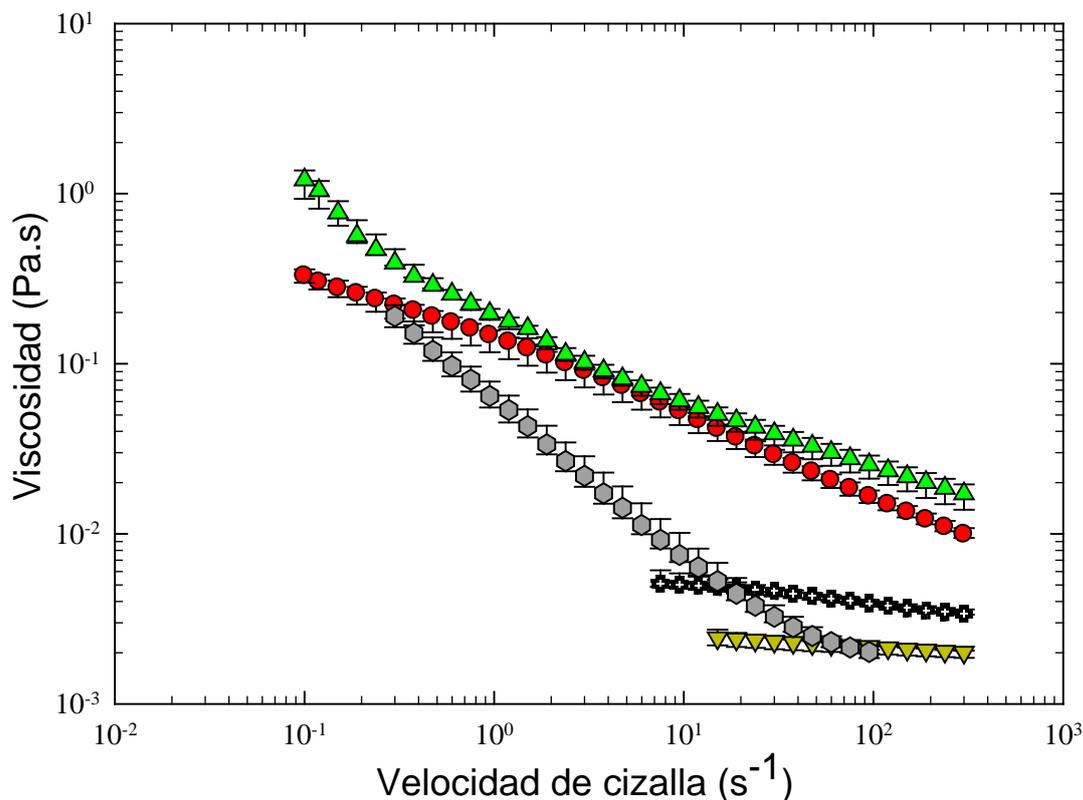


Figura 4.1 Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de soluciones acuosas al 0.5 % de polisacáridos (p:v) estructurales de nopalitos (*Opuntia* spp.) (● mucílagos, ▲ pectinas, ■ hemicelulosas débilmente y ▼ fuertemente unidas y ● celulosa). Las barras verticales sobre los símbolos indican el error estándar, n=6.

Los reogramas se ajustaron al modelo de Ostwald-De Waele (Ecuación 4.1). Los mucílagos y las pectinas mostraron similitud estadística ($p > 0.05$) y presentaron valores mayores del coeficiente de consistencia (K), $0.1308 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.56}$ y $0.1407 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.61}$, respectivamente. Los grupos de hemicelulosas débilmente y fuertemente unidas también tuvieron similitud estadística y mostraron los valores menores, $0.0069 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.88}$ y $0.0029 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.94}$, respectivamente. La celulosa tuvo valores intermedios entre los otros polisacáridos (Cuadro 4.3).

Los polisacáridos de los nopalitos de las tres especies estudiadas se distribuyeron en tres grupos por su índice de flujo (n). Las hemicelulosas débilmente y fuertemente unidas similares entre sí ($p > 0.05$) con 0.8840 y 0.9389, respectivamente, fueron las menos reofluidificantes o pseudoplásticas con los valores mayores ($0 < n < 1$); el grupo con valores intermedios quedó integrado por los mucílagos y las pectinas, con valores entre 0.5589 y

0.6106, respectivamente. La celulosa fue el polisacárido más reofluidificante con un índice de flujo de 0.2668 (Cuadro 4.3).

Cuadro 4.3 Coeficiente de consistencia (K) e índice de flujo (n) de polisacáridos estructurales de nopalitos (*Opuntia* spp.), estimados con la ecuación de Ostwald-De Waele.

Polisacárido	K (Pa·s ^{n})	n	R ²
Mucílagos	0.1308 ± 0.02 a*	0.5589 ± 0.019 b	0.9997
Pectinas	0.1407 ± 0.009 a	0.6106 ± 0.026 b	0.9974
Hemicelulosas			
Débilmente unidas	0.0069 ± 0.0009 c	0.8840 ± 0.022 a	0.9998
Fuertemente unidas	0.0029 ± 0.0004 c	0.9389 ± 0.014 a	0.9999
Celulosa	0.0539 ± 0.0121 b	0.2668 ± 0.057 c	0.8149

*Medias±error estándar; n=6. Valores con la misma letra en la columna indica similitud estadística (Tukey, p<0.05).

La viscosidad de una solución es función de las fuerzas intermoleculares que restringen el movimiento y se afectan por cambios de la temperatura y concentración (Medina-Torres *et al.*, 2000; Sozen y Kikini, 2008; Yasar *et al.*, 2007). El comportamiento pseudoplástico es debido a: a) la presencia de componentes con peso molecular alto o con partículas en concentraciones bajas, b) la interacción física alta entre las partículas cuando su contenido es alto, lo que causa su agregación o asociación por puentes secundarios, c) la amplia relación axial y asimétrica de las partículas, lo que requiere que su orientación sea a lo largo de las líneas de flujo, d) la variación del tamaño y forma de las partículas, las que permiten el incremento de la cantidad de estas partículas y e) la presencia de partículas no rígidas o flexibles que pueden sufrir un cambio en su geometría o forma (Ibars y Barbosa-Cánovas, 2003).

Mucílagos

Las curvas de flujo de los mucílagos de *O. streptacantha* mostraron similitud con las de *O. ficus-indica* (Figura 4.2), reconocidas como silvestre y domesticada, respectivamente. Las soluciones de mucílago de *O. megacantha* presentaron un comportamiento más reofluidificante con $n = 0.6158$ (Cuadro 4.4), con respecto a *O. streptacantha* y *O. ficus-indica*, iguales estadísticamente ($p > 0.05$) con 0.5331 y 0.5279, respectivamente. Los mucílagos de *O. ficus-indica* presentaron mayor consistencia (0.177 Pa·s^{0.53}) ($p < 0.05$) que

los de *O. megacantha* ($0.075 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.62}$), mientras que los de *O. streptacantha* ($0.14 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$) fueron similares estadísticamente a los de las otras dos especies (Cuadro 4.5), lo que indica que su viscosidad aparente poco se modificó durante el proceso de domesticación.

