

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Departamento de Tecnología de Alimentos



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

Presentada por:

Myrna Alicia Abraján Villaseñor

Dirigida por:

Amparo Chiralt Boix

Nuria Martínez Navarrete

Valencia, 2008



LA DRA. AMPARO CHIRALT BOIX, CATEDRÁTICA DE UNIVERSIDAD DEL DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS, Y LA DRA. NURIA MARTÍNEZ NAVARRETE, CATEDRÁTICA DE UNIVERSIDAD DEL MISMO DEPARTAMENTO,

CONSIDERAN: que la memoria titulada **EFFECTO DEL MÉTODO DE EXTRACCIÓN EN LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y FÍSICAS DE MUCÍLAGO DE NOPAL (*OPUNTIA FICUS-INDICA*) Y ESTUDIO DE SU APLICACIÓN COMO RECUBRIMIENTO COMESTIBLE**, que presenta Dña. Myrna Alicia Abraján Villaseñor para aspirar al grado de Doctora por la Universidad Politécnica de Valencia, y que ha sido realizada bajo nuestra dirección en el Departamento de Tecnología de Alimentos de la Universidad Politécnica de Valencia, reúne las condiciones adecuadas para constituir su tesis doctoral, por lo que **AUTORIZAN** a la interesada su presentación.

Valencia a 8 de Noviembre de 2008

Fdo.: Amparo Chiralt Boix
Directora de la tesis

Fdo.: Nuria Martínez Navarrete
Directora de la tesis

Dedico este trabajo a:

A toda mi familia

A mi padre aunque ausente físicamente siempre guiándome con los recuerdos que guardo de él.

Y muy especialmente a mi mamá por su apoyo incondicional, paciencia y su esmero por facilitarme el camino para alcanzar esta meta en mi vida profesional.

Agradezco a:

A mis directoras de tesis por compartir sus conocimientos y experiencia para el buen desarrollo de este trabajo.

A todos mis compañeros de trabajo por su apoyo y colaboración durante la realización del trabajo experimental.

A todos los profesores y personal del Departamento de Tecnología de Alimentos de la UPV que contribuyeron en esta etapa de mi formación como investigadora.

A todos los compañeros de estudios por compartir conmigo no solamente sus conocimientos y consejos sino sobre todo su amistad incondicional.

A todas las personas que me brindaron su ayuda durante mis estancias en Valencia.

Perdón por no personalizar mis agradecimientos pero la lista es muy larga y los que me conocen bien saben lo difícil que es para mí expresar estos sentimientos.

MUCHAS GRACIAS A TODOS

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo optimizar el método de extracción del mucílago del nopal (*Opuntia ficus-indica* var. Forrajera) y estudiar su potencial utilización como formador de recubrimientos comestibles. Como tal, se ha aplicado en un producto vegetal cortado: la jícama.

Para cubrir este objetivo se ha realizado una caracterización del mucílago extraído por diferentes procedimientos, que ha puesto de manifiesto la influencia de dicho método en las características químicas (macro y microcomponentes) y físicas (comportamiento reológico, color, solubilidad) de los extractos. El procedimiento que incluye el escaldado de la penca pelada y molida fue el que dio un producto con mejores características para su uso como recubrimiento, por presentar mayor poder espesante (mayor peso molecular promedio), por ser su solubilidad menos sensible al pH y presentar mejor color.

El mucílago extraído por el procedimiento seleccionado se caracterizó en cuanto a su interacción con el agua mediante la obtención de la isoterma de sorción y la relación temperatura de transición vítrea-humedad. Además, se estudió su capacidad formadora de films evaluando las propiedades de barrera al vapor de agua, solubilidad, las propiedades mecánicas y las propiedades ópticas (color, translucidez y brillo) a tres humedades de equilibrio diferentes. Así mismo, se evaluó el efecto de la adición de lípidos (ácido oleico o esteárico) en diferente proporción en las propiedades anteriores. Los resultados obtenidos mostraron que el ácido oleico permite obtener films con mejores propiedades mecánicas y de barrera al vapor de agua, aunque imparte una cierta tonalidad amarillenta al film.

Las formulaciones con ácido oleico fueron evaluadas como recubrimientos en cubos de jícama. Ninguna formulación supuso una reducción de la pérdida de agua del producto durante su almacenamiento a 4 °C y 85 % de humedad relativa, pero si se evitó la pérdida de firmeza.

ABSTRACT

The aim of this work was to optimize the method of extracting the Nopal (*Opuntia ficus-indica* var. *Forragera*) mucilage and to study its potential use in the formation of edible films. As such, it has been applied to a fresh cut vegetable: jícama.

To this end, the mucilage has been extracted by different processes and each extract has been characterized. Differences have been found in the chemical (macro and micro components) and physical (rheological behaviour, colour and solubility) properties of the extracts. The process that includes blanching of the peeled and ground stems was the one that gave the extract with the best properties for its use as film, due to the fact that it showed the greatest thickening capacity (greatest mean molecular weight), the least pH sensitive solubility and had the best colour.

The mucilage extracted using the selected process was characterised as to water interactions through the water sorption isotherms and the glass transition temperature-moisture content relationships. Its capacity as a film forming product was studied through the evaluation of the water barrier properties, film solubility and mechanical and optical (gloss, translucency and colour) properties; all of these in film samples equilibrated at three different moisture contents. Likewise, the influence of incorporating different ratios of lipids (oleic or stearic acids) in the film was evaluated, through the changes induced in the above mentioned properties. Results showed that oleic acid allows us to obtain films with better mechanical and water barrier properties, but it imparts yellowness to the film.

The coating capacity of film formulations containing oleic acid were evaluated in jicama cubes. None of the formulations supposed a reduction of the product water loss during its storage at 4°C and 85% relative humidity, although loss of product firmness was inhibited.

RESUM

El present treball té com a objectiu optimitzar el mètode d'extracció del mucíl·lag de la figuera de pala (*Opuntia ficus-indica* var. Farratgera) i estudiar la seua potencial utilització com a formador de recobriments comestibles. Com a tal, s'ha aplicat en un producte vegetal tallat: la jicama.

Per a cobrir este objectiu s'ha realitzat una caracterització del mucíl·lag extret per diferents procediments, que ha posat de manifest la influència de tal mètode en les característiques químiques (macro i microcomponents) i físiques (comportament reològic, color, solubilitat) dels extractes. El procediment que inclou l'escaldat de la penca pelada i mòlta va ser el que va donar un producte amb millors característiques per al seu ús com a recobriment, per presentar major poder espessixen-te (major pes molecular mitjana), per ser la seua solubilitat menys sensible al pH i presentar millor color.

El mucíl·lag extret pel procediment seleccionat es va caracteritzar quant a la seua interacció amb l'aigua per mitjà de l'obtenció de la isoterma de sorció i la relació temperatura de transició vítria-humitat. A més, es va estudiar la seua capacitat formadora de films avaluant les propietats de barrera al vapor d'aigua, solubilitat, les propietats mecàniques i les propietats òptiques (color, translucidesa i brillantor) a tres humitats d'equilibri diferents. Així mateix, es va avaluar l'efecte de l'addició de lípids (àcid oleic o esteàric) en diferent proporció en les propietats anteriors. Els resultats obtinguts van mostrar que l'àcid oleic permet obtenir films amb millors propietats mecàniques i de barrera al vapor d'aigua, encara que impartix una certa tonalitat groguenca al film.

Les formulacions amb àcid oleic van ser avaluades com a recobriments en poals de jicama. Cap formulació va suposar una reducció de la pèrdua d'aigua del producte durant el seu emmagatzemament a 4 °C i 85 % d'humitat relativa, però sí es va evitar la perduda de fermesa.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

I. Introducción

1.1. El nopal	
1.1.1. Generalidades	3
1.1.2. Composición química general	10
1.1.3. Usos del nopal	12
1.1.4. Propiedades funcionales del nopal	18
1.1.5. El mucílago del nopal	23
1.2. Films y recubrimientos comestibles	
1.2.1. Generalidades	31
1.2.2. Componentes y métodos de obtención de films y recubrimientos	36
1.2.3. Ensayos de evaluación de films y recubrimientos comestibles	43
1.2.4. Aplicaciones de recubrimientos	49
1.2.5. Interés del presente estudio	53

II. Objetivos y plan de trabajo

2.1. Objetivos generales	61
2.2. Objetivos específicos	61
2.3. Plan de trabajo	
Hipótesis del trabajo	62
Plan de trabajo	63

III. Extracción y caracterización del mucílago del nopal

3.1. Materiales y métodos	
3.1.1. Métodos de extracción	69
3.1.2. Caracterización química de los mucílagos	72
3.1.2.1. Macrocomponentes	73
3.1.2.2. Minerales	73
3.1.2.3. Composición de azúcares y peso molecular	74
3.1.2.4. Determinación de pectinas	75
3.1.2.5. Polifenoles totales y actividad antioxidante	76
3.1.3. Características físicas	
3.1.3.1. Color	78

3.1.3.2. Comportamiento reológico	
3.1.3.2.1. Viscosidad intrínseca	78
3.1.3.2.2. Comportamiento al flujo	80
3.1.3.3. Isotherma de sorción	82
3.1.3.4. Determinación de la temperatura de transición vítrea	84
3.2. Resultados y Discusión	
3.2.1. Extracción	85
3.2.2. Características químicas	86
3.2.3. Características físicas	
3.2.3.1. Color	93
3.2.3.2. Propiedades reológicas	
3.2.3.2.1. Viscosidad intrínseca	95
3.2.3.2.2. Comportamiento al flujo	100
3.2.3.3. Isotherma de sorción y temperatura de transición de fase	115
IV. Diseño y caracterización de los films	
4.1. Materiales y métodos	
4.1.1. Diseño y preparación de las dispersiones formadoras de films (DFF)	131
4.1.2. Caracterización de los films	
4.1.2.1. Medición del espesor	133
4.1.2.2. Propiedades mecánicas	133
4.1.2.3. Permeabilidad al vapor de agua	134
4.1.2.4. Solubilidad en agua	136
4.1.2.5. Propiedades ópticas	
4.1.2.5.1. Color	137
4.1.2.5.2. Brillo	139
4.1.3. Aplicación de recubrimientos en cubos de jícama	
4.1.3.1. Materia prima	140
4.1.3.2. Obtención de las formulaciones formadoras de recubrimientos (FFR) y su aplicación	140
4.1.3.3. Evaluación de la pérdida de calidad durante el almacenamiento	
4.1.3.3.1. Pérdida de peso	142

4.1.3.3.2. Firmeza	142
4.1.3.3.3. Color	142
4.2. Resultados y discusión	
4.2.1. Propiedades mecánicas de los films	142
4.2.2. Permeabilidad al vapor de agua de los films	154
4.2.3. Solubilidad en agua de los films	160
4.2.4. Propiedades ópticas de los films	163
4.2.5. Aplicación de recubrimientos en cubos de jícama	175
V. Conclusiones y recomendaciones	187
VI. Bibliografía	195

INDICE DE ECUACIONES

I.1. $J = -D \frac{dC}{dX}$	45
I.2. $C = S \times P$	45
I.3. <i>Permeabilidad</i> $= J \frac{dX}{dP}$	45
I.4. <i>Resistencia</i> $= W_t - \frac{W_a}{J}$	46
I.5. $a_w = \frac{p}{p_0} = \frac{\%HR}{100}$	46
III.1. $h_{ab}^* = \arctg \frac{b^*}{a^*}$	78
III.2. $C_{ab}^* = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})}$	78
III.3. $\Delta E = \sqrt{(\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})}$	78
III.4. $\eta_{rel} = \frac{S \times P}{v_a \times P_a}$	79
III.5. $\eta_{sp} = \eta_{rel} - 1$	79
III.6. $\eta_{inh} = \frac{\ln \eta_{rel}}{C}$	79
III.7. $\eta_{red} = \frac{\eta_{rel}}{C}$	79
III.8. $\eta_{red} = [\eta] + K_H [\eta]^2 C$	80
III.9. $\eta_{inh} = [\eta] + K_H [\eta]^2 C$	80

III.10.	$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1}$	81
III.11.	$\eta = A \exp\left[\frac{E_a}{RT}\right]$	81
III.12.	$\eta = a \times C^b$	82
III.13.	$\eta = a \exp(b \times C)$	82
III.14.	$\eta = \alpha C^\beta \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)$	82
III.15.	$W_e = \frac{W_p \times C \times \alpha_W}{(1-K \times \alpha_W)(1+(C-1) \times K \times \alpha_W)}$	83
III.16.	$W_e = \frac{W_p C \alpha_W}{(1-\alpha_W)(1+(C-1)\alpha_W)}$	83
III.17.	$T_g = \frac{x_W T_{gW} + k_{GT} x_s T_{gs}}{x_s + k_{GT} x_W}$	84
III.18.	$T_g = k \left[\frac{x_W(T_{gW} - T_g)}{x_s} \right] + T_{gs}$	124
IV.1.	$T = F \frac{L_0 - L_t}{A_0 L_0} T F = F \frac{L_0 - L_t}{A_0 L_0}$	134
IV.2.	$s_H = \ln L_0 + \frac{L_t}{L_0}$	134
IV.3.	$VTVA = \frac{L}{A}$	135
IV.4.	$PVA = \frac{VTVA}{R_{w1} - R_{w2}} L$	135
IV.5.	$P_{w1} = P_c - (P_c - P_{w0}) e^{-N W c \frac{h_t}{D}}$	136
IV.6.	$N_w = 6,43 \times 10^{-11} VTVA$	136
IV.7.	$c = \frac{P_c}{RT}$	136

-
- IV.8. $D = 0,26 \frac{T^{1,8}}{296}$ 136
- IV.9. $\frac{K}{S} = \frac{(1-R_{\infty})^2}{2R_{\infty}}$ 138
- IV.10. $R_{\infty} = a-b \frac{K}{S} = \frac{(1-R_{\infty})^2}{2R_{\infty}}$ 138
- IV.11. $\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{R_0 - R + R_g}{R_0 R_g} \right) R_{\infty} = \alpha - (\alpha^2 - 1)^{1/2}$ 138
- IV.12. $b = (\alpha^2 - 1)^{1/2} \alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{R_0 - R + R_g}{R_0 R_g} \right)$ 138
- IV.13. $T_i = ((\alpha - R_0)^2 - b^2)$ 138
- IV.14. $IB = 100[(100 - L^*)^2 + \alpha^{*2} + b^{*2}]^{1/2}$ 139
- IV.15. $DSS = M_{FA} \frac{S_g}{A}$ 141

INDICE DE FIGURAS

Figura I.1. Planta de nopal	5
Figura I.2. Jícama. Vista externa e interna	56
Figura III.1. Diagrama de bloques de los diferentes procesos de extracción de mucílago de nopal utilizados en el estudio.	70
Figura. III. 2. Valores de η_{red} (izquierda, ajuste de Huggins) y valores de η_{inh} (derecha, ajuste de Kraemer) vs C para los diferentes mucílagos.	97
Figura III.3. Curvas de flujo para el mucílago escaldado a diferentes concentraciones (g/100g s.s.) a 25°C. Puntos experimentales y modelo de Ostwald-de-Waele ajustado.	101
Figura III.4. Curvas de flujo para el mucílago escaldado a diferentes temperaturas a una concentración de 5 g/100g s.s. Puntos experimentales y modelo de Ostwald-de-Waele ajustado.	101
Figura III.5. Linealización de los datos experimentales esfuerzo de corte-gradiente de velocidad para el ajuste de la ley de potencia. Datos correspondientes al mucílago ESC a diferentes concentraciones a 25°C.	102
Figura III.6. Linealización de los datos experimentales esfuerzo de corte-gradiente de velocidad para el ajuste de la ley de potencia. Datos correspondientes al mucílago ESC, a una concentración del 5 %, a diferentes temperaturas.	102
Figura III.7. Comportamiento potencial de los mucílagos ESC, ENT y DEC y comportamiento exponencial del COC a 25°C. Izquierda a 1s ⁻¹ y derecha a 100 s ⁻¹ .	106
Figura III.8. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad de las soluciones del mucílago ESC a diferentes concentraciones. Izquierda a 1 s ⁻¹ y derecha a 100 s ⁻¹ .	107
Figura III.9. Variación de la viscosidad aparente a 100s ⁻¹ en función de la temperatura y la concentración para el mucílago ESC.	111
Figura III.10. Gráfico del efecto del pH en la	113

viscosidad de disoluciones de mucílago ESC (5 g/100 g s.s.) a un gradiente de velocidad de 100 s^{-1} y a 25°C .