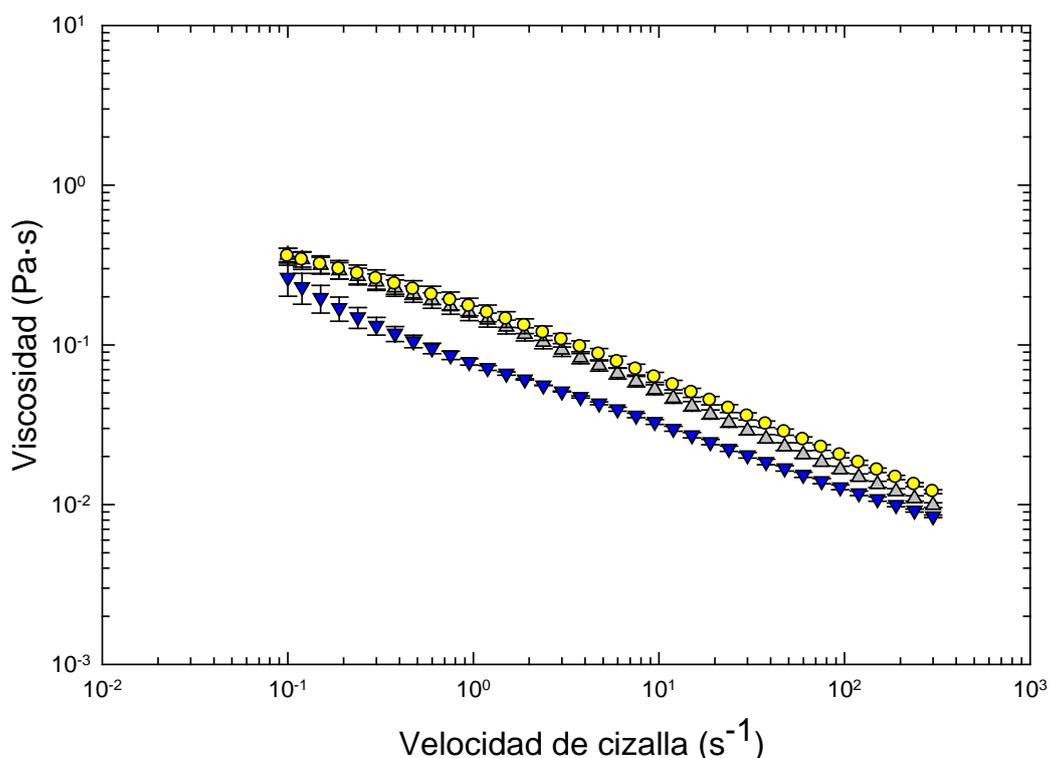


Figura 4.2 Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de soluciones acuosas al 0.5 % de mucílagos de nopalitos de tres especies (Δ *O. streptacantha*, ∇ *O. megacantha* y \bullet *O. ficus-indica*), representantes de un gradiente de domesticación de *Opuntia*. Las barras verticales sobre los símbolos indican el error estándar.

Cuadro 4.4 Índice de flujo (adimensional) de polisacáridos estructurales de nopalitos de variantes de tres especies de nopalitos de *Opuntia*.

Polisacárido	Especie		
	<i>O. streptacantha</i> Coloradita	<i>O. megacantha</i> Amarillo Montesa	<i>O. ficus-indica</i> Atlixco
Mucílago	0.5331±0.0119 b*	0.6158±0.0057 a	0.5279±0.0127 b
Pectina	0.6648±0.0077 a	0.530±0.0086 b	0.6371±0.0101 a
Hemicelulosa			
Débilmente unida	0.9078±0.0012 a	0.9274±0.0017 a	0.8168±0.0148 b
Fuertemente unida	0.9430±0.0007 a	0.9028±0.0195 a	0.9708±0.0024 a
Celulosa	0.1729±0.0405 a	0.2165±0.0509 a	0.4110±0.1131 a

*Media±error estándar; n=2. Valores con la misma letra indican similitud estadística en cada fila (Tukey, $p < 0.05$). Coeficiente de determinación de 0.7251 a 1.0.

Cuadro 4.5 Coeficiente de consistencia (Pa·sⁿ) de polisacáridos estructurales de tres especies de nopalitos (*Opuntia* spp.).

Polisacárido	Especie		
	<i>O. streptacantha</i> Coloradita	<i>O. megacantha</i> Amarillo Montesa	<i>O. ficus-indica</i> Atlixco
Mucílago	0.1404±0.0145 ab*	0.0750±0.0042 b	0.1770±0.0172 a
Pectina	0.1634±0.0124 a	0.1236±0.0116 a	0.1353±0.0122 a
Hemicelulosa			
Débilmente unida	0.0064±0.0004 ab	0.0050±0.0001 b	0.0094±0.0009 a
Fuertemente unida	0.0029±0.0005 a	0.0038±0.0006 a	0.0021±0.0005 a
Celulosa	0.0851±0.0143 a	0.0532±0.0053 ab	0.0234±0.0076 b

*Media±error estándar; n=2. Valores con la misma letra indican similitud estadística en cada fila (Tukey, p<0.05). Coeficiente de determinación de 0.7251 a 1.0.

Los valores del índice de flujo y de coeficiente de consistencia (Cuadros 4.4 y 4.5) concordaron con los descritos por Medina-Torres *et al.* (2000) para soluciones de los mucílago con concentraciones de 1.0 y 3.0 %, extraídos de nopales de *O. ficus-indica*, con un índice de flujo de 0.56 y 0.50 y coeficiente de consistencia de 0.15 a 1.05 Pa·sⁿ, respectivamente, y con lo documentado por Abraján (2008) ($n = 0.61$ y $K = 0.14$ Pa·sⁿ) para soluciones al 3.0 % de mucílago extraído de nopales crudos también de *O. ficus-indica*. Medina-Torres *et al.* (2000) y Abraján (2008) observaron que al incrementar la concentración aumenta la consistencia y disminuye n , y por tanto las soluciones del mucílago incrementan la viscosidad y se comportan como un material reofluidificante.

El comportamiento de flujo de los mucílago en la presente investigación concuerda con el documentado por otros autores para los mucílago de *Opuntia* spp. (Abraján, 2008; Calvo, 2008; Cárdenas *et al.*, 1997; Medina-Torres *et al.*, 2000), y al obtenido de otras fuentes vegetales, como semillas de *Alyssum homolocarpum* (Koocheki *et al.*, 2009), okra (*Hibiscus esculentus*) e *Irvingia gabonensis* (Ndjoyenkeu *et al.*, 1996). Cárdenas *et al.* (1997) mencionan que la goma okra, al igual que el mucílago, tiene la propiedad de formar hebras al contacto con el agua lo que indica la existencia de agregados de peso molecular alto; efectivamente, se ha documentado que el peso molecular del mucílago de *O. ficus-indica* varía entre 2.3×10^4 y 4.3×10^6 g mol⁻¹ en dependencia del cultivar, el ambiente de desarrollo de la planta y el método de extracción (Cárdenas *et al.*, 1997; Medina-Torres *et al.*, 2000; Trachtemberg y Mayer, 1981). Esta información puede ser usada para inferir que la menor consistencia en los mucílago de *O. megacantha* se puede deber a que son polisacáridos de peso molecular menor que los de *O. ficus-indica* y *O. streptacantha*, lo que produce su disminución.

Las gomas mucilaginosas utilizadas en la industria alimentaria son extraídas principalmente de semillas o tallos jóvenes de okra (*H. esculentus*), *Plantago* spp., mostaza amarilla (*Sinapis alba*) y lino (*Linum usitatissimum*); estas gomas son preferidas sobre otras, debido a sus propiedades de viscosidad, gelificación y la capacidad para retener agua (Izydorczyk *et al.*, 2005). Se ha comprobado que los geles de mucílago de *Opuntia* al 10 %, muestran un comportamiento similar al de la goma xantana al 1 % (Medina-Torres *et al.*, 2000). Esta característica permite visualizar el gran potencial de los mucílagos de *Opuntia* spp. como agentes espesantes con uso industrial en la elaboración de alimentos, cosméticos, productos farmacéuticos y otros (Cárdenas *et al.*, 2007; Sáenz *et al.*, 2004).

Se ha documentado que el contenido de mucílago determina la selección, aceptación por los consumidores y comercialización del nopalito, lo cual puede variar regionalmente (Razo y Sánchez, 2002) o por factores culturales (López-Palacios *et al.*, 2010). La concentración mayor de este grupo de polisacáridos en *O. ficus-indica*, aunado a su comportamiento reológico, podría haber tenido efecto en la selección a lo largo del proceso de domesticación. Así, los mucílagos en proporciones altas en los tejidos del nopal, por su capacitancia hidráulica, podrían tener efecto positivo para la supervivencia de las plantas en el ambiente natural, con humedad limitada y temperaturas de congelamiento en cierta época del año (Nobel *et al.*, 1992). Además, el índice de flujo menor de los mucílagos de *O. ficus-indica* permite suponer que estos polisacáridos son más fácil de remover en el agua de “lavado”, lo que podría explicar la predilección hacia nopalitos de esta especie por parte de un amplio sector de los consumidores.