Figura III.11. Gráfico del efecto del pH_f en la viscosidad de disoluciones de mucílago ESC (5 g/100 g s.s.) a un gradiente de velocidad de 100 s^{-1} y a 25°C . 114

Figura III.12. Isotherma de sorción. Datos experimentales y modelo GAB ajustado para el mucílago sin (símbolos huecos y línea continua) y con ácido oleico (rellenos y punteada). Triangulo: mucílago expresado en base libre el oleico (BLO). 116

Figura III.13. Gráfico del ajuste polinómico del modelo de GAB (izquierda) y lineal del modelo de BET (derecha) 117

Figura III.14. Isotherma de sorción. Datos experimentales y modelo GAB ajustado para el mucílago, pectina, fresa y mezclas de soluciones modelo, glucosa-fructosa-sacarosa (glu-fruc-sac: 1:1:1 fracción másica) y glucosa-fructosa-ácido cítrico-pectina (glu-fru-citi-pec: 0,473:0,473:0,005:0,05 fracción másica). 118

Figura III.15. Termogramas correspondientes al mucílago equilibrado a diferentes a_w , mostrando la transición vítrea (T_{g0} y T_{ge} : temperatura de inicio y fin de la transición; T_g , temperatura del punto medio de la transición, tomado como la característica de la transición vítrea). 122

Figura III.16. Termogramas correspondientes al ácido oleico y a las muestras de mucílago con ácido oleico equilibradas a diferentes a_w . Se muestra la zona correspondiente a la fusión del ácido oleico, delimitada por la curva y la línea punteada. 123

Figura III.17. Relación entre la temperatura de transición vítrea y la humedad del mucílago sin (símbolos huecos) y con ácido oleico (símbolos rellenos). Datos experimentales y Modelo de Gordon y Taylor ajustado. Triangulo: datos de humedad 124

expresada en base libre el oleico (BLO).	
Figura III.18. Gráfico de T_g vs $(x_w * T_{gw} - T_g) / x_s$ para el mucílago escaldado.	125
Figura III.19. Relación temperatura de transición vítrea-humedad-actividad de agua para el mucílago sin (símbolo hueco y línea continua) y con ácido oleico (símbolo relleno y línea punteada).	127
Figura IV.1. Efecto de la HR de equilibrio en la tensión de fractura de los films para el mucílago puro y con lípidos. Datos experimentales (símbolos), ajuste (líneas).	146
Figura IV.2. Efecto del contenido de lípido en los films en la tensión de fractura a tres HR. Ácido oleico (izquierda), ácido esteárico (derecha).	148
Figura IV.3. Efecto de la HR de equilibrio en la deformación de Henky de los films para el mucílago puro y con lípidos. Datos experimentales (símbolos), ajuste (líneas).	149
Figura IV.4. Efecto del contenido de lípido en los films en el % de deformación de Henky a tres HR. Ácido oleico (izquierda), ácido esteárico (derecha).	150
Figura IV.5. Efecto de la HR de equilibrio en el módulo de elasticidad de los films para el mucílago puro y con lípidos. Datos experimentales (símbolos), ajuste (líneas).	151
Figura IV.6. Efecto del contenido de lípido en los films en el módulo de elasticidad a tres HR. Ácido oleico (izquierda), ácido esteárico (derecha).	152
Figura IV.7. Efecto de la HR y contenido de lípido en la permeabilidad de los films. Datos experimentales (símbolos), ajuste (líneas).	157
Figura IV.8. Efecto del contenido de lípido en el film en la permeabilidad a las diferentes HR. Oleico (puntos huecos) y esteárico (puntos llenos).	159
Figura IV.9. Evolución de sólidos solubles del film a base de mucílago en función del tiempo, equilibrado a HR 58,9%.	161

Figura IV.10. Efecto del contenido de lípido en la formulación del film en la solubilidad en función de la HR de equilibrio.	162
Figura IV.11. Efecto del contenido de mucílago en la solubilidad del film a diferentes HR de equilibrio.	163
Figura IV.12. Diferencia de color total entre los films sin y con ácidos grasos a dos humedades relativas de equilibrio.	165
Figura IV.13. Plano a^*-b^* para los diferentes films. Símbolos negros, muestras equilibradas a 52% HR y símbolos rojos, a 75% HR.	168
Figura IV.14. Gráfico cromático para los diferentes films. Símbolos negros a 52% HR y símbolos rojos a 75% HR.	169
Figura IV.15. Efecto de la HR de equilibrio en la transparencia de los diferentes films (transmitancia interna a 600 nm).	170
Figura IV.16. Índice de blancura de los diferentes films en función de la humedad relativa de equilibrio.	171
Figura IV.17. Efecto del tipo y concentración de lípido en el brillo de los films a un ángulo de 85°.	175
Figura IV.18. Evolución de la pérdida de peso durante el tiempo de almacenamiento a 4°C de los cubos de jícama cubiertos con las diferentes DFR.	178
Figura IV.19. Evolución de la pérdida de firmeza durante el tiempo de almacenamiento a 4°C de los cubos de jícama cubiertos con las diferentes DFR.	180
Figura IV.20. Diferencia de color al inicio y final del periodo de almacenamiento de los cubos de jícama cubiertos con las diferentes DFR con respecto a la muestra control.	182
Figura IV.21. Gráfico cromático para los diferentes cubos de jícama recubiertos.	183
Figura IV.22. Plano a^*-b^* para los diferentes cubos de jícama en función del tiempo.	184

INDICE DE TABLAS

Tabla I.1. Composición química de 100g de nopal fresco.	10
Tabla I.2. Composición química de cladodios de distintas edades (porcentaje materia seca)	11
Tabla I.3. Composición química de la pulpa de tuna (g/100 g pulpa)	13
Tabla I.4. Composición química del mucílago de <i>Opuntia ficus indica</i> (g/100 g muestra)	25
Tabla I.5. Peso Molecular (PM) y monómeros (galactosa, ramnosa, arabinosa, xilosa, ácido galacturónico) presentes en mucílago de <i>Opuntia</i> spp. según diferentes estudios.	26
Tabla III.1. Valores medios y desviación estándar del porcentaje en peso de los diferentes macrocomponentes del mucílago del nopal en los diferentes procesos de extracción.	87
Tabla III.2. Valores medios y desviación estándar de minerales (mg/100g s.s.)	89
Tabla III.3. Composición de azúcares en el hidrolizado del mucílago obtenido en el proceso escaldado (ESC).	90
Tabla III.4. Valores medios y desviación estándar de pectina total y sus fracciones, caracterizadas en tres mucílagos (g/g s.s.).	91
Tabla III.5. Valores medios y desviación estándar de compuestos fenólicos totales, actividad antioxidante y equivalente en trolox caracterizados a tres mucílagos.	93
TABLA III.6. Valores medio y desviación estándar de las coordenadas y atributos de color de los mucílagos.	94
Tabla III.7. Valores medios y desviación estándar de la viscosidad intrínseca caracterizada para los diferentes mucílagos (dl/g). Se dan también los valores de las constantes de Huggins y Kraemer.	98
Tabla III.8. Parámetros del modelo Ostwald-de Waele para el mucílago escaldado a diferentes concentraciones (C, g/100 g disolución) y diferentes	104

temperaturas.	
Tabla III.9. Parámetros del modelo Ostwald-de Waele para el mucílago entero a diferentes concentraciones (C, g/100 g disolución) y diferentes temperaturas.	104
Tabla III.10. Parámetros del modelo Ostwald-de Waele para el mucílago decolorado a diferentes concentraciones (C, g/100 g disolución) y diferentes temperaturas.	105
Tabla III.11. Parámetros del modelo Ostwald-de Waele para el mucílago cocido a diferentes concentraciones (C, g/100 g disolución) y diferentes temperaturas.	105
Tabla III.12. Valores de las constantes del modelo potencial ajustado a la variación de la viscosidad con la concentración, a las diferentes temperaturas, para los mucílagos ESC, ENT y DEC a dos gradientes de velocidad (1 y 100 s ⁻¹).	109
Tabla III.13. Valores de las constantes del modelo exponencial ajustado a la variación de la viscosidad con la concentración, a las diferentes temperaturas, para el mucílago COC a dos gradientes de velocidad (1 y 100 s ⁻¹).	109
Tabla III.14a. Valores de los parámetros del modelo de Arrhenius para los cuatro mucílagos a diferentes concentraciones a un gradiente de velocidad de 1s ⁻¹ .	110
Tabla III.14b. Valores de los parámetros del modelo de Arrhenius para los cuatro mucílagos a diferentes concentraciones a un gradiente de velocidad de 100 s ⁻¹ .	110
Tabla III.15. Valores de las constantes del modelo potencial ajustado al comportamiento de la viscosidad, concentración y temperatura para los tres mucílagos.	111
Tabla III.16. Cambio de valores de pH de las disoluciones tampón (pH _i) por efecto de la disolución	114

del mucílago (pH_f).	
Tabla III.17. Valores de las constantes del modelo de GAB y BET. R^2 : Coeficiente de determinación	118
Tabla IV.1. Proporciones másicas de mucílago seco y ácidos grasos en las distintas formulaciones de los films.	132
Tabla IV.2. Nomenclatura y formulación de los recubrimientos aplicados.	141
Tabla IV.3. Valores medios del grosor de los films y de las propiedades mecánicas y desviación estándar a tres HR de equilibrio.	144
Tabla IV.4. Valores de los coeficientes y coeficiente de determinación (R^2) de las relaciones existentes entre TF, ε_H y E con la HR de equilibrio para los films sin y con ácidos grasos.	153
Tabla IV.5. Valores de los coeficientes y coeficiente de determinación (R^2) de las relaciones existentes entre TF, ε_H y E con la fracción de ácido graso en el film a tres HR de equilibrio.	154
Tabla IV.6. Valores medios y desviación estándar de permeabilidad de los diferentes films equilibrados a las tres humedades relativas, utilizando los gradientes de HR: 33,9/100; 58,9/100 y 75,5/100, respectivamente.	155
Tabla IV.7. Valores de los coeficientes y coeficiente de determinación (R^2) de las relaciones existentes entre permeabilidad con la HR de equilibrio para los films con y sin ácidos grasos.	157
Tabla IV.8. Valores de los coeficientes y coeficiente de determinación (R^2) de las relaciones potenciales determinadas entre la permeabilidad y la fracción de ácido graso en el film a tres HR de equilibrio.	158
Tabla IV.9. Valores medios y desviación estándar de las coordenadas y atributos de color y diferencia de color total en los films a dos HR de equilibrio.	166
Tabla IV.10. Valores medios y desviación estándar de las coordenadas y atributos de color e índice de	172

blancura en los films secos y molidos y el mucílago. Diferencia de color en base al mucílago e índice de blancura.

Tabla. IV.11. Valores promedio y desviación estándar de brillo a tres ángulos diferentes de los films a HR de 52% 173

Tabla. IV.12. Valores promedio y desviación estándar de la densidad de sólidos superficiales de las diferentes DFR en los cubos de jícama. 176

Tabla IV.13. Valor promedio y desviación estándar de las coordenadas, atributos y diferencia total de color en los cubos de jícama cubiertos con las diferentes DFR durante el almacenamiento a 4°C. 181

ABREVIATURAS

AFNOR	Association Française de Normalisation
ANOVA	Análisis de varianza
ASTM	American Society for Testing Materials
BET	Brunauer Emmett-Teller
Bh	Base húmeda
BLO	Base Libre de Oleico
C	Concentración
CACTUSNET	International Technical Cooperation Network on Cactus
CAM	Metabolismo Ácido de las Crasuláceas
CIE	Commission International de L'Eclairage
COC	Mucílago extraído con el procedimiento de escaldado
CWA	Actividad de agua crítica
CWC	Humedad crítica
DEC	Mucílago extraído con el procedimiento con decoloración
DFF	Dispersión formadora de films
DFR	Dispersión formadora de recubrimientos
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DSS	Densidad superficial de sólidos
E	Módulo de elasticidad
ENT	Mucílago extraído con el procedimiento tradicional

Abreviaturas

ESC	Mucílago extraído con el procedimiento con escaldado
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GAB	Guggenheim-Anderson Boer
HPLC	Hight Pressure Liquid Chromatograph
HR	Humedad relativa
IB	Índice de blancura
PNE	Pectina no extractable
POS	Pectina oxalato soluble
PSA	Pectina soluble en agua
PT	Pectina total
s.s.	Sólidos secos
TF	Tensión de fractura

I. INTRODUCCIÓN

1.1. El nopal.

1.1.1. Generalidades.

Los nopales son plantas arbustivas, rastreras o erectas, que pueden alcanzar de 3 a 5 m de altura. El sistema radical es muy extenso, densamente ramificado, rico en raíces finas absorbentes y superficiales en zonas áridas de escasa pluviometría. La longitud de las raíces está en relación con las condiciones hídricas y con el manejo cultural, especialmente el riego y la fertilización (Villegas y de Gante, 1997; Granados Sánchez y Castañeda Pérez, 2000; De la Rosa y Santana, 2001). Su tronco es leñoso y mide entre 20 y 50 cm de diámetro. Sus ramas están formadas por cladodios de 30 a 60 cm de largo x 20 a 40 cm de ancho y de 2 a 3 cm de espesor. El cladodio fresco recibe el nombre de nopalito y el adulto de penca.

En las pencas, de color verde opaco, se realiza la fotosíntesis, pues éstas remplazan a las hojas con esa función. Se encuentran protegidas por una cutícula gruesa que, en ocasiones, está cubierta de cera o pelos que disminuyen la pérdida de agua, ya que poseen abundante parénquima. En este tejido se almacenan considerables cantidades de agua lo que permite a las plantas soportar largos periodos de sequía. Cabe destacar el papel de los mucílago (hidrocoloides presentes en este tejido) que tienen la capacidad de retener el agua (Nobel *et al.*, 1992).