Otros trabajos han caracterizado ampliamente los mucílagos de *O. ficus-indica* (Calvo, 2008; Cárdenas *et al.*, 1997; Medina-Torres *et al.*, 2000) y el presente abre la posibilidad para nuevos estudios en otras especies. Aunque *O. streptacantha* y *O. megacantha* presentaron contenido menor de mucílagos que *O. ficus-indica* el conocimiento de su viscosidad y reofluidez (Cuadro 4.2) permiten reconocer usos variados de estos polisacáridos.

Pectinas

El flujo de las pectinas, como el mucílago, fue reofluidificante en las tres especies (Figura 4.3); sin embargo, las de *O. streptacantha* y *O. ficus-indica* disminuyeron similarmente la viscosidad a partir de una velocidad de cizalla de 0.3 s^{-1} , y a partir de ese valor igualaron el comportamiento de las de *O. megacantha*. En contraste, la disminución de la viscosidad de las pectinas de *O. megacantha* fue mayor a partir de 1.1 s^{-1} . El comportamiento de flujo

observado en este estudio fue similar al mostrado en pectinas de nopales y de cáscara de tuna de *O. ficus-indica* por Cárdenas *et al.* (2008) y Lozada (2007), respectivamente.

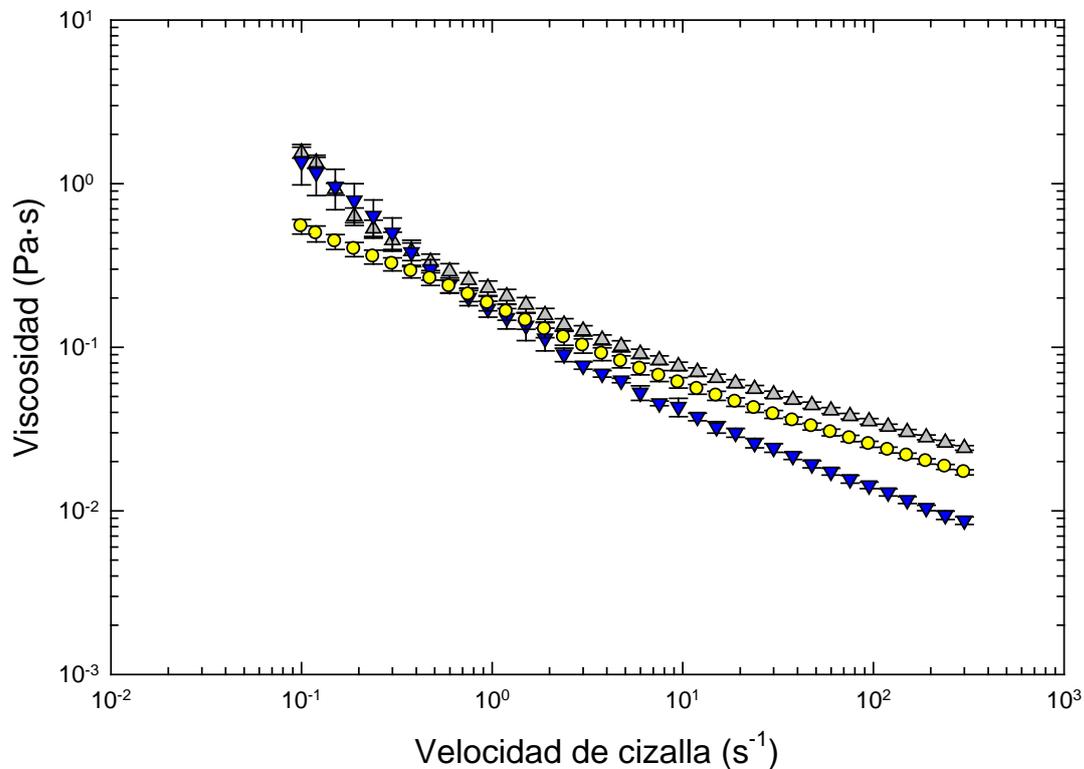


Figura 4.3 Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de soluciones acuosas al 0.5 % de pectinas de nopalitos tres especies (Δ *O. streptacantha*, ∇ *O. megacantha* y \bullet *O. ficus-indica*), representantes de un gradiente de domesticación de *Opuntia*. Las barras verticales sobre los símbolos indican el error estándar.

El índice de flujo de las pectinas de *O. megacantha* fue menor (0.53) que el de *O. streptacantha* y *O. ficus-indica*, similares entre sí y menos refluidificantes (índice de 0.6648 y 0.6371, respectivamente) (Cuadro 4.4); sin embargo, la consistencia de los mucílago fue similar entre las tres especies (Cuadro 4.5). Las diferencias no muestran una relación directa con el gradiente de domesticación, lo que se interpreta, como en el caso del mucílago, que el proceso de domesticación parece no tener un efecto en la viscosidad de las pectinas de las especies de *Opuntia*. Sin embargo, debido a que las variantes dentro de las especies pueden mostrar tendencias variadas, parece recomendable hacer las evaluaciones en las pectinas de un grupo mayor de variantes de cada especie e incluir más especies del gradiente de domesticación para reforzar los resultados de este estudio.

El índice de flujo de *O. streptacantha* y *O. ficus-indica* fue similar a los observados por Lozada (2007) en soluciones de pectinas de tuna al 2 %, de 0.604 y 0.711, extraídas con

EDTA al 0.5 y 1 %, respectivamente. Además, la consistencia de las pectinas en la presente investigación también coincide con la encontrada por el citado autor con pectinas extraídas con EDTA al 1 %. Debe señalarse que Lozada (2007) comparó las pectinas de tuna con las comerciales extraídas de cítricos y observó que las propiedades reológicas de las de tuna fueron superiores. El índice de flujo y coeficiente de consistencia de las pectinas de *Opuntia*, coincidieron con ambos parámetros de las de soluciones de carragenina al 1 y 3 %, evaluados a 60°C (Marcotte *et al.*, 2001).

Las pectinas de *Opuntia* sp. han sido clasificadas de metoxilo bajo, ya que forman geles en la presencia de iones calcio (Cárdenas *et al.*, 2007 y 2008; Forni *et al.*, 1994). Este tipo de pectinas tienen usos similares a los de carragenina (May, 1990), como agentes gelificantes de productos bajos en azúcar, como mermeladas, gelatinas y confitería, y otros en la industria alimentaria (Iglesias y Lozano, 2004).

Otra característica de las pectinas determina su uso y comportamiento reológico es el peso molecular (May, 1990). Las pectinas de remolacha azucarera, cáscara de cítricos y manzana, de uso industrial, tienen peso molecular de 1.12×10^5 a 1.53×10^5 g mol⁻¹ (Mesbahi *et al.*, 2005; Rascón-Chu *et al.* 2009). Majdoub *et al.* (2001) registraron un peso molecular de 1.3×10^5 g mol⁻¹ de las pectinas de nopal de *O. ficus-indica*. Aunque el peso molecular de las pectinas no se determinó en el presente estudio, las similitudes del rendimiento (Cuadro 4.2) y en las propiedades reológicas permiten suponer que el uso industrial potencial de esos polisacáridos de otras especies diferentes a *O. ficus-indica* es promisorio. Los resultados también se presentan como base para futuros trabajos en los que se incluyan otras especies y variantes de *Opuntia*.

Hemicelulosas

Las curvas de flujo de las hemicelulosas débilmente y fuertemente unidas mostraron tendencias de un comportamiento newtoniano (Figura 4.4 A y B); aunque, las débilmente unidas de *O. ficus-indica* mostraron un comportamiento reofluidificante ligero, debido a su viscosidad aparente superior al de las otras dos especies con cizallas menores a 30 s⁻¹ (Figura 4.4).