Sobre ambas caras del cladodio se presentan las yemas, llamadas areolas, que tienen la capacidad de desarrollar nuevos cladodios, flores y raíces aéreas según las condiciones ambientales (Granados Sánchez y Castañeda Pérez, 2000). Las areolas presentan en su cavidad espinas, que generalmente son de dos tipos: algunas pequeñas, agrupadas en gran número (gloquidios) y las grandes que son hojas modificadas (Granados Sánchez y Castañeda Pérez, 2000). Presentan pocos estomas por unidad de superficie, con la particularidad de permanecer cerrados durante el día y abiertos en las noches. Esto evita la pérdida de agua por transpiración durante el día y permite, durante las horas nocturnas, la entrada de anhídrido carbónico, materia prima indispensable para la fotosíntesis. La hidratación normal del cladodio alcanza hasta un 95% de agua en peso. Las flores, de 7 a 10 cm de largo, son sésiles, hermafroditas, solitarias y de diversos colores y se desarrollan normalmente en el borde superior de las pencas (Granados Sánchez y Castañeda Pérez, 2000). Su fruto carnoso, llamado tuna, es una falsa baya oval de 5 a 10 cm de largo x 4 a 8 cm de diámetro y su color puede ser amarillo, anaranjado, rojo o purpúreo. La pulpa del fruto presenta numerosas semillas y es dulce, mientras que su epidermis es parecida a la de los cladodios. En terrenos con pH neutro puede llegar a vivir hasta 80 años. Las plantaciones

comerciales de explotaciones intensivas, pueden durar 3 años (Granados Sánchez y Castañeda Pérez, 2000). La Figura I.1 muestra una fotografía de una planta de nopal.



Figura I.1. Planta de nopal.

La clasificación taxonómica del nopal es la siguiente:

Reino	Vegetal
Subreino	Embryophita
División	Angiospermae
Clase	Dicotyledonea
Subclase	Dialipetalas
Orden	Opuntiales
Familia	Cactaceae
Subfamilia	Opuntioideae
Tribu	Opuntiae
Genero	Opuntia
	Nopalea
Subgéneros de O.	5
Series	17
Especies	300
Especies de N.	10

Fuente: Barrientos (1983)

Del genero *Opuntia* hay sólo 10 ó 12 especies hasta ahora utilizadas por el hombre, entre las que se encuentran,

como especies cultivadas, *Opuntia ficus-indica*, *O. amyclaea*, *O. xoconostle*, *O. megacantha* y *O. streptacantha* y como especies silvestres: *Opuntia hyptiacantha*, *O. leucotricha* y *O. robusta*. La más ampliamente cultivada en distintas partes del mundo es *Opuntia ficus-indica*. El nombre científico le fue asignado por Tourneforten en 1700, por su semejanza con una planta espinosa que crecía en el poblado de Opus en Grecia (Saravia-Tasayco, 2004; Velásquez, 1998). Las características de estas especies son variables, diferenciándose en la forma de los cladodios, en la presencia o ausencia de espinas, en el tamaño y color de los frutos, entre otras (Barrientos, 1983).

El cultivo y aprovechamiento del nopal se remonta a las antiguas civilizaciones mesoamericanas y su importancia en la vida social, económica y religiosa determinó las rutas migratorias de las tribus nómadas de Aridoamérica, los asentamientos humanos en el centro de México y formó parte del escudo de Tenochtitlán, símbolo que se conserva hasta nuestros días. El nopal utilizado en México tiene evidencias fechadas hace 7.000 años en semillas, cáscaras de tuna y fibras de pencas de nopal fosilizadas, encontradas en excavaciones realizadas en Tehuacan, Puebla (Pimienta, 1990). Cuando Hernán Cortés llegó al Valle de México en 1519, no pudo menos que asombrarse

ante los *nopalli* (nopal en *náhuatl*) y las *nochtli* (tunas), sus atractivos y deliciosos frutos.

El nopal (*Opuntia spp*) ha representado, para los mexicanos, en su desarrollo histórico, uno de los elementos bióticos más relevantes y de mayor significado cultural, ya que se utiliza como alimento (verdura o fruto), bebida alcohólica, dulce, forraje, cerco vivo, producto industrial, etc. Su valor cultural y biótico ha quedado plasmado en códices, pinturas y bibliografías antiguas; su significado histórico es evidente.

La planta del nopal se distribuye en América, siendo México el país con mayor abundancia de especies por lo que se puede considerar como centro de origen y diversidad de esta especie. A partir de la conquista, las mejores variedades fueron llevadas por los conquistadores a Sudamérica y al resto del mundo. Actualmente, las plantas del género *Opuntia* son nativas de varios ambientes, desde zonas áridas al nivel del mar hasta territorios de gran altura como los Andes del Perú, desde regiones tropicales de México donde las temperaturas están siempre por sobre los 5°C a áreas de Canadá que en el invierno llegan a -40°C (Goldstein, 1991). Actualmente existen en forma silvestre o cultivada en el sur de España y en toda la cuenca del Mediterráneo: Francia, Grecia, Italia y Turquía, llegando hasta Israel. Los árabes la llevaron desde España a África,

difundiéndose en Argelia, Egipto, Eritrea, Etiopia, Libia, Marruecos y Túnez. Sin embargo, su distribución es aún mayor; en el continente americano se encuentra desde Canadá a Chile, en Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Estados Unidos de América, México, Perú y Venezuela y varios países de América Central; en otros continentes se encuentra en Angola y Sudáfrica, en Australia y la India. En estos países, se localiza parte de las más de 5.000 millones de hectáreas de zonas áridas y semiáridas del planeta y sus pueblos buscan especies que pueden desarrollarse y prosperar en ese peculiar y restrictivo hábitat (Sáenz *et. al.*, 2006).

El cultivo del nopal se puede limitar por tres razones: a) la abundancia de humedad, b) la carencia de nutrientes y c) las temperaturas bajas que llegan a quemar las yemas de crecimiento. A pesar de esto, en México, se ubican en zonas ecológicas extensas donde se pueden establecer su cultivo y desarrollo de vegetación natural (nopaleras) con buenos resultados.

La planta y sus frutas toman diferentes nombres de acuerdo a los países en los que se encuentran. El nombre propio original de la tuna en la lengua náhuatl es "*nochtli*". No obstante, los españoles rebautizaron al nopal con el nombre de chumbera y la fruta como higo de las Indias, o en la actualidad, higo chumbo. En Italia se conoce como

“fico d’India”, en Francia le llaman “figue de Barbarie”; en Estados Unidos de América y Sudáfrica “prickly pear”, (nombre que esta evolucionando actualmente a “cactus pear”, a fin de eliminar el término considerado algo peyorativo de *prickly*, espinoso); en Israel se conoce como “sabras”, que significa espinoso por fuera pero dulce por dentro. En Eritrea y Etiopia son llamados “beles”. En la India se conocen según las lenguas locales como “nagphani”, “anda torra” o “chapathi balli”. En Brasil, como “palma forrageira”, ya que se cultiva principalmente para la producción de forraje (Stintzing y Carle, 2005; Sáenz, *et al.*, 2006).

La producción de nopal en México puede clasificarse en tres tipos: nopaleras silvestres, de huertos familiares y plantaciones. La producción en nopaleras, en su gran mayoría silvestres, se estima en 3 millones de Ha, distribuidas en 15 estados del país. El 52,5% de superficie nacional está ocupada por zonas áridas y semiáridas y ya que las condiciones climáticas que prevalecen en éstas impiden la producción de otros cultivos, el nopal se convierte en una de las alternativas económicas más viables para sus habitantes (Saravia-Tasayco, 2004).

1.1.2. Composición química general

La Tabla I.1 muestra la composición química del nopal fresco. Los cladodios tienen interés desde el punto de vista industrial ya que cuando los brotes son tiernos (10-15 cm) se usan para la producción de nopalitas y cuando están parcialmente lignificados (cladodios de 2-3 años), para la producción de harinas y otros productos.

Tabla I.1. Composición química de 100g de nopal fresco.

Parámetro	Contenido
Porción comestible	78,00
Energía (kcal)	27,00
Proteínas (g)	1,70
Grasas (g)	0,30
Carbohidratos (g)	5,60
Calcio (mg)	93,00
Hierro (mg)	1,60
Tiamina (mg)	0,03
Riboflavina (mg)	0,06
Niacina (mg)	0,03
Ascórbico (mg)	8,00

Fuente: De la Rosa, 2001

El contenido de los macrocomponentes en el cladodio cambia con su edad, como lo muestra la Tabla I.2. Los nopalitas contribuyen con una alta proporción de agua (alrededor del 90%) y son altamente cotizados por su contenido de fibra, comparable al de varias frutas y hortalizas (Zambrano *et al.*, 1998; Ruales y Zumba, 1998).

Forman parte de la dieta común del pueblo mexicano y están siendo ampliamente consumidos en el sur de Estados Unidos de América por la población mexicana allí residente.

Tabla 1.2. Composición química de cladodios de distintas edades (porcentaje materia seca).

Edad (años)	Proteína	Grasa	Cenizas	Fibra cruda	Extracto no Nitrogenado
0,5	9,4	1,00	21,0	8,0	60,6
1	5,4	1,29	18,2	12,0	63,1
2	4,2	1,40	13,2	14,5	66,7
3	3,7	1,33	14,2	17,0	63,7
4	2,5	1,67	14,4	17,5	63,9

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

Son ricos también en minerales, entre ellos el calcio y el potasio (93 y 166 mg/100 g, respectivamente), y tienen bajo contenido de sodio (2 mg/ 100 g), lo que es una ventaja para la salud humana. Su alto contenido en calcio, los hacen muy interesantes por la importancia de este mineral en la dieta. McConn y Nakata (2004) en un estudio efectuado en nopalitos señalan, sin embargo, que el calcio no estaría disponible para la utilización por el cuerpo humano, ya que se encuentra bajo forma de cristales de oxalato de calcio. Contienen, además, cantidades moderadas de carotenoides (30 µg/100 g) y vitamina C (11 mg/100 g) (Rodríguez-Félix y Cantwell, 1988). La composición química de las cenizas varía en las distintas especies y también dentro de una misma especie, de

acuerdo a la composición química del suelo y con los complicados fenómenos mediante los que esas plantas disponen de sus nutrientes. Estos fenómenos se relacionan con la acidez, salinidad, conductividad, grado de disociación o ionización, humedad y textura del suelo.

Bravo (1978) menciona que los carbohidratos que se encuentran en este tipo de vegetales son monosacáridos, disacáridos y polisacáridos. Los néctares son sustancias que exudan los órganos especializados de las cactáceas y constituyen una mezcla de sacáridos que, probablemente, en ocasiones contengan también ligeras cantidades de aceites esenciales, sobre todo los que produce la flor. Su función es participar en la polinización. Así mismo, la composición de azúcares en *Opuntia* es de gran interés debido a la utilidad comercial de la goma de cholla y otros mucílagos (Granados Sánchez y Castañeda Pérez, 2000).

La Tabla 1.3 muestra la composición de la tuna. La composición de los frutos varía con la madurez. Son frutos no climatéricos, con un contenido de sólidos solubles totales que llega a valores de 12-15 por ciento, dependiendo del cultivar.

1.1.3. Usos del nopal

Actualmente, el nopal tiene múltiples usos, entre los que se encuentran los siguientes:

Tabla I.3. Composición química de la pulpa de tuna (g/100 g pulpa).

Parámetro	Intervalo
Humedad	83,8-91,0
Proteína	0,21-1,60
Grasa	0,09-0,70
Fibra	0,02-3,16
Cenizas	0,40-0,51
Azúcares totales	8,10-14,06
Vitamina C (mg/100g)	4,1-25,0
β -carotenos (mg/100g)	Trazas-0,53
pH	6,0-6,5

Fuente: Pimienta (1990)

- Como frutal. Para producción de tuna, fruto del nopal, esta cactácea se cultiva en diversos países: México (67.000 Ha), Italia (2.500 Ha), Sudáfrica (1.500 Ha), Chile (1.000 Ha), Colombia (300 Ha), Israel (250 Ha), Estados Unidos de América (200 Ha), entre otros países.
- Como hortaliza (nopalito). Con este propósito el nopal se cultiva en México (10.500 Ha) y en Estados Unidos de América (150 Ha).
- Como planta forrajera. El nopal se cultiva en muchos países para este propósito: Brasil (500.000 Ha), Sudáfrica (350.000 Ha), México (150.000 Ha, además 3.000.000 Ha de nopaleras silvestres las cuales se usan para la obtención de forraje), Túnez (75.000 Ha), Marruecos (10.500 Ha), Argentina (10.000 Ha), Estados Unidos de América (1.000 Ha, además de 500.000 Ha de nopaleras silvestres). De otros países, como Argelia, Libia, Egipto,

Jordania, Etiopía, Namibia, Mozambique, etc., no se dispone de información sobre superficies cultivadas de nopal con fines forrajeros.

- Como sustrato para la producción de grana cochinilla. La cochinilla (*Dactylopus coccus* Costa) es un insecto que produce el carmín, un colorante rojo que ha vuelto a tomar importancia, a raíz de que se prohibieron, por considerarlos cancerígenos, los colorantes artificiales (FDA N° 2 y 4). Se cultiva nopal para producir grana en Perú (70.000 Ha), Bolivia (1.000 Ha), Chile (500 Ha), España (300 Ha), Sudáfrica (100 Ha), Argentina (50 Ha) y México (10 Ha).
- Como planta medicinal. Se ha probado que los nopales y las cáscaras de la tuna ácida (xoconostle) abate los niveles de azúcar y colesterol en la sangre, por lo que su consumo en fresco, cocinado y procesado industrialmente se ha acrecentado en México.
- Como materia prima en la producción de cosméticos. En México y otros países se fabrican, de nopal o de la tuna, cosméticos como: champú, acondicionadores, jabones, cremas, lociones, mascarillas, geles, etc.
- Como materia prima para elaborar bebidas alcohólicas. En México, Estados Unidos de América, Italia, Perú, Chile, Dinamarca, etc., se utiliza el nopal y sobre todo la tuna para fabricar vinos, licores y aguardientes.

- Como cerco. La utilización de las variedades espinosas de nopal para formar cercos en los huertos familiares y en los predios ganaderos es común y muy antigua en México.
- Para la conservación del suelo. El nopal se utiliza en muchos países para proteger el suelo de la erosión hídrica y eólica. Evita la desertificación en zonas áridas y semiáridas, formando setos en curvas de nivel, que soportan las condiciones del medio árido caracterizado por una precipitación pobre e irregular y alta oscilación térmica diaria y anual.
- Otros usos populares a los que actualmente se les está estudiando su base científica, como la utilización de las pencas en la clarificación de aguas (López, 2000), su adición a la cal como adherente, en pinturas (Ramsey, 1999) o su introducción en el suelo para aumentar la infiltración de agua (Gardiner *et al.*, 1999).
- La tuna y los cladodios se conservan y transforman aplicando tecnologías equivalentes de procesamiento y existen alimentos tradicionales preparados en base a tuna y nopalitas. Se cuentan entre ellos alimentos en base al fruto: mermeladas, jugos y néctares; productos deshidratados; jugos concentrados, jarabes y licores. En base a los cladodios se encuentran entre otros,

encurtidos, jugos, mermeladas y productos mínimamente procesados.

- Otra propiedad distinta es la que se atribuye al nopal como repelente de insectos, aunque no se conocen estudios científicos acerca de esta acción; un producto que con estos fines habría sido probado con éxito en la isla de Roatan, Honduras, está siendo elaborado en Texas, patentando y se ofrece a través de Internet (Sáenz *et al.*, 2006).