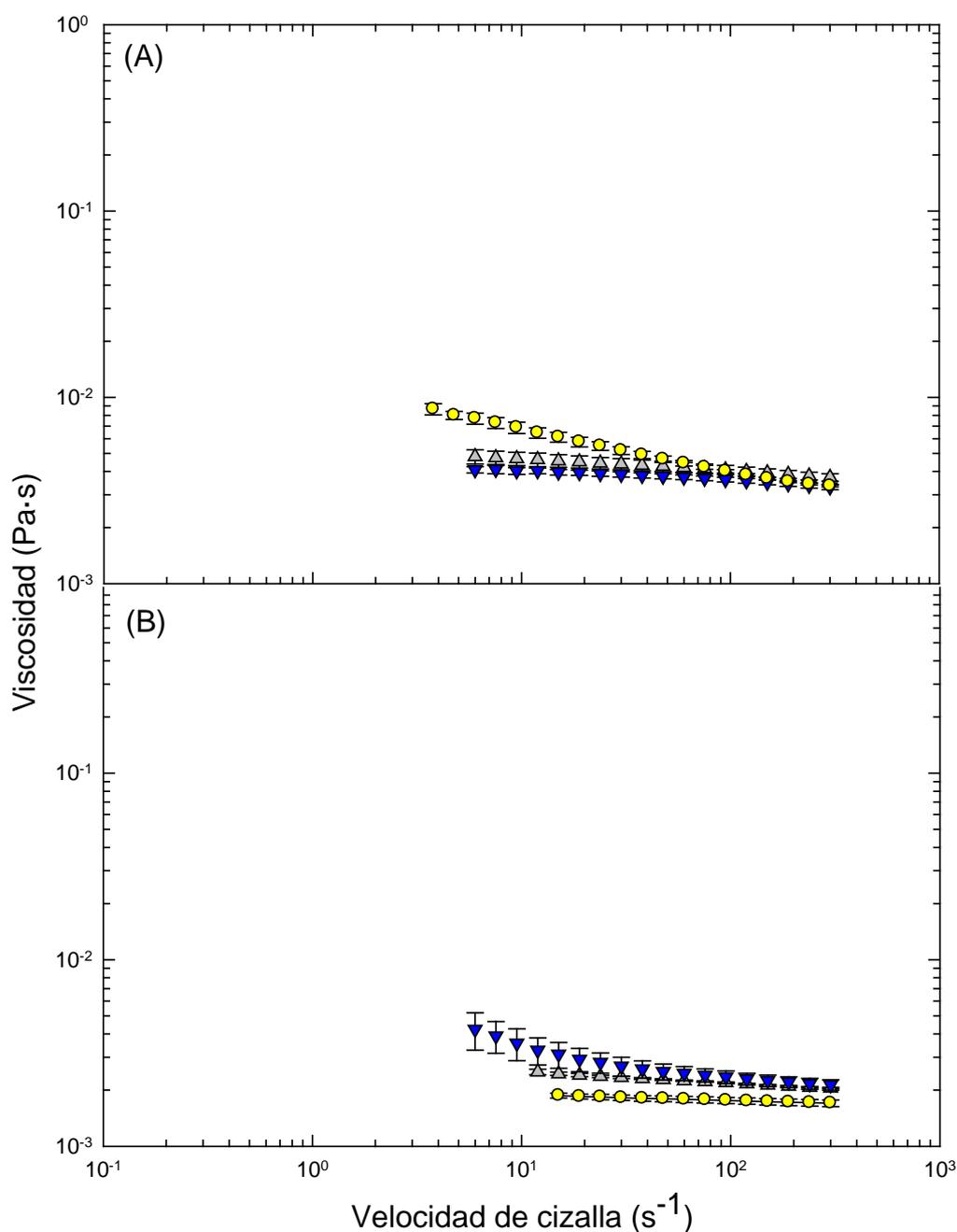


Figura 4.4 Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de soluciones acuosas al 0.5% de hemicelulosas (A) débilmente y (B) fuertemente unidas de tres especies de nopalito (Δ *O. streptacantha*, \blacktriangledown *O. megacantha* y \bullet *O. ficus-indica*) representantes de un gradiente de domesticación de *Opuntia*. Las barras verticales sobre los símbolos indican el error estándar.

Las hemicelulosas débilmente unidas de *O. streptacantha* y *O. megacantha* presentaron índices de flujo de 0.9078 y 0.9274, similares ($p > 0.05$) entre sí (Cuadro 4.4) y fueron menos refluidificantes a la cizalla que las de *O. ficus-indica* (índice de 0.8168). El

coeficiente de consistencia de las hemicelulosas de *O. streptacantha* y *O. megacantha* fue de $0.0064 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.91}$ y $0.0094 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.93}$, respectivamente y similar entre sí ($p > 0.05$) (Cuadro 4.5); asimismo, *O. streptacantha* fue similar a *O. megacantha* ($0.005 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.82}$) con un coeficiente inferior.

Los índices de flujo y los coeficientes de consistencia de las hemicelulosas fuertemente unidas fueron similares ($p > 0.05$) entre las especies (Cuadros 4.4 y 4.5).

Los usos industriales de las hemicelulosas dependen de la fuente de extracción y de sus características reológicas; así, es común el uso de las galactomananas obtenidas de semillas de algarrobo (*Ceratonia siliqua*), la goma guar extraída de *Cyamopsis tetragonoloba* y la goma tara extraída de *Caesalpinia spinosa*. Todas ellas tienen un comportamiento newtoniano en cizalla y concentración bajas, son compatibles con otros hidrocoloides, como el de xantana, y se utilizan como agentes espesantes, estabilizantes, y aditivos en productos horneados y como antidescongelantes en postres congelados. Las xiloglucanas, obtenidas a partir del cotiledón de las semillas de tamarindo (*Tamarindus indica*), son solubles en agua fría y gelifican en presencia de alcohol y concentraciones mayores a 50 % de azúcares, su comportamiento reológico es no-newtoniano cuando están en concentraciones superiores a 0.5 %, se utilizan como sustituto del azúcar en productos con contenido calórico bajo. Las glucomananas provenientes de raíces de *Amorphophallus konjac*, se utilizan como texturizante y espesante, y son solubles en agua cuando se mantienen en agitación constante y tratamiento térmico, tiene un comportamiento pseudoplástico (reofluidificante). Las arabinogalactanas provienen de tallos suaves, son de bajo peso molecular (de 1.5×10^4 a $2.5 \times 10^4 \text{ g mol}^{-1}$); debido a esto tienen un impacto limitado en la viscosidad, modifican poco el color y sabor de los alimentos, por ello se utilizan preferentemente en bebidas en las que se espera incrementar el contenido de fibra (Izydorczyk *et al.*, 2005). Lo anterior muestra la gran aplicación y utilidad de las gomas en productos diversos, y permite apreciar el potencial de uso de las hemicelulosas de *Opuntia* spp., que a la fecha ha sido desconocido.

Las hemicelulosas mostraron el grado de reofluidez menor entre los diferentes polisacáridos; esto indica indirectamente que son macromoléculas con peso molecular bajo (Wang y Cui, 2005); sin embargo en la literatura especializada fue imposible obtener esta información y parece no existir algún registro del peso molecular de las hemicelulosas de *Opuntia*. Así, este es otro tema que surge para el desarrollo de estudios futuros. El peso molecular documentado en las hemicelulosas solubles e insolubles de hojas de *Vertiveria zizanioides* es de 23.0 a 25.0 y de 28.5 a 33.5 g mol^{-1} , respectivamente (Methacanon *et al.*,

2003). Por su comportamiento reológico y por provenir de tallos modificados, las hemicelulosas presentes de los nopalitas de *Opuntia* podrían ser del tipo de las arabinogalactanas. Sin embargo, debido a que las hemicelulosas pueden modificarse durante el desarrollo de los tejidos de la planta (García y Peña, 1995), deberá comprobarse su composición real, con esto será posible complementar el conocimiento sobre sus aplicaciones.

Celulosa

Las curvas de flujo de la celulosa mostraron una pendiente más pronunciada respecto a los otros polisacáridos (Figura 4.5). Esta característica está relacionada con su grado de reofluidez, la que presentó índice de flujo de 0.1729 a 0.4110 sin diferencias estadísticas ($p > 0.05$) entre las especies (Cuadro 4.4). La celulosa formó dos grupos con base en los valores del coeficiente de consistencia, el conformado por *O. streptacantha* y *O. megacantha* con $0.0851 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.17}$ y $0.0532 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.22}$, respectivamente, y con los valores superiores. El menor coeficiente correspondió a la celulosa de *O. megacantha* y *O. ficus-indica* ($0.0234 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.41}$) (Cuadro 4.5).

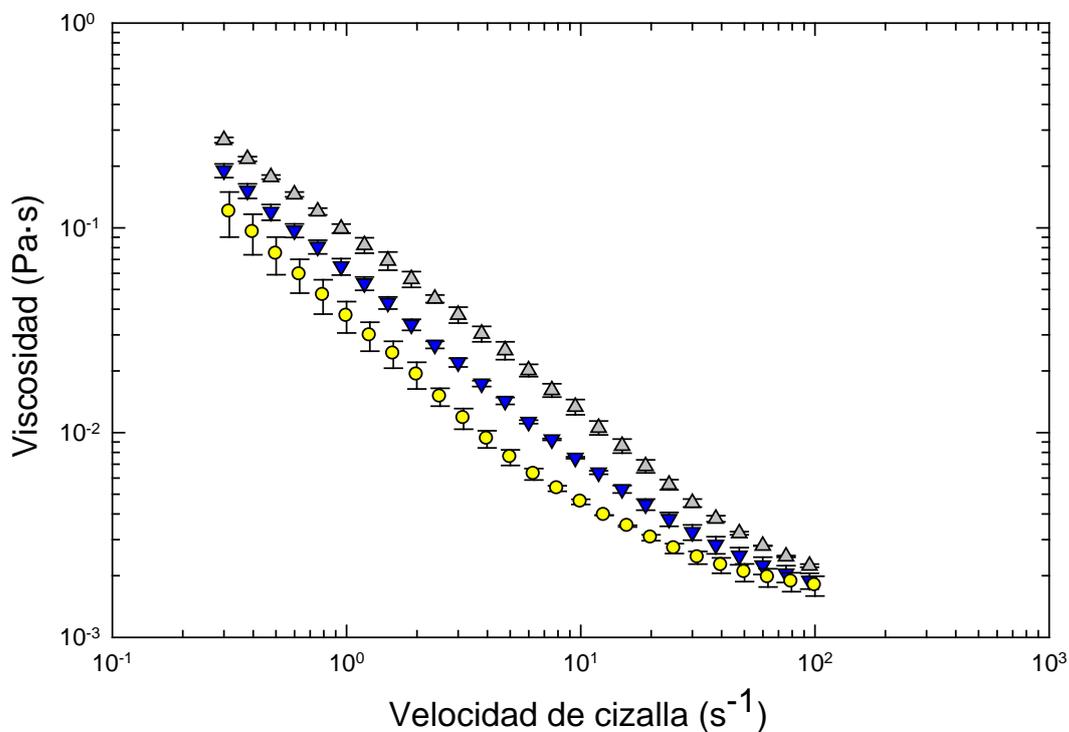


Figura 4.5 Viscosidad en función de la velocidad de cizalla de dispersiones al 0.5% de celulosa de tres especies de nopalito (Δ *O. streptacantha*, \blacktriangledown *O. megacantha* y \bullet *O. ficus-indica*) representantes de un gradiente de domesticación de *Opuntia*. Las barras verticales sobre los símbolos indican el error estándar.

El comportamiento reofluidificante observado en las suspensiones de celulosa coincide con el documentado por otros autores para las microfibrillas de celulosa de diferentes fuentes (Agoda-Tandjawa *et al.*, 2010; Dinand *et al.*, 1999; Yasar *et al.*, 2007), incluyendo la extraída de cáscara de tuna (Habibi *et al.*, 2009). Los derivados de la celulosa, como la celulosa microcristalina, carboximetilcelulosa y metilcelulosa son usados industrialmente (Izydorczyk *et al.*, 2005). Habibi *et al.* (2009) documentaron que las suspensiones de microfibrillas de celulosa (de cáscara de tuna de *O. ficus-indica*) pueden ser considerados geles débiles, similar a la calificación asignada a las suspensiones de microfibrillas con usos industriales. La información anterior y las concentraciones de este polisacárido en los nopalitos (Cuadro 4.2) permiten proponerlos como fuente de celulosa con características adecuadas para su uso industrial, como agentes espesantes, dispersantes y de recubrimiento, el que se complementa con la riqueza de los otros grupos de polisacáridos.

La hipótesis de la presente investigación señala que algunas de las características reológicas se modificaron con el proceso de domesticación de *Opuntia*. Los resultados muestran que en el grado de reofluidéz las especies de los extremos del gradiente de domesticación, *O. streptacantha* y *O. ficus-indica*, mostraron similitud en los mucílagos y pectinas, mientras que en las hemicelulosas débilmente unidas hay una disminución (Figura 4.4). En el grado de consistencia o viscosidad, sólo se observaron diferencias en las hemicelulosas débilmente unidas y celulosa, pero se observa una relación con *O. megacantha* (Figura 4.5). Esto concuerda con lo señalado por otros autores respecto a que *O. ficus-indica* proviene de *O. megacantha* y *O. streptacantha* (Bravo, 1978; Colunga *et al.*, 1986), lo que parece indicar que la fibra soluble (mucílagos, pectinas y hemicelulosas débilmente unidas) es la que sufrió un mayor efecto durante el proceso de domesticación.

Conclusiones

El proceso de domesticación tuvo un efecto en el índice de flujo de cada uno de los constituyentes de la fibra soluble (mucílagos, pectinas y hemicelulosas débilmente unidas) y sobre el coeficiente de consistencia o viscosidad de los mucílagos, las hemicelulosas débilmente unidas y la celulosa. En las hemicelulosas fuertemente unidas, el proceso de domesticación parece no haber tenido efecto. Se sugiere complementar las evaluaciones para corroborar el potencial uso industrial de los polisacáridos estructurales de los nopalitos de *Opuntia* spp.

Literatura citada

- Abraján V., M.A. 2008. Efecto del método de extracción en las características químicas y físicas del mucílago del nopal (*Opuntia ficus-indica*) y estudio de su aplicación como recubrimiento comestible. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España. 212p.
- Agoda-Tandjawa, G.; Durand, S.; Berot, S.; Blassel, C.; Gaillard, C.; Garnier, C.; Doublier, J.-L. 2010. Rheological characterization of microfibrillated cellulose suspensions after freezing. *Carbohydrate Polymers*. 80: 677-686.
- Álvarez A., R.; Peña-Valdivia, C.B. 2009. Structural polysaccharides in xoconostle (*Opuntia matudae*) fruits with different ripening stages. *Journal of the Association Professional of Cactus Development*. 11: 26-44.
- Baker, H.G. 1971. Human influences of plant evolution. *BioScience* 21: 108.
- Bravo H., H. 1978. Las cactáceas de México. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 365 p.
- Calvo A., A.O. 2008. Mapas de preferencia y propiedades reológicas de cuatro cultivares de nopalito (*Opuntia* spp.). Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, estado de México, México. 97p.
- Casas, A.; Caballero, J.; Mapes, C.; Zárate, S. 1997. Manejo de la vegetación, domesticación de plantas y origen de la agricultura en Mesoamérica. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 61: 31-47.
- Casas, A.; Caballero, J.; Valiente B., A.; Soriano, A.; Dávila, P. 1999. Morphological variation and the process of domestication of *Stenocereus stellatus* (Cactaceae) in Central Mexico. *American Journal of Botany*. 86: 522-533.
- Cárdenas, A.; Goycoolea, F.M.; Rinaudo, M. 2008. On the gelling behavior of 'nopal' (*Opuntia ficus-indica*) low methoxil pectin. *Carbohydrate Polymers*. 73: 212-222.
- Cárdenas, A.; Higura-Ciapara, I.; Goycoolea, F.M. 1997. Rheology and aggregation of cactus (*Opuntia ficus-indica*) mucilage in solution. *Journal of the Association Professional of Cactus Development*. 2:152-159.
- Colunga G.M., P.; Hernández X., E.; Castillo M., A. 1986. Variación morfológica, manejo agrícola tradicional y grado de domesticación de *Opuntia* spp. en el Bajío guanajuatense. *Agrociencia*. 65: 7-49.
- Dinand, E.; Chanzy, H.; Vignon, M.R. 1999. Suspensions of cellulose microfibrils from sugar beet pulp. *Food Hydrocolloids*. 13: 275-283.