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

- agroindustria de alimentos y bebidas para consumo humano (producción de diversos alimentos, bebidas alcohólicas y analcohólicas de tuna y nopalitos);
- agroindustria de alimentos para animales (suplementos y piensos de cladodios y de desechos de la industria procesadora de tuna, como las cáscaras y las semillas);
- industria farmacéutica (protectores gástricos de extractos de mucílagos; cápsulas y tabletas de polvo de nopal);
- industria cosmética (cremas, champúes, lociones de cladodios);
- industria de suplementos alimenticios (fibra y harinas de cladodios);

- industria productora de aditivos naturales (gomas de cladodios; colorantes de la fruta);
- sector de la construcción (compuestos ligantes de los cladodios) ;
- sector energético (producción de biogás a partir de las pencas);
- sector productor de insumos para la agricultura (productos del nopal como mejoradores del drenaje de suelos);
- sector turismo (artesanías en base a cladodios lignificados);
- industria textil (uso de colorantes naturales como el carmín de cochinilla).

Por todo lo anterior, se considera al nopal como uno de los recursos genéticos de gran valor que México ha dado al mundo. Según estudios realizados por la FAO se ha demostrado la importancia del nopal (*Opuntia spp*) como recurso natural y como potencial fuente de ingresos, empleo y nutrientes. Hay muchos países en los que este recurso natural se encuentra subutilizado por lo que es importante consolidar información técnica para su uso industrial, tal como la composición química, propiedades físicas, manejo poscosecha, procesos para producción de alimentos u otros productos industriales. Un tesoro bajo las espinas, así lo definió un periodista siciliano en Palermo en

1994. El lema de CACTUSNET (creación en 1991) es: un esfuerzo para producir y conservar el ambiente en las regiones áridas y subáridas.

1.1.4. Propiedades funcionales del nopal

Tanto la fruta como los cladodios de la tuna son una fuente interesante de compuestos funcionales, entre los que destacan la fibra, los hidrocoloides (mucílago), los pigmentos (betalaínas, carotenoides), los minerales (calcio, potasio) y algunas vitaminas como la C (Sáenz *et al.*, 2004).

Una alternativa explorada hace años es la obtención de betalaínas a partir de las tunas rojas o púrpuras. Las betalaínas son pigmentos solubles en agua derivados del ácido betalámico cuya estabilidad se ve afectada por el pH, siendo más estables a pH entre 4,0 y 6,0 (Castellar *et al.*, 2003). Están formadas por dos grupos principales, las betacianinas (rojas) y las betaxantinas (amarillas), que presentan absorbancias a diferentes longitudes de onda (540 nm y 480 nm, respectivamente). Dentro de las betacianinas se encuentran varios compuestos, entre ellos la betanina, que suele ser el mayor responsable del color rojo (Fernández-López *et al.*, 2002). La betanina, también llamada rojo-betarraga, es aceptada entre los pigmentos naturales, utilizados principalmente para colorear alimentos que no son tratados térmicamente, como yogur, helados y

jarabes. Se encuentra presente tanto en la cáscara como en la pulpa de los frutos y su concentración varía de acuerdo a la especie (Sáenz *et al.*, 2004; Sepúlveda *et al.*, 2003a) por lo que es de interés estudiar y seleccionar las especies que concentran la mayor cantidad del pigmento.

La tuna contiene semillas en cantidad variable, generalmente en alta proporción (10-15 g/100g). Considerando que en la mayoría de los productos alimenticios que se obtienen a partir de la tuna, las semillas deben ser eliminadas y pasan a formar parte de los deshechos, varios investigadores se interesaron por su aprovechamiento. Es así como Sepúlveda y Sáenz (1988) analizaron el rendimiento y composición del aceite de las semillas de tunas cultivadas en Chile, encontrando que el alto grado de insaturación de sus ácidos grasos, su importante contenido en ácido linoléico y su bajo porcentaje de ácido linolénico que podría afectar en forma adversa a su estabilidad, le daban a la semilla características que la hacían una fuente potencial para obtener el aceite comestible. Posteriormente, El Kossori *et al.* (1998) analizaron semillas de tunas cultivadas en Marruecos, destacando, además del aceite, el contenido de fibra (54,2 g/100 g), principalmente celulosa. Todos los autores hacen notar que esta alternativa de utilización de las semillas, sólo sería de interés en un contexto de utilización integral de esta

especie, debido fundamentalmente a su bajo rendimiento de aceite (6 a 7 por ciento), comparado con otras oleaginosas de uso común.

Los cladodios, con su alto contenido en fibra, son actualmente una fuente importante de la misma, la que se obtiene por secado y molienda de los mismos. Este polvo o harina se destina tanto para la industria de alimentos como para la industria de complementos alimenticios, ligada en cierto modo a la industria farmacéutica. Las tabletas y cápsulas de nopal se encuentran en el mercado mexicano desde hace años y se ofrecen como un modo de controlar la obesidad y la diabetes. En México se han efectuado, sobre todo en la década de 1980, numerosos estudios al respecto, tanto en *Opuntia ficus-indica* como en *O. streptacantha*. Unos de los trabajos publicados en relación con el control de la diabetes se refieren a una evaluación del efecto de la ingesta en fresco o cocidos de *Opuntia* en pacientes con diabetes mellitus no dependientes de insulina, observándose una reducción del contenido de glucosa en sangre en ambos casos. En otro estudio, el consumo de cápsulas comerciales de cladodios de *Opuntia ficus indica* deshidratados en pacientes con diabetes mellitus (Fрати *et al.*, 1990 y Frати-Munari *et al.*, 1992) indica que las dosis recomendadas (30 capsulas diarias, en el segundo estudio) son impracticables para lograr un discreto

efecto. Sin embargo, otros autores indican resultados variables dependiendo de las dosis, el modo de ingerir el producto y el tipo de *Opuntia* que se utiliza. En este sentido, aparentemente son superiores los resultados logrados con *Opuntia streptacantha*. Otros autores como Trejo-Gonzalez *et al.* (1996) también confirman evidencias de la acción hipoglicemiante de los cladodios de *Opuntia fulginosa*. Hasta el año 2005 no se dispone de estudios concluyentes sobre el mecanismo de acción de los cladodios.

En los últimos años varios autores han encontrado otros efectos fisiológicos, que sugieren nuevos productos farmacéuticos en base a extractos de cladodios y también de las cáscaras de los frutos. Es el caso de los trabajos efectuados por Galati *et al.* (2001) y (2002a) acerca del poder protector de la mucosa gástrica, mediante el cual se podrían prevenir las úlceras gástricas. Estudios realizados por Corrales-García *et al.* (2004) señalan que los nopalitos tienen una capacidad tamponante que está relacionada con los estudios anteriormente mencionados. Vázquez-Ramírez *et al.* (2006) señalan que el mucílago de nopal acelera la restauración de la mucosa gástrica con gastritis alcohólica provocada en ratas. En otro estudio reportado por Galati *et al.* (2002b) señalan que esta cactácea presenta actividad diurética por lo que ayuda al control de peso e hipertensión. Así mismo la actividad antiinflamatoria de un

extracto de cladodios ha sido estudiada por Loro *et al.* (1999), Park y Chun (2001) y más recientemente por Panico *et al.* (2007). Estos últimos señalan que el extracto de nopal tiene un efecto protector en las alteraciones de cartílago mayor que el ácido hialurónico, comúnmente empleado en tratamientos para lesiones de articulaciones. La actividad antioxidante ha sido reseñada por Lee *et al.* (2002). Por su parte Ahamd *et al.* (1996) estudiaron las propiedades antivirales de un extracto de *Opuntia streptacantha*. Últimamente, un producto elaborado en Estados Unidos de América, calificado como un suplemento de la dieta y elaborado a base de un extracto deshidratado de la piel de frutos de *Opuntia ficus-indica*, en forma de gelatina, podría actuar moderando los efectos posteriores de la ingesta de alcohol (Wiese *et al.*, 2004).

Estudios más recientes, como el realizado por Kim *et al.* (2006), sugieren que la administración preventiva de extracto metanólico de *Opuntia ficus-indica* ayuda a aliviar los daños neuronales excitotóxicos provocados por una isquemia global. Kwak (2002) en su estudio menciona que los flavonoides aislados de frutos del nopal tienen un efecto neuroprotector por lo que pueden ser utilizados como tratamiento preventivo en los desordenes oxidativos neuronales, como el Alzheimer. También se han evaluado los efectos del mucílago para el alivio de piel irritada. Se

observó que la aplicación cutánea de éstos indujo la reparación del tejido lesionado, acelerando la fase de re-epitelización (Trombetta *et al.*, 2006; Park y Chum, 2001). Otra bondad encontrada en esta cactácea es que extractos de nopal protegen al hígado contra daños provocados por ingesta de insecticidas organofosforados y a su vez disminuyen el grado de toxicidad de estos químicos (Ncibi *et al.*, 2008).

Todos estos estudios abren nuevos horizontes para los nopales en un área que es de especial y sensible interés para la humanidad como es la medicina.

1.1.5. El mucílago del nopal

Otro componente al que se ya se ha hecho mención por su importancia fisiológica es el mucílago. Este compuesto se presenta tanto en los cladodios como en la piel y pulpa de la fruta, aunque en muy diversas proporciones. Estudios efectuados por Sáenz y Sepúlveda (1993) indican que el rendimiento en todos los casos es bajo: 0,5 por ciento en la cáscara y 1,2 por ciento en los cladodios.

El mucílago es un carbohidrato complejo. Entre los monómeros contenidos en la cadena se encuentran: L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa, D-Xilosa y ácido galacturónico. La proporción de estos monómeros en la

molécula varía de acuerdo a diversos factores como: variedad, edad, condiciones ambientales y estructura empleada para la extracción (fruto, cáscara, cladodio), entre otros factores. La Tabla 1.4 muestra la composición química del mucílago de *Opuntia ficus indica* y la Tabla 1.5 los monómeros presentes en el mucílago de diferentes especies de *Opuntia* así como su peso molecular, según distintas referencias bibliográficas consultadas. El mucílago está presente como su sal de calcio en las células de mucílago del parénquima de la penca (Trachtenberg y Mayer, 1982).

Este mucílago constituye un hidrocoloide que podría integrar la oferta de una gran gama de agentes espesantes de amplio uso en la industria de alimentos y farmacéutica, además de que tiene una gran capacidad de absorción de agua. Su poder espesante está siendo actualmente estudiado (Cárdenas *et al.*, 1997; Medina-Torres *et al.*, 2000; Medina-Torres *et al.*, 2003; Sepúlveda *et al.*, 2003b; Cárdenas *et al.*, 2008), con resultados interesantes, por lo que si se mejoran los rendimientos de extracción podría competir con gomas de gran uso como la goma garrofín, la goma guar u otros agentes espesantes. Una amplia revisión acerca de estos compuestos fue publicada recientemente por Sáenz *et al.* (2004).

Tabla I.4. Composición química del mucílago de *Opuntia ficus indica* (g/100 g muestra).

Solvente	Humedad	Proteína	Cenizas	Nitrógeno	Ca	K
Etanol	4,9 ± 0,6	7,9 ± 1,5	36,2 ± 2,3	1,3 ± 0,2	10,9 ± 0,7	1,6 ± 0,2
Isopropanol	5,5 ± 1,1	6,1 ± 0,7	39,1 ± 2,4	1,0 ± 0,1	12,7 ± 1,6	2,0 ± 0,3

Sepúlveda *et al.* (2007)

También se atribuyen a los mucílago propiedades como reemplazantes de grasas en diversos alimentos y también como un ligante del sabor [(McCarthy, citado por Cárdenas *et al.*, 1997)].

Por su parte, en Israel, Rwashda [citado por Garti (1999)] ha estudiado la capacidad como agente emulsionante de la goma o mucílago de *Opuntia ficus-indica*. El autor encontró que esta goma: (1) reduce la tensión superficial e interfacial; (2) estabiliza emulsiones del tipo aceite-agua; (3) forma gotas pequeñas de aceite; (4) los sistemas a los que se agrega no flocculan. Espinosa (2002) estudió la adición de dispersiones de mucílago de nopal en distintas concentraciones (0,5 y 0,8 por ciento) a espumas elaboradas con clara de huevo, demostrando que la adición de mucílago de nopal se manifestaba en una menor sinéresis y un mayor volumen después de 48 h.

Esta clase de ingredientes utilizados con frecuencia por su capacidad para mejorar la textura, también se emplean para estabilizar emulsiones, para controlar la

cristalización, como estabilizadores de suspensiones, para inhibir la sinéresis y para crear películas comestibles. Algunos de ellos tienen la capacidad de formar geles.

Tabla 1.5. Peso Molecular (PM) y monómeros (galactosa, ramnosa, arabinosa, xilosa, ácido galacturónico) presentes en mucílago de *Opuntia* spp. según diferentes estudios.

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

*Citados por Sáenz *et al.* (2006)

Hasta hace poco tiempo, se consideraba que las gomas o hidrocoloides, no contribuían al valor nutritivo de los alimentos, por consiguiente sus calorías no aumentaban y no impartían ningún sabor ni aroma a los productos a los que se adicionaban. Actualmente, se considera que la fibra

insoluble de los alimentos contribuye con cero calorías y la fibra soluble contribuye al valor calórico de los alimentos en forma variable. De hecho la adición de fibra insoluble a los alimentos es un modo de reducir el aporte energético de los mismos (Nelson, 2001 citado por Sáenz *et al.*, 2006).

Las metodologías de extracción del mucílago señaladas en los diferentes estudios realizados es muy variada, desde metodologías muy simples como la señalada por Vargas-Rodríguez y Ramos-Ramírez (2003) hasta otras más complicadas como la utilizada por Habibi *et al.* (2005). El método cambia según la fuente de mucílago (cladodio o fruto) y la parte concreta de la que se extraerá el hidrocoloide (piel, pulpa o semillas). En función de lo anterior y el grado de pureza que se desea obtener serán las modificaciones al método simple que se deban hacer.

Fuera del campo de la alimentación, hay otros usos específicos del mucílago de nopal. En un estudio en Cuba, López (2000) comparó la capacidad clarificante del mucílago, con otros agentes tradicionales como el sulfato de aluminio $[Al_2(SO_4)_3]$. El autor informó de que el mucílago de *Opuntia ficus-indica* y de *O. stricta var. dillenii* tiene una conducta similar al sulfato de aluminio para clarificar agua. Las dosis mejores eran cerca de 0,8ml/l en agua con turbidez media y alta. Algunos de los parámetros utilizados

en la comparación para determinar el poder clarificante fueron: turbidez y el índice de Willcombs que refleja la calidad del proceso de coagulación-floculación. El mucílago también redujo la demanda química de oxígeno (DQO) y removió metales pesados (Fe, Al, Mn) y coliformes fecales. Después del tratamiento el agua no presentó ningún olor desagradable.

Por otra parte, en Perú, Ramsey (1999) estudió el uso de goma o mucílago de cladodios de nopal para estabilizar bloques de adobe, comparándolo con la cal; los resultados obtenidos no fueron exitosos como se esperaba, probablemente debido a que la dosis empleada fue baja (10 por ciento). La metodología utilizada para preparar la goma de nopal como estabilizante, consiste en limpiar y remojar en agua los cladodios (1-1 en peso); las mejores condiciones de remojo fueron los 18 días-20°C (82-92 por ciento HR) o entre 7 y 14 días a 20-25°C (77-88 por ciento HR). Del mismo modo, Cárdenas *et al* (1998) efectuaron ensayos preliminares acerca del uso del jugo de nopal en pastas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ indicando que su incorporación vuelve mas débil la textura de la cal. Últimamente, Torres Acosta *et al.* (2004) afirman que la adición de mucílago de nopal a mezclas de cementos refuerza la durabilidad de estos materiales. Sin duda, todos estos resultados justifican continuar los estudios respecto a estas propiedades.

En México hay una larga historia del uso del mucílago de nopal en combinación con cal: aumenta sus propiedades adhesivas y mejora su repelencia al agua. Tradicionalmente, se ha usado de modo similar al yeso en paredes de adobe y de ladrillo y también como una barrera al agua en el estuco. Cárdenas *et al.* (1998) han señalado que, desde hace muchos siglos, se agrega jugo de nopal como un adhesivo orgánico a la cal para restaurar y proteger edificios en México. En un estudio hecho por estos autores, se probó la adición de jugo de nopal (extraído de pencas hervidas) a la cal $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ en proporciones diferentes (0,65, 1,95 por ciento). La resistencia de las pastas secas fue evaluada por una prueba penetración-ruptura con un texturómetro. A medida que la cantidad de jugo de nopal aumentaba, se produjo una reducción drástica del estrés máximo y de la tasa de deformación, comparada con un testigo (sin jugo de nopal). En cambio, la cal control mostró una estructura mecánica más homogénea. En la muestra con la dosis más baja de jugo de nopal (0,65 por ciento) se observó que el mucílago tenía un bajo efecto en la continuidad de la red, haciendo una fase más discontinua y la red de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ más débil. Cuando la dosis de jugo de nopal aumentaba, las propiedades mecánicas también aumentaron debido a la formación de una red homogénea en la que el mucílago

del nopal ínterpenetraba en el hidróxido del calcio, sin modificación de la estructura, en comparación con el control.

Por su parte, Hernández y Serrano (2003), en un estudio sobre adición de mucílago de nopal liofilizado a morteros ampliamente usados en la construcción, observaron que la adición de 0,5 g de mucílago liofilizado mejoraba las características mecánicas de la mezcla, con una mejor resistencia a la compresión que los controles sin mucílago de nopal. La mezcla de yeso + arena sílice + mucílago de nopal liofilizado mostró un esfuerzo a la compresión de 151,8 kg/cm a los 28 días, en comparación con el control que fue de 125,6 kg/cm.

Gardiner *et al.* (1999), informa sobre las primeras investigaciones relacionadas con la acción de un extracto de nopal para mejorar la infiltración del agua en el suelo. Los autores compararon poliacrilamidas con un extracto de nopal sin diluir y diluido y concluyeron que la aplicación del extracto aumenta la infiltración de agua en la tierra, en una magnitud similar al de las poliacrilamidas. Sin embargo, todavía quedan muchas preguntas al respecto. Se ignora la persistencia de los efectos del extracto, así como el ingrediente activo y el mecanismo de acción.

Últimamente está siendo estudiado el uso de los cladodios para evitar la corrosión. En Marruecos,

Hammouch *et al.* (2004) informan de que la utilización de un extracto acuoso obtenido de los cladodios demostró ser exitoso para evitar la corrosión del hierro. Por su parte Torres-Acosta *et al.* (2004) en estudios preliminares, encontraron que la adición de mucílago de cladodios al hormigón evitaba la corrosión de barras de acero inmersas en el mismo. Torres-Acosta *et al.* (2004) también analizaron la adición de mezclas de nopal y Aloe-vera en el hormigón, como un modo de aumentar las propiedades anticorrosivas al entrar en contacto con acero.

1.2. Films y Recubrimientos Comestibles

1.2.1. Generalidades

La calidad de los productos alimenticios depende de las características organolépticas, nutricionales e higiénicas, pero éstas evolucionan durante el almacenamiento y comercialización.

Muchos procesos físicos y químicos tales como la esterilización, alta presión, irradiación, adición de agentes activos, etc., han sido desarrollados para estabilizar a los alimentos y de esta manera preservar su calidad. Sin embargo, el uso de envases preformados es necesario en muchos casos en la última etapa del proceso de conservación, para asegurar la calidad del alimento durante el almacenamiento.

En el envasado de alimentos se utiliza una amplia variedad de materiales que incluyen metales rígidos y flexibles, vidrio, plásticos flexibles, papel, películas y recubrimientos biodegradables, etc. (McDowell, 2003). Con respecto a la fabricación de estos últimos, actualmente se usan materiales comestibles tales como amilosa, pectina, quitina, zeína, caseína y proteína de suero de leche, por ser materiales degradables y/o desintegrables (Brandenburg et al., 1993; Coffin y Fishhman, 1993; Gennadios y Weller, 1990; McHugh y Krochta, 1994a; Sapru y Labuza, 1994).

La combinación de envases sintéticos y comestibles hace más eficiente la conservación de la calidad de los alimentos (Krochta, 1992). Además, los envases comestibles se consideran materiales no contaminantes por estar constituidos de sustancias naturales de origen agrícola, marino o subproductos industriales, renovables y biodegradables, por lo que contribuyen a la protección del medio ambiente. El entrecruzamiento y copolimerización de polímeros naturales con monómeros sintéticos es otra alternativa para la elaboración de películas y recubrimientos comestibles (Tharanathan, 2003).

Se considera envase comestible cuando el envase, como una película, una capa fina o una cubierta, es parte integral del alimento y se come con él (Debeaufort *et al.*,

1998). Pueden contener uno o varios componentes, secos o húmedos, de una o más capas.

Los recubrimientos son los aplicados o hechos directamente en los alimentos y las películas son estructuras independientes que pueden envolver al alimento después de haber sido hechas. Ambas se localizan en la superficie del alimento o como una fina capa entre algunos componentes dentro del producto. Los recubrimientos y películas comestibles se pueden clasificar como alimento aunque la mayoría de las veces no contribuyen con un valor nutritivo significativo, por lo que se consideran más como un aditivo. Su sabor debe ser prácticamente inapreciable por el consumidor o si tiene un sabor característico, éste debe ser compatible con el alimento al que protegen (Biquet y Labuza, 1988).

Las películas y recubrimientos comestibles deben cubrir los siguientes requerimientos para poder ser utilizados en alimentos (McHugh y Kronchta, 1994b):

- Buenas cualidades sensoriales
- Eficiencia mecánica y gran capacidad de barrera
- Suficiente estabilidad bioquímica, física y microbiológica
- Libre de tóxicos y seguros para la salud
- Tecnología simple de fabricación y aplicación
- No contaminante
- Bajo coste como materia prima y proceso.

Las propiedades funcionales de películas y recubrimientos comestibles son (Biquet y Labuza, 1988; Kester y Fennema, 1986):

- Retardan la pérdida de humedad de los alimentos frescos o congelados.
- Retardan la absorción de humedad en otros casos como en alimentos en polvo o crujientes.
- Retardan la transferencia de gases (O_2 , CO_2) con lo que se puede controlar la respiración y por tanto la maduración de ciertos productos o la oxidación de ciertos compuestos contenidos en el alimento (El Ghaout *et al.*, 1991). Se considera que crean una atmósfera modificada.
- Retardan la migración de grasas y aceites o reducen la absorción de grasas durante el proceso de fritura de productos.
- Imparten integridad estructural a los alimentos y favorecen el manejo del mismo.
- Retienen compuestos volátiles asociados con el sabor.
- Son vehículos para la incorporación de aditivos como los compuestos aromáticos (Deasy, 1984; Debeaufort y Voilley 1995; Reineccius, 1994), antioxidantes (Mazza y Qi, 1991), colorantes, sustancias nutritivas (Avena-Bustillos y Krochta, 1993), iones y conservantes (Rico-Peña y Torres, 1991).

- Ayudan a mejorar ciertas propiedades de apariencia del producto.
- Permiten la separación de piezas o dosis específicas contenidas en un mismo envase facilitando de esta manera su consumo.
- Retardan o previenen el crecimiento microbiano durante el almacenamiento.

La característica funcional mas importante de las películas y recubrimientos comestibles para su aplicación en alimentos es su resistencia a la migración de humedad. La importancia de esta función radica en que los niveles de actividad del agua (a_w) deben ser mantenidos en los alimentos de tal manera que exhiban una calidad óptima y seguridad aceptable (Avena-Bustillos y Krochta, 1993; Biquet y Labuza, 1988).

Generalmente las películas deben ser flexibles pero resistentes a la ruptura y a la abrasión. Las propiedades mecánicas de sustancias amorfas constituyentes de los recubrimientos son seriamente modificadas cuando se alcanzan temperaturas alrededor de su temperatura de transición vítrea (T_g). Por debajo de este valor, la estructura es rígida y por encima de ella se obtiene una estructura viscoelástica (Guilbert *et al.*, 1996).

1.2.2. Componentes y métodos de obtención de films y recubrimientos

Existen básicamente dos tipos de biomoléculas empleadas para la elaboración de films, los hidrocoloides (proteínas o carbohidratos) y los lípidos. Generalmente ambos se usan combinadamente para contrarrestar las deficiencias que presentan cada grupo por separado. Entre los carbohidratos estudiados para el desarrollo de películas y recubrimientos comestibles se encuentran: celulosa y sus derivados, alginatos, pectinas, goma arábiga, almidones y almidones modificados. En el caso de proteínas; las provenientes de cereales como maíz, trigo o avena, las lácteas, las obtenidas de animales marinos como peces y camarones, la gelatina o las proteínas de soya. Los lípidos empleados incluyen ceras, acilglicéridos y ácidos grasos.

La eficiencia funcional de las películas y recubrimientos comestibles depende básicamente de la naturaleza de sus componentes y de la composición y estructura. La elección de las sustancias formadoras de la película y/o de los aditivos activos esta en función del objetivo, la naturaleza del producto y del método de aplicación. Los lípidos o sustancias hidrofóbicas son más eficientes para retardar la transferencia de humedad (Gontard *et al.*, 1994) y las sustancias hidrosolubles son poco eficientes en este aspecto, pero su permeabilidad a los

gases es más baja que la de las películas plásticas. Los hidrocoloides proporcionan mejores propiedades mecánicas a los envases comestibles que las sustancias hidrofóbicas. La solubilidad en agua de las películas de polisacáridos en algunos casos es beneficiosa, como cuando se aplican a alimentos que deben calentarse antes de ser consumidos. Cuando los hidrocoloides presentan carga, como los alginatos y las pectinas, requieren de la adición de iones polivalentes, como el calcio, para facilitar la formación de la película. También sus cargas son sensibles a los cambios de pH, en especial las proteínas. Para algunas aplicaciones se puede obtener ventaja mezclando hidrocoloides de cargas opuestas como la goma arábiga y gelatina (Greener y Fennema, 1989). Ciertas películas comestibles, especialmente aquellas basadas en polímeros hidrofílicos, son altamente impermeables a grasas y a aceites. Esta es una propiedad funcional deseable en materiales de envases para frituras (Fishman y Salvador, 2003; Kester y Fennema, 1986).

Generalmente es necesaria el uso de aditivos, como los plastificantes, para mejorar la resistencia y flexibilidad de la película, aunque éstos reducen el brillo de las mismas por interferir con los puentes de hidrógeno entre las moléculas de lípido e hidrocoloide (Tharanathan, 2003). Los emulsionantes mejoran la dispersión de los glóbulos grasos

en la composición de la emulsión base de la película comestible (Debeaufort y Voilley, 1995).

Un plastificante se define como una sustancia no volátil, la cual es añadida a otro material y su función es atenuar las fuerzas intermoleculares entre las cadenas de polímeros adyacentes, lo que origina un decremento en la resistencia a la tensión y un incremento en la flexibilidad de las películas (Gennadios y Weller, 1990; McHugh y Krochta, 1994a). Algunos ejemplos de plastificantes grado alimentario son los polioles, tales como el glicerol, sorbitol, manitol, sacarosa, propilenglicol y polietilenglicol (McHugh y Krochta, 1994a).

El sorbitol y el glicerol son plastificantes efectivos, debido a su potencialidad para reducir los puentes de hidrogeno internos, mientras incrementan el espaciado intermolecular (Donhowe y Fennema, 1993,) lo que origina un descenso en la fragilidad, con el consiguiente aumento en flexibilidad (McHugh y Krochta, 1994a). Esto va asociado a un incremento en la permeabilidad de las películas como consecuencia del aumento en la movilidad de las cadenas del polímero, que origina una disminución de la resistencia de las películas a la transmisión de gas o del vapor de agua (Greener y Fennema, 1989).

Las películas homogéneas con superficie lisa se obtienen a partir de soluciones homogéneas de

polisacáridos o proteínas completamente disueltos. La incorporación de lípidos supone pérdidas de brillo por la aparición de partículas grasas en la superficie, resultado de los procesos de floculación, coalescencia y cremado de los glóbulos grasos durante el secado de la película (Trezza y Krochta, 2000; Villalobos *et al.*, 2005, Maftoonazad *et al.*, 2007a). La apariencia (brillo, transparencia, color, opacidad) depende de la naturaleza del componente formador de la matriz del film, pero está muy afectada por la presencia de componentes no miscibles que sufren los procesos de desestabilización mencionados durante la formación de la película.

Se definen las películas o recubrimientos compuestos como aquellos con estructura heterogénea, es decir, compuestos por una matriz con algunas inclusiones como glóbulos de lípidos o partículas sólidas no solubles o compuestas por varias capas. Las películas multicapa, generalmente, tienen mejor eficiencia mecánica y de barrera que las elaboradas a base de emulsiones. La formulación de películas y recubrimientos necesitan por lo menos un componente con la capacidad de formar una matriz con suficiente cohesividad.

Las sustancias formadoras de películas tienen la capacidad de formar una estructura continua en forma de red tridimensional donde el solvente utilizado queda

atrapado estableciendo interacciones entre moléculas bajo la acción de un tratamiento químico o físico. La formación del recubrimiento o película involucra alguno de los siguientes procesos (Contreras-Medellín y Labuza, 1981; Torres, 1994; Gontard *et al.*, 1994):

- Fusión y solidificación de grasas, ceras y resinas.
- Agrupación simple cuando un hidrocoloide es dispersado en soluciones acuosas y precipitado o gelificado por eliminación del solvente. También por la adición de un soluto no electrolítico en el que el polímero no es soluble, por la adición de un electrolito que induzca un efecto de precipitación por salado o por la modificación del pH de la solución.
- Coacervación compleja, cuando dos dispersiones coloidales con cargas diferentes se combinan induciendo interacciones y la precipitación de la mezcla de polímeros.
- Gelatinización térmica o coagulación por calor de la solución macromolecular que involucra desnaturalización, gelificación, precipitación y enfriamiento rápido de la solución del hidrocoloide que induce una transición sol-gel.

Las películas que son estructuras independientes se obtienen después de haber sido extendida o pulverizada la solución formadora sobre un soporte, secada y desprendida

del mismo. Se pueden obtener por tecnologías industriales como la extrusión, coextrusión, laminación y secado por rodillos de la solución de polímero (Lindstrom *et al.*, 1992; Fellows, 1990; Liu *et al.*, 2007b; Fishman *et al.*, 2006).

Los métodos para realizar los recubrimientos son: pulverización, moldeado en cápsulas especiales, inmersión del producto en la dispersión formadora de recubrimiento o extensión de la misma sobre el producto con cepillos. La etapa de aplicación va seguida de una etapa de secado o enfriamiento (Gontard *et al.*, 1994). Para cada uno de los métodos señalados existen particularidades para conseguir un recubrimiento adecuado. Así, en la inmersión hay que recambiar la solución de inmersión ya que durante el proceso hay contaminación por microorganismos, sólidos u otros contaminantes. En la pulverización hay que mantener la presión adecuada para conseguir el espesor del recubrimiento requerido (Tharanathan, 2003).