- Estévez, A.M.; Sáenz, C.; Hurtado, M.L.; Escobar, B.; Espinoza, S.; Suárez, C. 2004. Extraction methods and some physical properties of mesquite (*Prosopis chilensis* (Mol) Stuntz) seed gum. *Journal of Food and Agriculture*. 84: 1487-1492.
- Forni, E.; Penci, M.; Polesello, A. 1994. A preliminary characterization of some pectins from quince fruit (*Cydonia oblonga* Mill.) and prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) peel. *Carbohydrate Polymers*. 23: 231-234.
- García, E. 2004. *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. 5th edition. Instituto de Geografía-UNAM. México, D.F. 90 p.
- García H., E. del R.; Peña V., C.B. 1995. *La pared celular. Componente fundamental de las células vegetales*. Universidad Autónoma Chapingo. 96 p.
- Goycoolea, F.M.; Cárdenas, A. 2003. Pectins from *Opuntia* spp.: a short review. *Journal of the Association Professional of Cactus Development*. 5: 17-29.
- Griffith, M.P. 2004. The origins of an important cactus crop, *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae): new molecular evidence. *American Journal of Botany*. 91: 1915-1921.
- Habibi, Y.; Mahrouz, M.; Vignon, M.R. 2009. Microfibrillated cellulose from the peel of prickly pear fruits. *Food Chemistry*. 115: 423-429.
- Ibars, A.; Barbosa-Cánovas, G. 2003. *Unit operations in food engineering*. CRC Press. Florida. USA. 873p.
- Iglesias, M.T.; Lozano, J.E. 2004. Extraction and characterization of sunflower pectin. *Journal of Food Engineering*. 62: 215-223.
- Izydorczyk, M.; Cui, S.W.; Wang, Q. 2005. Polysaccharide gums: structures, functions, properties, and applications. En: Cui, S.W. (Ed.). *Food carbohydrates: chemistry, physical, properties, and applications*. Taylor & Francis Group. Florida, USA. Pp. 263-308.
- Koocheki, A.; Mortazavi, S.A.; Shahidi, F.; Razavi, S.M.A.; Taherian, A.R. 2009. Rheological properties of mucilage extracted from *Alyssum homolocarpum* seed as a new source of thickening agent. *Journal of Food Engineering*. 91: 490-496.
- Löofgren, C.; Hermanson, A.M. 2007. Synergistic rheological behavior of mixed HM/LM pectin gels. *Food Hydrocolloids*. 21: 480-486.
- López-Palacios, C.; Reyes-Agüero, J.A.; Ramírez-Tobías, H.M.; Juárez-Flores, B.I.; Aguirre-Rivera, J.R.; Yañez-Espinosa, L.; Ruíz-Cabrera, M.A. 2010. Evaluation of attributes associated with the quality of nopalito (*Opuntia* spp. and *Nopalea* sp.). *Italian Journal of Food Science*. 22: 423-431.

- Lozada C., M.A. 2007. Extracción y caracterización reológica de polisacáridos tipo pectina de la cáscara de tuna (*Opuntia* spp.). Tesis Profesional. Instituto de Ciencias Agropecuarias. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 88p.
- Lutz, R.; Aserin, A.; Wicker, L.; Garti, N. 2009. Structure and physical properties of pectins with block-wise distribution of carboxylic acid groups. *Food Hydrocolloids*. 23: 786-794.
- Majdoub, H.; Roudesli, S.; Picton, L.; Le-Cerf, D.; Muller, G.; Grisel, M. 2001. Prickly pear nopals pectin from *Opuntia ficus-indica* physic-chemical study and semi-dilute solutions. *Carbohydrate Polymers*. 46: 69-79.
- Marcotte, M.; Hoshahili, A.R.T.; Ramaswamy, H.S. 2001. Rheological properties of selected hydrocolloids as a function of concentration and temperature. *Food Research International*. 34: 695-703.
- May, C.D. 1990. Industrial pectins: sources, production and applications. *Carbohydrate Polymers*. 12: 79-99.
- Medina-Torres, L.; Brito-De la Fuente, E.; Torrestiana-Sanchez, B.; Katthain, R. 2000. Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus-indica*). *Food Hydrocolloids*. 14: 417-424.
- Medina-Torres, L.; Brito-De la Fuente, E.; Torrestiana-Sanchez, B.; Alonso, S. 2003. Mechanical properties of gels formed by mixtures of mucilage gum (*Opuntia ficus-indica*) and carrageenans. *Carbohydrate polymers*. 52: 143-150.
- Mesbahi, G.; Jamalian, J.; Farahnaky, A. 2005. A comparative study on functional properties of beet and citrus pectins in food systems. *Food Hydrocolloids*. 19: 731-738.
- Methacanon, P.; Chaikumpollert, O.; Thavorniti, P.; Suchiva, K. 2003. Hemicellulosic polymer from *Vetiver grass* and its physicochemical properties. *Carbohydrate Polymers*. 54: 335-342.
- Ndjoyenkeu, R.; Goycoolea, F.M; Morris, E.R.; Akingbala, J.O. 1996. Rheology of okra (*Hibiscus esculentus* L.) and dika nut (*Irvingia gabonensis*) polysaccharides. *Carbohydrate Polymers*. 29: 263-269.
- Nobel, P.S.; Cavelier, J.; Andrade, J.L. 1992. Mucilage in cacti: its apoplastic capacitance, associated solutes, and influence on tissue water relations. *Journal of Experimental Botany*. 43: 641-648.
- Peña-Valdivia, C.B.; Sánchez-Urdaneta, A. 2004. Polisacáridos de nopalito y tuna (*Opuntia* spp.) En: Flores, V. C. (Ed.). Memoria del X Congreso Nacional y VII Internacional, sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal y del Fifth International