El método de inmersión se recomienda para productos que requieren la aplicación de varias capas de recubrimientos, tienen una superficie irregular o requieren un recubrimiento uniforme. La pulverización es adecuada si se requiere obtener un recubrimiento de espesor muy fino.

Cuando el material utilizado para el recubrimiento entra en contacto con el alimento, se establecen dos tipos de fuerzas, adhesivas y cohesivas. La adhesividad del

recubrimiento sobre la superficie del producto depende principalmente de su naturaleza y uniones entre el soporte y la película, es decir, de su afinidad y no del método de aplicación, aunque el uso de aditivos, como los tensoactivos, puede permitir la adhesión del recubrimiento sin tener afinidad a la superficie del producto. Los factores involucrados en el grado de cohesión son: la estructura de polímero, el tipo de solvente, la temperatura, la presión, la técnica de aplicación y eliminación del solvente y la presencia de otras moléculas como los plastificantes o lípidos y el tipo de unión entre las moléculas. El grado de cohesión afecta a algunas propiedades de la película o recubrimiento, tales como son: la resistencia, flexibilidad, permeabilidad, etc. Una cohesión fuerte reduce la flexibilidad, las propiedades de barrera a los gases y solutos (Fellows, 1990). El espesor de la película depende esencialmente del método de aplicación y de la viscosidad de la solución. Soluciones con viscosidad alta no pueden ser extendidas fácilmente y solamente se pueden aplicar por moldeado alrededor del producto o inmersión, dando recubrimientos gruesos (Fellows, 1990).

Cuando ciertos alimentos son envueltos con películas formadas en solución acuosa o dispersa en agua, se puede requerir una cantidad pequeña de agente humectante para facilitar así la extensión uniforme.

Se pueden incorporar agentes cuando se trata de dar estabilidad a mezclas agua-aceite formadoras de películas. Tales aditivos afectan también a las propiedades de barrera de las películas (Kester y Fennema, 1986).

Así mismo, las propiedades organolépticas, nutricionales y de conservación de los alimentos, pueden realizarse mediante la incorporación de agentes saborizantes, pigmentos, aditivos nutricionales y agentes antimicrobianos o conservadores a las películas comestibles que los envuelven (Baldwin *et al.*, 1995).

1.2.3. Ensayos de evaluación de films y recubrimientos comestibles

El uso adecuado de empaques comestibles depende principalmente de sus propiedades mecánicas y de barrera. La permeabilidad al vapor de agua (WVP) se define como la velocidad de transmisión de vapor de agua por unidad de superficie de una área plana y por unidad de espesor, inducida por unidad de diferencia de presión de vapor entre dos superficies específicas a una temperatura y condiciones de humedad específicas (ASTM, 1995). Es un proceso de sorción y difusión donde el soluto-vapor es adsorbido por una de las caras de la membrana, se difunde al otro lado y después se desorbe por evaporación (Rogers, 1985). El método más utilizado para evaluar esta propiedad

es el método de la copa, basado en técnicas gravimétricas (B.S. 3177, 1959; AFNOR NF H00-030, 1974; ASTM E96, 1980).

El transporte de gases a través de la película o recubrimiento ocurre por dos mecanismos: difusión capilar y difusión activa. La difusión capilar domina en materiales porosos o que tienen imperfecciones. La difusión activa involucra la solubilización del gas permeado en la película, la difusión a través de la película y finalmente, la liberación al lado opuesto de la misma. En ausencia de imperfecciones, el gas permea a través de la película por difusión activa. Si el gas es insoluble en la película, el aumento de presión generado por su acumulación hace que en un momento dado penetre en la película y el mecanismo dominante es el flujo capilar. No se debe confundir la difusión activa con la difusión facilitada, que se refiere al mecanismo que presentan las células vivas. El primero se aplica al proceso de difusión que es dependiente de la temperatura y presenta una cierta energía de activación. La humedad relativa tiene una fuerte influencia sobre la velocidad de transmisión del oxígeno y dióxido de carbono. A mayor humedad relativa, las películas y recubrimientos comestibles presentan mayor permeabilidad a estos gases.

Una combinación de la primera ley de difusión de Fick (Ecuación 1.1) y la ley de Henry de solubilidad (Ecuación

1.2) se utiliza para expresar la permeabilidad en estado estacionario del permeado a través de una barrera no porosa y con imperfecciones no significativas:

$$J = -D \frac{dC}{dX} \quad (1.1)$$

donde J es el flujo permeado, D la difusividad y dC/dX es el gradiente de concentración de permeado en la película. El signo negativo significa que la migración ocurre en la dirección de mayor a menor concentración. Por otro lado, la concentración (C) del permeado en la película es el producto del coeficiente de solubilidad (S) y la presión parcial del permeado del aire adyacente (P) (Ecuación 1.2)

$$C = S \times P \quad (1.2)$$

Combinando ambas expresiones se obtiene la Ecuación 1.3:

$$\text{Permeabilidad} = J \frac{dX}{dP} \quad (1.3)$$

Experimentalmente la permeabilidad se puede obtener a partir de la variación de peso de permeado, en estado estacionario, mediante aplicación de la Ecuación 1.3. El término permeabilidad y coeficiente de permeabilidad en ocasiones se consideran equivalentes (ASTM, 1980). Otro parámetro que se puede determinar es

la velocidad de transmisión del vapor de agua a través del film, a partir de la variación de peso de permeado con el tiempo y por unidad de área del film.

La Ecuación 1.4 describe la habilidad del material para servir como barrera al vapor de agua, donde W_i es la concentración de saturación del vapor de agua a la temperatura de la superficie de la película, W_a es la concentración del vapor de agua a las condiciones del ensayo y J es el flujo de vapor de agua.

$$\text{Resistencia} = W_i - \frac{W_a}{J} \quad (1.4)$$

Las isothermas de sorción de agua de las películas representan la relación en el equilibrio, entre su contenido en agua y la actividad del agua (a_w), a una presión y temperatura constantes. Se describen como la relación entre la cantidad de agua adsorbida en el equilibrio y la actividad de agua (a_w), relacionada con la humedad relativa del entorno a través de la Ecuación 1.5:

$$a_w = \frac{p}{p_0} = \frac{\%HR}{100} \quad (1.5)$$

donde p es la presión de vapor de agua ejercida por el material y p_0 es la presión de vapor del agua pura a la temperatura T_0 que es la temperatura de equilibrio del sistema.

Existen varias ecuaciones matemáticas que describen las isothermas de sorción de agua en diferentes materiales. Uno de los modelos ampliamente aplicado es el BET, que permite determinar la humedad de la monocapa y el parámetro C relacionado con el calor de sorción. No obstante, en general, puede ajustarse únicamente para valores de a_w menores de 0,50-0,60. El más ampliamente usado por su ajuste en todo el intervalo de a_w es el modelo de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer), que tiene tres parámetros: W_0 (valor de humedad de la monocapa), C (constante de Guggenheim relacionada con el calor de sorción de la monocapa) y k (relacionado con el calor de sorción de la multicapa) (Mallikarjunan y Manjeet).

Es importante la evaluación de las propiedades mecánicas de los films y recubrimientos ya que permiten determinar la integridad que presentaran durante su manejo, envasado y transporte (Rowe, 1978). Para evaluar las propiedades mecánicas, como la resistencia a la fractura o la deformabilidad del film, se realizan ensayos de extensión con una máquina universal de ensayos mecánicos (AFNOR NF T51-100,1971; ISO 6239, 1988; ASTM D882, 1988) o el análisis dinámico termomecánico, para evaluar las relaciones entre la fuerza de tensión, elongación, deformación y modulo de elasticidad (Gennadios y Weller, 1993; Park *et al.*, 1993; Debeaufort *et al.*, 1995).

La apariencia es otro de los factores de calidad decisiva para la aceptación de un producto por parte del consumidor, por lo que el color, la translucidez y el brillo, son importantes para evaluar su aplicabilidad de los films como recubrimientos comestibles (Nussinovitch *et al.*, 1996, Cuq *et al.* 1996). Las propiedades ópticas de los films: color, opacidad y brillo son importantes ya que afectan al aspecto del producto recubierto y por tanto determinan la factibilidad de su uso.

Cuando la luz incide sobre la superficie de un objeto, es reflejada, absorbida o transmitida como resultado de las interacciones de la luz-objeto que determinan el color, el brillo y la transparencia que presenta la superficie del objeto (Hutchings, 1999).

El brillo se define como la intensidad de luz reflejada especularmente de una superficie comparado con una intensidad de luz que es reflejada de una superficie estándar conocida a un cierto ángulo de incidencia (ASTM, 1995). Se mide mediante la reflexión especular de la luz sobre una superficie a un determinado ángulo de incidencia. Se determina mediante la relación de la intensidad de la luz incidente reflejada en su punto de impacto en la superficie del producto.

La opacidad del film se puede determinar midiendo el espectro de absorbancia (400-800 nm) de la muestra con

un espectrofotómetro. El área bajo la curva se define como la opacidad de la muestra en nm (Maftoonazad, *et al.*, 2007a). Este parámetro puede dar indicios indirectos de la estructura del film: estructuras rugosas, generalmente son más opacas. La translucidez de un material es un atributo porcentual, es decir es una relación de contraste. Se obtiene aplicando la teoría de Kubelka-Munk (Hutchings, 1999) a los espectros de reflexión de las muestras, obtenidos sobre fondo negro y blanco.

Otras determinaciones de interés son la solubilidad en soluciones acuosas o en solventes, la difusividad de diferentes solutos en la película.

1.2.4. Aplicaciones de recubrimientos

Las aplicaciones que tienen los recubrimientos y películas comestibles son variadas. Se han empleado en carnes, pescados y productos marinos, así como en frutos y vegetales, granos y frutos secos, confitería o alimentos preparados. Así mismo, en la elaboración de películas, bolsas, recipientes y láminas para envasar productos en polvo, deshidratados o de baja actividad del agua (Tharanathan, 2003).

Las características que deben tener las películas y recubrimientos comestibles dependen principalmente de la finalidad con que se apliquen a los alimentos que van a

cubrir. Por ejemplo, para alimentos sensibles a la oxidación se requerirán materiales de baja permeabilidad al oxígeno. La efectividad para controlar la transferencia de masa selectiva es necesaria para permitir el proceso respiratorio o el intercambio de etileno en alimentos como frutos y vegetales. En otros casos es fundamental limitar la deshidratación durante el almacenamiento o evitar la penetración de solutos durante ciertos procesos como en la deshidratación osmótica (Guilbert *et al.*, 1996, Jagannath *et al.*, 2006, Maftoonazad *et al.*, 2007b).

Los recubrimientos y películas comestibles, además de tener propiedades de barrera, deben ser compatibles organoléptica y funcionalmente con el alimento. Estos materiales además de ser selectivos en el transporte de masa también pueden ser activos a través de la incorporación de sustancias antimicrobianas, antioxidantes, etc. que contribuyen a la conservación del producto (Liu *et al.*, 2007a, Hiorth *et al.*, 2006, Mei y Zhao, 2003).

Diferentes autores han estudiado el desarrollo de películas comestibles compuestas a base de carbohidratos, como almidones, quitosano (Hoagland y Parris, 1996) u otros hidrocoloides como proteína de pescado, proteínas lácteas (Letendre *et al.*, 2002) así como el efecto de la incorporación de plastificantes y lípidos en las propiedades del film.

El mucílago del nopal contiene pectinas como componente mayoritario de sus carbohidratos (Cárdenas *et al.*, 2008; Stintzing *et al.*, 2005; Majdoub *et al.*, 2001a; Medina-Torres *et al.*, 2000). Las pectinas han sido estudiadas en su capacidad para formar películas por diferentes autores. Las fuentes de pectina estudiadas han sido las provenientes de cítricos, manzana, plátano (Sothornvit y Pitak, 2007) y algunas bayas (Park y Zhao, 2006). En alguno de estos trabajos (Fang y Hanna, 2000) se elaboró una película con pectina cítrica de alto metoxilo, amilosa y plastificantes, obteniendo un producto flexible, fuerte y térmicamente estable para elaborar bolsas para envasar productos deshidratados en polvo. Los films estudiados por Maftoonazad *et al.* (2007a), fueron elaborados mezclando la pectina con sorbitol y cera de abeja. Estos autores señalan que la permeabilidad al vapor de agua se ve incrementada con la concentración de pectina y sorbitol y decrece con la cera de abeja. La fuerza de tensión aumenta al aumentar el contenido de pectina y disminuir el contenido de sorbitol y el modulo de elasticidad y porcentaje de elongación en la ruptura aumenta cuando aumenta tanto el contenido de pectina como el de sorbitol. Por otra parte la cera de abeja aumenta la opacidad del film a medida que aumenta su contenido. Maftoonazad *et al.* (2007b), con estos mismos ingredientes, elaboraron un

recubrimiento para aguacate con el fin de controlar la propagación o severidad de la enfermedad provocada por *Lasiodiplodia theobromae*.

Liu *et al.* (2007a), desarrollaron films mezclando pectina con gelatina de piel de pescado y harina de soya. Observaron que al incluir proteína en el film, se promueven interacciones moleculares dando como resultado una organización estructural homogénea que permite obtener films más fuertes, disminuyendo la solubilidad en agua y la transmisión de vapor de agua, comparando con films de solo pectina. Liu *et al.* (2007b), en otro estudio, prepararon el film por extrusión a base de pectina y poli-ácido láctico y añadiéndole por difusión un agente antimicrobiano. El poli-ácido láctico es un polímero biodegradable producido por la condensación y polimerización del ácido láctico.

Otra fuente de pectina para elaborar recubrimientos comestibles que se ha estudiado recientemente es el gel de *Aloe vera*, aplicado en uvas dando resultados satisfactorios al mantener por más tiempo sus atributos sensoriales durante el almacenamiento a 1°C (Valverde *et al.*, 2005).

El único trabajo descrito en la literatura sobre el empleo de mucílago de nopal para la elaboración de films o recubrimientos comestibles es el trabajo realizado por Del-Valle *et al.* (2005). En este caso, el recubrimiento era el mucílago exudado por cierto peso de pencas en un

determinado volumen de agua destilada y después filtrado para separar sólidos. El mucílago fue aplicado en fresas por inmersión, obteniendo resultados satisfactorios. En otro orden de cosas, Malainine *et al.* (2005), elaboraron un film termoplástico con microfibras de celulosa extraídas de las células del parénquima de cladodios de *Opuntia ficus-indica* por el método de vaciado y secado. La suspensión de celulosa fue combinada con estireno o con acrilato de butileno, obteniéndose un material de buen aspecto y termoestable.

1.2.5. Interés del presente estudio

A nivel mundial desde hace varias décadas el nopal ha cobrado interés para recobrar las zonas áridas y semiáridas, sobre todo de países en vías de desarrollo. Pero en la mayoría de los casos ha sido desaprovechado desde un punto de vista nutricional y fuente de generación de ingresos, por lo que la FAO desde los años 90 ha impulsado programas para promover el aprovechamiento integral de este cultivo. En el caso especial de México este cultivo se ha aprovechado en todas sus facetas de explotación, aunque hay más de 500 mil hectáreas de nopal sembradas y más de 3 millones de hectáreas silvestres (sin aprovechar) (www.sagarpa.gob.mx) las cuales no se cosechan en su totalidad principalmente por falta de demanda. Aguascalientes es el

primer productor de nopal forrajero en México, con más del 90% de la producción nacional. Por lo anteriormente expuesto, el propósito del presente trabajo es estudiar un posible uso alternativo del nopal y en particular del mucílago de éste, ya que hasta el momento ha sido una limitante para su industrialización.

El desarrollo de recubrimientos comestibles para mejorar la calidad y/o aumentar la vida útil de los diferentes tipos de alimentos no ha perdido interés con el tiempo. Más bien se ha incrementado, siendo un reto buscar nuevas fuentes de materiales biológicos y biodegradables que ayuden a cubrir las necesidades actuales en este ámbito. Ya que el mucílago de nopal es considerado un hidrocoloide, sustancia formadora de matrices, característica necesaria para poder obtener un film, se pensó en evaluar su capacidad de formar films y recubrimientos, así como sus propiedades de barrera y físicas para determinar su potencial uso en productos mínimamente procesados. La elección de este material no solamente fue por buscar otra alternativa de uso a este cultivo, como se mencionó anteriormente, sino también porque en los últimos años el mucílago está siendo estudiado en relación a las propiedades funcionales que tradicionalmente, por costumbre, se le han atribuido, dando un beneficio más al consumidor al ingerir este recubrimiento.

El presente trabajo se divide básicamente en dos capítulos. En el primero se plantean las metodologías alternativas para la obtención de la materia prima que se utilizará para formular los films y recubrimientos. Se evaluarán las características químicas y físicas para los extractos obtenidos de cada procedimiento con el fin de seleccionar el procedimiento de obtención de mucílago con las mejores características para elaborar las formulaciones formadoras de films y recubrimientos. En el siguiente capítulo, se diseñarán las formulaciones formadoras de films, evaluando para cada caso: las propiedades de barrera al vapor de agua, solubilidad, las propiedades mecánicas y las propiedades ópticas (color, translucidez y brillo) a tres HR de equilibrio diferentes. A partir de los resultados obtenidos se seleccionarán algunas de las formulaciones estudiadas para su aplicación en un producto mínimamente procesado. En esta última etapa se evaluará al producto cubierto, pérdida de peso, textura y color durante el almacenamiento a 4°C.

Para la aplicación de los recubrimientos se selecciona un producto de interés regional, como lo es la jícama.

La jícama es la raíz de una leguminosa tropical (*Pachyrhizus erosus* (L) Urban), originaria de México y Centroamérica. La palabra jícama tiene su origen en la palabra náhuatl *xīcama* o *xīcamatl*. También Brasil, Estados

Unidos, China, Indonesia, Filipinas y Nigeria tienen una producción importante. Esta raíz tiene una epidermis de color café claro, su pulpa es blanca con textura crujiente, succulenta y sabor dulce-almidonoso. En México se consume principalmente fresca, aunque también en conservas con vinagre. En los países asiáticos se utiliza en sopas, frita o para la obtención de zumo. El tubérculo contiene de 86 a 94% de agua (Sorensen, 1990; Heredia, 1996), vitamina C (25% de la IDR), calcio, fósforo, potasio, hierro y trazas de proteína y lípidos. Su sabor dulce proviene de la oligofructosa o inulina. Su contenido calórico es de 39 kcal/100 g (Noman *et al.*, 2007). Se considera un alimento de fácil digestión y ayuda a reducir la actividad estomacal cuando éste se encuentra vacío. La Figura I.2 muestra el tubérculo de la jícama, vista externa e interna.



Figura I.2. Jícama. Vista externa e interna.

La jícama es muy sensible a los daños por frío, perdiendo su textura crujiente y decolorándose, de manera

que la pulpa se vuelve translúcida, (Mercado *et al.*, 1998). Estudios realizados en jícama precortada demuestran que ésta es menos sensible a daños por frío que la raíz íntegra (Aquino-Bolaños *et al.*, 2000). La superficie de las piezas precortadas presenta cambios de color debido a un pardeamiento enzimático y estos cambios se presentan más rápidamente cuando se utilizan jícamas previamente almacenadas en frío (Mercado-Silva y Cantwell, 1998). Un trabajo posterior de Cantwell *et al.* (2002) señala que el cambio de color viene acompañado del incremento de lignina en los trozos de jícama refrigerada.

Ya que la jícama se consume básicamente en fresco, resulta interesante la preparación de productos mínimamente procesados. Una jícama precortada de alta calidad es aquella que se mantiene blanca, crujiente, jugosa y con sus cualidades sensoriales sin cambios perceptibles para el consumidor. Para mantener estos atributos en jícama cortada, la aplicación de recubrimientos comestibles que frenen la deshidratación y los cambios de color es una alternativa interesante y no hay estudios previos. En este sentido, la aplicación del mucílago de nopal como recubrimiento podría conseguir estos objetivos y en este trabajo se plantea este estudio.

II. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO

2.1. Objetivo general:

Optimizar el método de extracción del mucílago del nopal (*Opuntia ficus-indica* var. *Forrajera*) y estudiar su posible utilización como recubrimiento comestible en productos alimentarios.

2.2. Objetivos específicos:

- Determinar la composición química del mucílago del nopal extraído por diferentes procedimientos (con y sin etapas de escaldado y blanqueado), mediante análisis cromatográfico y proximal, para caracterizar el material extraído.
- Caracterizar las propiedades reológicas de los diferentes mucílagos del nopal en función de la concentración, temperatura y pH.
- Seleccionar el método de extracción del mucílago más adecuado en base a los resultados obtenidos en la caracterización.
- Caracterización del comportamiento del mucílago frente a la sorción de agua y del estado físico de la matriz amorfa en función del contenido en humedad, así como de la influencia de la incorporación de lípidos a la matriz en estas relaciones.
- Evaluar la capacidad del biopolímero extraído por el método seleccionado para la elaboración de películas

comestibles, a través de la caracterización de las propiedades más relevantes para su uso: propiedades barrera, mecánicas, solubilidad en agua y ópticas, con el propósito de conocer su potencial aplicación en alimentos.

- Evaluar el efecto de la adición de lípidos (ácidos grasos) en las propiedades de las películas obtenidas.
- Evaluar la funcionalidad de las películas estudiadas al aplicarlas como recubrimiento en cubos de jícama, mediante la evaluación de algunos parámetros de calidad del producto recubierto durante el almacenamiento: pérdida de peso, propiedades mecánicas y color.

2.3. Plan de trabajo

Hipótesis del trabajo.

- El método de extracción influye en las características físicas y químicas del mucílago obtenido.
- Las características físicas y químicas del mucílago del nopal son apropiadas para poder elaborar recubrimientos y/o películas comestibles en base a ese biopolímero.
- Los recubrimientos y/o películas comestibles elaboradas a base del biopolímero del nopal y determinados aditivos

tienen las características apropiadas para ser aplicadas en productos alimentarios.

- Las películas y/o recubrimientos aplicados en jícama mínimamente procesada mejorarán la estabilidad y la calidad del producto alargando la vida útil.

Plan de trabajo.

2.3.1 Se procederá a la extracción del mucílago por cuatro métodos diferentes. Se partirá del método tradicional que será modificado en algunas de sus etapas, tratando de evitar la formación del color pardo que lo caracteriza. En concreto se estudiará la incorporación de etapas de pelado de la penca, escaldado, decolorado y cocción. Se empleará nopal forrajero joven proveniente del Área Agrícola del Centro Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, México.

2.3.2. Los diferentes mucílagos obtenidos se analizarán en cuanto a composición y pureza, haciendo un muestreo aleatorio en cada lote obtenido, perfectamente homogenizado. Se realizará una caracterización de las propiedades reológicas. Por una parte, se analizará la viscosidad intrínseca y por otra se evaluará el comportamiento al flujo trabajando con disoluciones de diferente concentración de mucílago (1, 2.5, 5, 7.5 y 10%) y

a diferentes temperaturas (5, 15, 25, 40, 55 y 70°C). Por último, se medirá el color de los diferentes extractos.

2.3.3. En función de las características anteriores, se seleccionará el procedimiento de extracción del mucílago más adecuado para la preparación de los recubrimientos.

2.3.4. Se determinarán las relaciones humedad-actividad del agua-temperatura de transición vítrea de muestras del mucílago extraído por el procedimiento seleccionado, analizándose el efecto de la incorporación de lípidos (ácido oleico) sobre estas relaciones.

2.3.5. Se optimizará la concentración de mucílago más adecuada en medio acuoso para la obtención de películas. Las películas obtenidas se caracterizarán en cuanto a su solubilidad en agua, propiedades mecánicas, propiedades ópticas y permeabilidad al vapor de agua, en función del contenido en humedad.

2.3.6. Se prepararán películas compuestas del mucílago con diferentes lípidos, uno líquido a temperatura ambiente (ácido oleico) y otro sólido (ácido esteárico) y se caracterizarán en las mismas propiedades, para analizar las

posibles mejoras introducidas en las propiedades funcionales del film.

2.3.7. Algunas de las formulaciones obtenidas se aplicarán como recubrimientos en cubos de jícama proveniente del mercado agropecuario, con calidad visual homogénea, para analizar su efecto protector frente a las pérdidas de calidad en un producto vegetal cortado. Se analizarán aspectos como la pérdida de peso durante el almacenamiento en condiciones controladas y los cambios de color y textura del producto recubierto en comparación con el control sin recubrir.

III. EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL MUCÍLAGO DEL NOPAL

3.1. Materiales y Métodos

3.1.1. Métodos de extracción

Para obtener el material de estudio (mucílago) se utilizaron pencas de nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) cultivado en el Área Agrícola del Centro de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, México. Se seleccionaron pencas de un año para realizar la extracción del mucílago. La Figura III.1 muestra los cuatro procedimientos que se siguieron para obtener el mucílago del nopal forrajero, llamados “ESCALDADO” (ESC), “ENTERO” (ENT), “DECOLORADO” (DEC) y “COCIDO” (COC). El objetivo de modificar el procedimiento tradicional de extracción (ENT), fue para conseguir obtener un producto lo más blanco posible y no color café claro. Las hipótesis que se tenían para justificar el color marrón del mucílago obtenido por el método tradicional eran que se debía a la oxidación de la clorofila o a una oxidación enzimática de los polifenoles presentes en la penca. Por eso se estudió la conveniencia de adicionar algunos pasos más al proceso, como la eliminación de la cutícula (donde se encuentra el mayor contenido de clorofila) y bien el escaldado del nopal molido o bien el decolorado y así eliminar ese problema. Además en el caso del COC, se buscó evaluar la posibilidad de utilizar un subproducto de la industria de conservas de este producto.

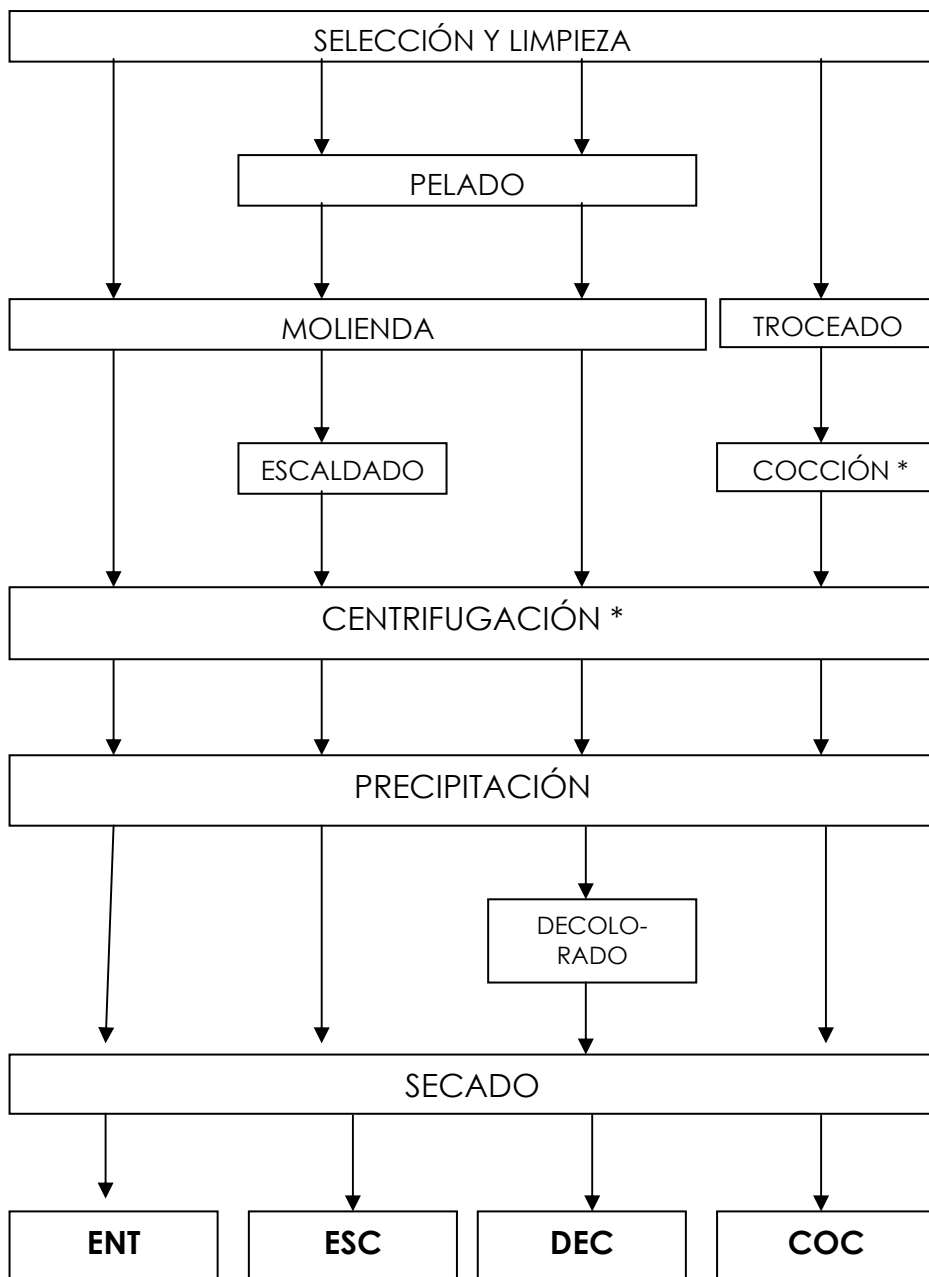


Figura III.1. Diagrama de bloques de los diferentes procesos de extracción de mucílago de nopal utilizados en el estudio.
*Después de estas etapas se elimina el residuo sólido y se continúa con el líquido.

Las condiciones de cada una de las etapas del proceso fueron las siguientes:

- Las pencas se cosecharon siempre por la mañana, ya que la acidez de éstas varía según la hora de cosecha por tratarse de plantas con Metabolismo Ácido de las Crasuláceas (CAM) (Corrales-García *et al.*, 2004; Goldstein y Nobel, 1991).
- El lavado se realizó con agua potable y las pencas se cepillaron para eliminar las espinas y facilitar su manipulación.
- El pelado se hizo manualmente con cuchillo, tratando de eliminar la menor cantidad de pulpa junto con la piel.
- Se mezclaron partes iguales de nopal y agua destilada para facilitar la molienda. Se utilizó una licuadora industrial de acero inoxidable (Modelo LI-17) a 3500 rpm hasta la total molienda de las pencas.
- El escaldado del producto molido se hizo a 80°C durante 5 min, mientras que la cocción del producto troceado (piezas de aproximadamente 5 cm de lado) en agua destilada (proporción 1:5, nopal:agua) se realizó a ebullición durante 30 min.
- Las condiciones de centrifugado para la fase acuosa de la extracción fueron 5000 rpm, 30 min.
- La precipitación del mucílago de la fase acuosa de la extracción se llevó a cabo por incorporación de

acetona en una relación 1:3 (solución acuosa:solvente) que provoca la insolubilización de los polímeros. El precipitado del mucílago se separó por filtración.