- Congress on Cactus Pear and Cochineal. Universidad Autónoma Chapingo, Food and Agriculture Organization e International Society for Horticultural Science. Chapingo, México. Edición en CD.
- Peña-Valdivia, C. B.; Sánchez-Urdaneta, B.A.; Trejo-López, C.; Arroyo-Peña, V.B. 2010. Structural polysaccharides and dietary fiber assortment in nopalito and cactus fruit (*Opuntia* spp.). En proceso de publicación.
- Perales R., H.R.; Aguirre R., J.R. 2008. Biodiversidad humanizada. En: Capital natural de México. Vol. 1: Conocimiento actual de la biodiversidad. Conabio, México. pp. 565-603.
- Ramírez-Tobías, H.M.; Reyes-Agüero, J.A.; Pinos-Rodríguez, J.M.; Aguirre-Rivera, J.R. 2007. Efecto de la especie y madurez sobre el contenido de nutrientes de cladodios de nopal. *Agrociencia*. 41: 619-626.
- Rascón-Chu, A.; Martínez-López, A.L.; Carvajal-Millán, E.; Ponce de León-Renova, N.E.; Márquez-Escalante, J.A.; Romo-Chacón, A. 2009. Pectin from low quality 'Golden Delicious' apples: composition and gelling capability. *Food Chemistry*. 116: 101-103.
- Razo M., Y.; Sánchez H., M. 2002. Acidez de 10 variantes de nopalito (*Opuntia* spp.) y su efecto en las propiedades químicas y sensoriales. Tesis de Licenciatura. Departamento de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Autónoma Chapingo. México. 104 p.
- Reyes-Agüero, J.A.; Aguirre-Rivera, J.R.; Flores-Flores, J.L. 2005. Variación morfológica de *Opuntia* (Cactaceae) en relación con su domesticación en la Altiplanicie Meridional de México. *Interciencia*. 30: 476-484.
- Reyes-Agüero, J.A.; Aguirre-Rivera, J.R.; Carlín-Castelán, F.; González-Durán, A. 2009. Catálogo de las principales variantes silvestres y cultivadas de *Opuntia* en la Altiplanicie Meridional de México. UASLP, SAGARPA y CONACYT. San Luis Potosí, S.L.P. México. 350p.
- Sáenz, C.; Sepúlveda, E.; Matsuhira, B. 2004. *Opuntia* spp. mucilage's; a functional component with industrial perspectives. *Journal of Arid Environments*. 57:275-290.
- SAS, 1999-2000. SAS user's guide: Statistics. Versión 6. SAS Institute Inc. Cary, NC. EU. 1290 p.
- Sozen, N.; Kokini, J.L. 2008. Rheological instruments in food analysis. En: Ötles, S. (Ed.). Handbook of food analysis instruments. CRC Press. Florida, USA. pp. 461-495.
- Steffe, J.F. 1996. Rheological process in food process engineering. Freeman Press. United States of America. 418p.

- Trachtenberg, S.; Fahn, A. 1981. The mucilage of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.-development, ultrastructure, and mucilage secretion. *Botanical Gazette*. 142: 206-213.
- Trachtenberg, S.; Mayer, A.M. 1981. Composition and properties of *Opuntia ficus-indica* mucilage. *Phytochemistry*. 20: 2665-2668.
- Trachtenberg, S.; Mayer, A.M. 1982. Biophysical properties of *Opuntia ficus-indica* mucilage. *Phytochemistry*. 21: 2835-2843.
- Wang, Q.; Cui, S.W. 2005. Understanding the physical properties of food polysaccharides. En: Cui, S.W. (Ed.). *Food Carbohydrates: chemistry, physical properties, and applications*. Taylor & Francis Group. Florida, USA. Pp. 161-218.
- Yasar, F.; Togrul, H.; Arslan, N. 2007. Flow properties of cellulose and carboxymethyl of orange peel. *Journal of Food Engineering*. 81: 187-199.

Capítulo V. Discusión general

Reyes-Agüero *et al.* (2005), establecieron un gradiente de domesticación de las especies de *Opuntia* de la Altiplanicie Meridional de México; dicho gradiente está representado por *O. streptacantha*, *O. hyptiacantha*, *O. megacantha*, *O. albicarpa* y *O. ficus-indica*; la primera especie es la silvestre y la última la domesticada. En la presente investigación se demostró que los nopalitos de cinco especies conservaron nueve de sus características morfológicas inherentes (Figuras 3.1 y Cuadro 3.1). En ese gradiente también se estudió cada uno de los polisacáridos estructurales integrantes de la fibra alimentaria. Los polisacáridos mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las especies de los extremos del gradiente de domesticación, con excepción de la celulosa que se mantuvo constante durante el proceso (Cuadro 3.5). Cabe destacar que el grupo de mucílagos fue el único grupo de polisacáridos en los que se observó una concentración mayor en *O. ficus-indica* en comparación con *O. streptacantha*, especie clasificada como silvestre, lo que coincidió con lo documentado por García *et al.* (2010). Al parecer la mayor o menor presencia de mucílago es un indicador de la resistencia de la planta a ciertas condiciones ambientales (García *et al.*, 2010; Golstein y Nobel, 1994) y su concentración es resultado de la presión de selección en individuos que presentan una mayor tolerancia a los ambientes creados por el hombre (Casas *et al.*, 1999), lo que da por resultado una mayor variabilidad en las especies (Colunga *et al.*, 1986). Sin embargo, a pesar del mayor contenido de mucílago en la especie domesticada, los análisis de reología muestran una consistencia (o viscosidad) mayor; esto puede relacionarse con el rol fisiológico que pueden tener este tipo de polisacáridos en la planta. Al respecto, Trachtemberg y Mayer (1982) observaron una viscosidad mayor en mucílagos disueltos en agua con respecto a las que tuvieron como solvente un buffer con un pH similar al que presenta la planta. Los mismos autores mencionan que el alto contenido de iones Ca^{2+} funciona como un amortiguador para evitar un incremento significativo en la viscosidad del mucílago y que estos cambios de viscosidad son importantes en plantas con metabolismo ácido de las crasuláceas para la retención del agua.

Se ha documentado que la domesticación tiene un efecto directo en el o los órganos con interés antropocéntrico de la planta y se manifiesta en las características morfológicas (Baker, 1971; Casas *et al.*, 1999 y 1996; Ladizinsky, 1987; Reyes-Agüero *et al.*, 2005); sin embargo, también se ha demostrado que existe un efecto sobre los componentes químico, nutrimentales y fisiológicos en los diferentes órganos de la planta (Mondolot *et al.*, 2008; Sotelo *et al.*, 1995). Al respecto, Galindo (2006) encontró que en frijol (*Phaseolus vulgaris*),

durante el proceso de domesticación de ésta leguminosa, se mantuvo el contenido de proteína y se incrementó el de almidón, con lo que concluyó que los humanos buscaron un alimento con mayor energía sin preocuparse por la pérdida de proteína que implicaban los cambios morfológicos. Algo similar fue reconocido por Harlan (1992) en trigo (*Triticum* spp.).

Con respecto al contenido de fibras (alimentaria soluble, insoluble y total) (Figura 3.5 y Cuadro 3.6), en la total, al parecer, la domesticación tuvo el efecto de disminuir su contenido. Así, *O. streptacantha* presentó la mayor cantidad de fibra alimentaria total con respecto a las otras cuatro especies. Lo que sugiere que durante el proceso de domesticación se seleccionó en un principio a *O. streptacantha* debido a las propiedades nutrimentales que se percibían al consumir sus nopalitos. El análisis multivariable de componentes principales demostró que el mucílago y la fibra soluble definieron el CP1; además, también definieron a los CP2 y CP3 junto a las hemicelulosas débilmente unidas y el contenido de fibra insoluble (Cuadro 3.7); lo que fue interpretado como un hecho que las características de estos compuestos influyeron en la selección artificial. Esto concuerda con López-Palacios *et al.* (2010), quienes señalan que la preferencia de los consumidores hacia nopalitos de algunas especies y variantes está influida por el conjunto de atributos físicos y fisiológicos percibidos a través de los sentidos. Además, el recolector pudo haber seleccionado aquellas plantas que le proveyeron ciertos beneficios nutrimentales como fue el caso del contenido de fibra (Galindo, 2006; Harlan, 1992).

Tradicionalmente se ha mencionado que la abundancia de mucílago (o baba) determina la selección, aceptación y comercialización del nopalito por parte del consumidor: a menor cantidad, mayor aceptación (Razo y Sánchez, 2002); sin embargo, lo mostrado en este estudio indica que *O. ficus-indica*, la especie con mayor aceptación y amplia distribución (Griffith, 2004), es abundante en polisacáridos de este tipo y pobre en los otros componentes de la fibra soluble (Cuadro 3.5). Lo anterior permite suponer que hay otras características inherentes de cada grupo de polisacáridos que pudieron influir en la aceptación, por lo cual se llevó a cabo la caracterización reológica de cada grupo de polisacáridos de tres especies (*O. ficus-indica*, *O. megacantha* y *O. streptacantha*).

Los reogramas obtenidos mostraron un comportamiento similar en las curvas de flujo de las especies estudiadas (Figuras 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5); además, el índice de flujo no mostró diferencias significativas ($p > 0.05$) en los constituyentes de la fibra insoluble, mientras que entre los componentes de fibra soluble sí hubo un efecto (Cuadro 4.3). En el coeficiente de consistencia se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en los mucílagos, las hemicelulosas débilmente unidas y la celulosa (Cuadro 4.4). Es de destacar el

comportamiento parecido entre los mucílago y las hemicelulosas débilmente unidas, además del contraste entre las especies consideradas como la más silvestre (*O. streptacantha*) y la más domesticada (*O. ficus-indica*).

La hipótesis de este trabajo fue que los grupos de polisacáridos muestran un gradiente de concentración, y sus propiedades reológicas son modificadas, en función inversa al gradiente de domesticación de *Opuntia* spp. Este supuesto se planteó en el hecho de que en especies domesticadas como frijol, maíz, trigo y yuca (*Manihot* sp.), entre otras, se ha encontrado que no solo hay una modificación morfológica del órgano de interés, sino que también el proceso de humanización buscó modificar algunas características fisicoquímicas y nutrimentales (Galindo, 2006; Harlan, 1992; Mondolot *et al.*, 2008; Sótelo *et al.*, 1995). Al respecto, los resultados obtenidos en esta investigación comprueban que existe un gradiente en *Opuntia* basado en los componentes de fibra soluble (mucílago, pectinas y hemicelulosas débilmente unidas) y que en la representación gráfica del análisis multivariable de componentes principales (Figura 3.6) se muestra el gradiente de domesticación basado en la proporción y diversidad de polisacáridos estructurales de los nopalitos y la fibra alimentaria, pues la especie menos humanizada o más silvestres (*O. streptacantha*) y la de mayor grado de domesticación (*O. ficus-indica*) rodean a *O. albicarpa*, *O. hyptiacantha* y *O. megacantha* con niveles intermedios de domesticación, de acuerdo con Reyes-Agüero *et al.* (2005). En tanto el comportamiento reológico que muestran los componentes de fibra soluble de *O. ficus-indica* sugieren que estas características pudieron influir en la mayor aceptación de la especie ya que la mayor consistencia o viscosidad del mucílago, pero a la vez, la menor resistencia al flujo, manifiestan un compuesto con una posible mayor facilidad de eliminarlo durante el proceso de cocción. Además, el contenido y la caracterización reológica de cada grupo de polisacáridos muestran un potencial uso industrial de estas especies, sin embargo aun falta realizar estudios más detallados que permitan descubrir sus adecuados usos.

Literatura citada

- Casas, A.; Caballero, J.; Mapes, C.; Zárata, S. 1996. Manejo de la vegetación, domesticación de plantas y origen de la agricultura en Mesoamérica. Boletín de la Sociedad Botánica de México. 61: 31-47.
- Casas, A.; Caballero, J.; Valiente B., A.; Soriano, A.; Dávila, P. 1999. Morphological variation and the process of domestication os *Stenocereus stellatus* (Cactaceae) in Central Mexico. American Journal of Botany. 86: 522-533.

- Colunga G-M., P.; Hernández X., E.; Castillo M., A. 1986. Variación morfológica, manejo agrícola tradicional y grado de domesticación de *Opuntia* spp. en el Bajío guanajuatense. *Agrociencia*. 65: 7-49.
- Galindo Z., M.V. 2006. Cambios ocurridos en las semillas de frijol común bajo domesticación. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. 88p.
- García R., M.T.; Peña-Valdivia, C.B.; Trejo-López, C. 2010. The effects of soil water potential and cultivar on structural polysaccharides of “nopalitos” (*Opuntia* spp.). En proceso de publicación.
- Griffith, M.P. 2004. The origins of an important cactus crop, *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae): new molecular evidence. *American Journal of Botany*. 91: 1915-1921.
- Goldstein, G.; Nobel, P.S. 1991. Changes in osmotic pressure and mucilage during low-temperature acclimation of *Opuntia ficus-indica*. *Plant Physiology*. 97: 954-961
- Harlan, J. R. 1992. *Crops and Man*. 2nd ed. American Society of Agronomy and Crop Science Society of America. Madison, USA. 284 p.
- Ladizinsky, G. 1987. Pulse domestication before cultivation. *Economic Botany*. 41: 60-65
- López-Palacios, C.; Reyes-Agüero, J.A.; Ramírez-Tobías, H.M.; Juárez-Flores, B.I.; Aguirre-Rivera, J.R.; Yañez-Espinosa, L.; Ruíz-Cabrera, M.A. 2010. Evaluation of attributes associated with the quality of nopalito (*Opuntia* spp. and *Nopalea* sp.). *Italian Journal of Food Science*. 22: 423-431.
- Mondolot, L.; Marlas, A.; Barbeau, D.; Gargadennet, A.; Pujol, B.; McKey, D. 2008. Domestication and defense: foliar tannins and C/N ratios in cassava and a close wild relative. *Acta Oecologica*. 34: 147-154.
- Razo M., Y.; Sánchez H., M. 2002. Acidez de 10 variantes de nopalito (*Opuntia* spp.) y su efecto en las propiedades químicas y sensoriales. Tesis de Licenciatura. Departamento de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Autónoma Chapingo. México. 104 p.
- Reyes-Agüero, J.A.; Aguirre-Rivera, J.A.; Flores-Flores, J.A. 2005. Variación morfológica de *Opuntia* (Cactaceae) en relación con su domesticación en la Altiplanicie Meridional de México. *Interciencia*. 30: 476-484.
- Trachtenberg, S.; Mayer, A.M. 1982. Biophysical properties of *Opuntia ficus-indica* mucilage. *Phytochemistry*. 21: 2835-2843.
- Sótelo, A.; Souza, H.; Sánchez, M. 1995. Comparative study of the chemical composition of wild and cultivated beans (*Phaseolus vulgaris*). *Plant Foods for Human Nutrition*. 47: 93-100.

Capítulo VI. Conclusiones generales

- El proceso de domesticación de *Opuntia* tuvo un efecto significativo sobre los polisacáridos que componen la pared celular, a excepción de la celulosa que no mostró alguna tendencia entre las especies evaluadas.
- La mayor concentración de mucílagos en *O. ficus-indica* puede ser un indicador de los diversos ambientes a los que esta adaptada esta especie.
- Los nopalitos de las variantes de *O. streptacantha*, especie menos domesticada, tuvieron una mayor concentración de fibra alimentaria total con respecto a los de *O. albicarpa*, *O. ficus-indica*, *O. hyptiacantha* y *O. megacantha*.
- Es posible obtener un gradiente de domesticación en *Opuntia* con base en la composición de los polisacáridos estructurares, particularmente con los constituyentes de la fibra soluble, aunque hace falta incluir más variantes y especies que puedan aportar un mayor conocimiento acerca del proceso que siguieron estos componentes.
- El comportamiento de flujo de las soluciones de polisacáridos no mostró diferencias estadísticas ($p > 0.05$) entre especies; sin embargo, para los parámetros de índice de flujo y coeficiente de consistencia si se observaron diferencias, a excepción de las hemicelulosas fuertemente unidas.
- Los mucílagos y las hemicelulosas débilmente unidas presentaron un comportamiento reológico contrastante entre las especies de los extremos del gradiente, ya que en el caso de *O. ficus-indica*, tuvo una mayor concentración y a la vez se comportó como un compuesto con mayor consistencia y menor reo-fluidez con respecto a *O. streptacantha*, su contraparte más silvestre.
- El comportamiento reológico de los polisacáridos que constituyen la fibra alimentaria soluble puede haber sido parte del proceso de selección humana durante la domesticación.
- Por la concentración de polisacáridos estructurales que presentan los nopalitos del género *Opuntia* y en base a su comportamiento reológico, similar al de los derivados de otras fuentes, existe un gran potencial para estos componentes celulares, aunque serán necesarios nuevos trabajos que caractericen más completamente cada compuesto y permitan sugerir un uso para cada uno de ellos.