- La decoloración en el caso del extracto no escaldado se realizó dispersando el precipitado en la mínima cantidad posible de una solución de hipoclorito de sodio al 12% con agitación suave durante 1h. Posteriormente se separó de nuevo el precipitado por filtración y se lavó con etanol para eliminar el exceso de agua y facilitar el secado.
- El secado del precipitado consistió en la eliminación del solvente orgánico por aplicación de vacío en un desecador.

3.1.2. Caracterización química de los mucílago

A todos los mucílago obtenidos se les determinó el contenido de macrocomponentes. El contenido de minerales solamente se realizó para en los extractos ESC, ENT, DEC. La composición de azúcares y peso molecular únicamente en el ESC. El contenido de pectinas y sus fracciones, compuestos fenólicos totales y actividad antioxidante se determinaron a los mucílago ESC, ENT y COC.

3.1.2.1. Macrocomponentes

Las determinaciones se hicieron en todos los casos por triplicado a cada unos de los mucílagos. La humedad se determinó por el método de secado en estufa a 105°C hasta peso constante. Las cenizas se obtuvieron calcinando a 600°C hasta peso constante (4 a 6 h). La grasa se extrajo por el método de Golfish, utilizando éter de petróleo como solvente de extracción. Para la fibra se aplicó el método de Kennedy que consiste en un tratamiento ácido y otro alcalino, en cada etapa se separan los compuestos solubles de los insolubles. La proteína se cuantificó por el método de Dumas de combustión interna con el equipo Leco FP 528, utilizando CO₂ como gas portador; se partió de las muestras deshidratadas. Todos estos métodos se recogen en el A.O.A.C. (2000).

3.1.2.2. Minerales

La determinación de minerales se hizo a partir de las cenizas, obtenidas por el método descrito en el apartado anterior, con un espectrofotómetro de absorción atómica marca Abanta Sigma, modelo DGBC. Las cenizas se diluyeron en agua desionizada para su lectura. Los iones determinados fueron Ca²⁺, Na⁺, K⁺ y Mg²⁺. Para cada uno se realizó una curva patrón a partir de soluciones ácidas (4% de HNO₃) de cada uno de los estándares comerciales

preparadas a 1000 ppm. El quemador utilizado para Ca^{2+} y Mg^{2+} fue de óxido nitroso-acetileno y para el Na^+ y K^+ de aire-acetileno. Las longitudes de onda usadas fueron: Ca^{2+} a 422,7 nm, K^+ a 404,4 nm, Na^+ a 330,2 nm y Mg^{2+} 202,6 nm.

3.1.2.3. Composición de azúcares y peso molecular

La composición de azúcares se determinó por HPLC (Beckman Modelo 110B) sólo en el mucílago ESC hidrolizado. Se usó una columna Waters de 60 °A, con un diámetro de 4 μm , empacada con aminopropilsalicilato unido a sílica amorfa. Como fase móvil se utilizó acetronitrilo-agua a 25°C. Con el HPLC se usó un detector de índice de refracción (Perkin-Elmer, modelo LC-30) y un integrador (Varian Modelo 4400). Una muestra de 10 mg de mucílago en polvo seco fue hidrolizada con ácido sulfúrico 1 M (2 ml) a 80°C durante 24 h y se enfrió a temperatura ambiente para su análisis. Los resultados se compararon con los siguientes estándares: L-arabinosa, L(+)-ramnosa monohidratada, D-galactosa y D-xilosa, todos ellos de grado reactivo (Medina-Torres *et al.*, 2000).

El peso molecular del mucílago escaldado fue estimado por HPLC (Perkin-Elmer Modelo 250), equipado con una columna G 2000 SW (TSK-GEL), un detector de índice de refracción, IR (Perkin-Elmer series 200) y un integrador (Spectra-Physics, modelo SP4270). Se usó una

velocidad de flujo de 0,7ml/min. Se usaron como estándares dextranos grado comercial de peso molecular de 50.000 a 870.000 D. Para su análisis el mucílago se disolvió en agua desionizada y se filtró la solución (Medina-Torres *et al.*, 2000).

3.1.2.4. Determinación de pectinas

El contenido en pectinas se determinó por el método descrito por Yu *et al.* (1996), a través de la separación de diferentes fracciones por solubilidad y cuantificación en cada una del contenido en ácido galacturónico.

Pectinas solubles en agua **(PSA)**: Se adicionaron 20 ml de agua destilada a 80 mg de mucílago seco para obtener la PSA, agitando por un minuto y centrifugando a 4.000 rpm durante 10 min, recolectando el sobrenadante en un matraz aforado de 100 ml. El proceso de extracción se repitió dos veces. Se aforó con agua destilada.

Pectinas oxalato solubles **(POS)**: El residuo anterior se dispersó con 20 ml de solución acuosa que contenía 0,25% de oxalato de amonio y 0,25% de ácido oxálico. Se mantuvo a reflujo durante una hora en ebullición. Se enfrió y se centrifugó en las mismas condiciones anteriores. El sobrenadante se recolectó en un aforado de 100 ml. Se repitió el procedimiento y se utilizó agua destilada para aforar.

Pectinas totales **(PT)**: Se añadieron 2 ml de ácido sulfúrico concentrado a 5 mg de mucílago seco con agitación suave con posterior adición, gota a gota de 0,5 ml de agua destilada. Se agitó durante 10 min, se filtró y el filtrado se colocó en un aforado de 25 ml, utilizando agua destilada para el aforo. Se dejó reposar 24 h para su medición. En caso necesario se filtró nuevamente.

Pectinas no extraíbles **(PNE)**: Se obtuvieron por diferencia de PT-PSA-POS.

El contenido de ácido galacturónico (AGU) en las diferentes fracciones pécticas fue determinado mediante el método espectrofotométrico de determinación cuantitativa de ácidos urónicos propuesto por Kintner y Van Buren (1982), el cual se basa en la reacción de AGU con el reactivo cromóforo m-hidroxidifenil para dar un compuesto coloreado, que tiene un máximo de absorbancia en la longitud de onda correspondiente a 520 nm.

3.1.2.5. Polifenoles totales y actividad antioxidante

La extracción de polifenoles de los mucílagos se realizó con metanol al 80% en HCl 6N, en una relación de 1 g con 10 ml de solución. Se hicieron las diluciones con agua Milli-Q (Pastrana-Bonilla *et al.*, 2003). La determinación se hizo colorimétricamente usando el reactivo Folin-Ciocalteu y ácido gálico como estándar (Re *et al.*, 1999). La

absorbancia se midió a 765 nm. El contenido de polifenoles totales se expresó en equivalentes de ácido gálico en mg/g de muestra seca.

La capacidad antioxidante se determinó mediante el ensayo del equivalente Trolox (TEAC). Para ello, se preparo la disolución del radical catiónico (ABTS^{•+}) mediante la mezcla de 9,6 ml de una disolución 7 mM de ABTS (ácido 2,2'-azinobis-(3-etilbenzotiazoline-6-sulfónico) y 0,066 g de persulfato de potasio (concentración final 2,42 mM). Esta se dejo reposar 16 h para la liberación del radical. Parte se diluyó con etanol hasta obtener una absorbancia de 0.70 ± 0.02 a 734 nm. Se obtuvo la curva patrón de % de Inhibición para el Trolox (ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroma-2-carboxílico) midiendo 10 µl de disoluciones de diferentes concentraciones (5 a 100 ppm) con 1 ml de la solución de ABTS^{•+}. Como blanco se utilizo 1ml de solución de ABTS^{•+} con 10 µl de etanol. La medida de absorbancia a 734 nm se realizó entre 1-6 min después de la mezcla. El % de inhibición se calculó del cociente entre la diferencia de absorbancia entre el blanco y la muestra y la absorbancia del blanco.

Para los extracto metanólico obtenidos en el punto anterior de las muestras de mucílago se determino el % de inhibición, mezclando 10 µl del extracto con 1 ml de la disolución de ABTS^{•+}. El porcentaje de inhibición obtenido se

transformo en Trolox equivalentes (ppm) con la curva patrón (Re *et al.*, 1999).

3.1.3. Caracterización física

3.1.3.1. Color

Se utilizó un colorímetro Minolta modelo CR-400/410 para determinar las coordenadas CIEL*a*b* utilizando el sistema de referencia iluminante D₆₅ y observador a 10°. Las mediciones se hicieron por triplicado en cada uno de los mucílago extraídos en forma de polvo seco, tamizado y compactado por vibración en la cápsula de medida.

A partir de las coordenadas L*a*b* se determinaron, utilizando las Ecuaciones (III.1), (III.2) y (III.3), los atributos de color tono (h^*_{ab}) y croma (C^*_{ab}), así como la diferencia de color entre muestras:

$$h^*_{ab} = \arctg \frac{b^*}{a^*} \quad (III.1)$$

$$C^*_{ab} = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})} \quad (III.2)$$

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})} \quad (III.3)$$

3.1.3.2. Comportamiento reológico

3.1.3.2.1. Viscosidad intrínseca

La viscosidad intrínseca se determinó preparando diluciones de mucílago de concentración (C) 0.1, 0.125, 0.15 y 0.175 g/100 ml en agua destilada. Se usó un viscosímetro capilar modelo Cannon-Flenske número 50 inmerso en un baño de agua a $25^{\circ}\text{C} \pm 0.05$ para medir el tiempo de caída (t) de cada una de las soluciones. Las determinaciones se hicieron por triplicado. También se hicieron las evaluaciones con agua destilada (t_0). Para determinar la densidad de cada solución (ρ) y del agua (ρ_0) se utilizó un picnómetro de vidrio. Con los datos obtenidos se calculó la viscosidad relativa (η_{rel}), viscosidad específica (η_{sp}), viscosidad inherente (η_{inh}) y viscosidad reducida (η_{red}), aplicando las Ecuaciones III.4 a III.7:

$$\eta_{rel} = \frac{t \times \rho}{t_0 \times \rho_0} \quad \text{(III.4)}$$

$$\eta_{sp} = \eta_{rel} - 1 \quad \text{(III.5)}$$

$$\eta_{inh} = \frac{\ln \eta_{rel}}{c} \quad \text{(III.6)}$$

$$\eta_{red} = \frac{\eta_{sp}}{c} \quad \text{(III.7)}$$

La viscosidad intrínseca $[\eta]$ de cada mucílago se obtuvo mediante el ajuste lineal de las ecuaciones de Huggins y Kraemer (Ecuaciones III.8 y III.9) a los datos de η_{inh} y η_{red} en función de C. En estas ecuaciones, K_H y K_K se

corresponden con las constantes de Huggins y Kraemer, respectivamente. El valor de la viscosidad intrínseca corresponde a la ordenada en el origen en ambos ajustes.

$$\eta_{red} = [\eta] + K_H[\eta]^2 C \quad (III.8)$$

$$\eta_{inh} = [\eta] + K_K[\eta]^2 C \quad (III.9)$$

3.1.3.2.2. Comportamiento al flujo

Se prepararon soluciones acuosas de los mucílagos a diferentes concentraciones en el intervalo de 1 a 10 g de ss por 100g de disolución, disolviendo el biopolímero seco en agua destilada con agitación durante 20 min a una velocidad de 8.000 rpm. Para todas las medidas reológicas, los valores reportados son los valores medios de tres repeticiones.

Se obtuvieron las curvas de flujo para los mucílagos a las diferentes concentraciones en un reómetro de esfuerzo controlado (Haake, RS1) usando un sistema de cilindros concéntricos (z34, DIN 53019, serie 1 c222-1499) y con un baño con control de temperatura (Haake, Phoenix 2). Se trabajó en un intervalo de gradiente de velocidad de 0 a 300 s⁻¹. Todas las muestras se caracterizaron a diferentes temperaturas: 5, 15, 25, 40, 55 y 70 °C.

En el caso del mucílago escaldado se estudió además, el comportamiento al flujo de la muestra a 25°C y

al 5% (p/p) de concentración a diferentes pHs (2-11), utilizando para ello los siguientes medios tamponantes: C₆H₆O₇/HCl/NaCl (0,07M/0,02M/0,02M), C₆H₈O₇/NaOH (0,04M/0,02M), C₆H₈O₇/NaOH/NaCl (0,013M/0,03M/0,014M), C₆H₈O₇/NaOH (0,096M/0,2M), C₆H₈O₇/NaOH (0,06M/0,16M), KH₂PO₄/Na₂HPO₄ (0,026M/0,04M), Na₂B₄O₇/HCl (0,013M/0,021M), Na₂B₄O₇/HCl (0,013M/0,005M), Na₂B₄O₇/NaOH (0,013M/0,018M) y H₃BO₃/NaOH (0,1M/0,018M), respectivamente de Laboratorios químicos Sigma Aldrich, Alemania.

La variación del esfuerzo de corte con el gradiente de velocidad, proporcionada por las curvas de flujo de los diferentes mucílago a diferentes concentraciones y diferentes temperaturas, se ajustó al modelo de Ostwald-de-Waele (Ecuación III.10)

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad \text{(III.10)}$$

donde K es el índice de consistencia (Pa sⁿ) y n el índice de comportamiento al flujo.

La dependencia de la viscosidad con la temperatura se ajustó a una ecuación tipo Arrhenius (Ecuación III.11):

$$\eta = A \exp \left[\frac{E_a}{RT} \right] \quad \text{(III.11)}$$

donde E_a es la energía de activación, A una constante de ajuste y R 1.978 cal/K · mol.

La dependencia de la viscosidad con la concentración se ajustó con una ecuación tipo potencial (Ecuación III.12) y otra tipo exponencial (Ecuación III.13):

$$\eta = \alpha \times C^{\beta} \quad \text{(III.12)}$$

$$\eta = \alpha \exp(\beta \times C) \quad \text{(III.13)}$$

Se estudió la variación de la viscosidad con la concentración y con la temperatura, simultáneamente, aplicando la ecuación propuesta por Pagan i Gilabert, 1996 (Ecuación III.14):

$$\eta = \alpha C^{\beta} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad \text{(III.14)}$$

donde α y β y E_a son los parámetros de ajuste del modelo.

3.1.3.3. Isotherma de sorción

Al mucílago escaldado se le determinó la humedad por secado en estufa (60°C) a vacío. Adicionalmente, se colocaron aproximadamente dos gramos de mucílago escaldado en crisoles de vidrio, que fueron colocados, a temperatura de 20°C, en frascos herméticos que contenían disoluciones saturadas de las siguientes sales: LiCl, C₂H₃O₂K, Mg(Cl)₂, K₂CO₃, Mg(NO₃)₂, CuCl₂ y NaCl. De esta forma se aseguraron ambientes con las siguientes humedades relativas (HR): 11, 23, 33, 43, 52, 63 y 75%, respectivamente.

Las muestras fueron pesadas periódicamente hasta alcanzar peso constante (diferencia entre pesadas < que 0,0001 g). En ese momento la actividad del agua (a_w) de cada muestra es igual a la HR/100 de la cámara donde se ha equilibrado y la humedad de equilibrio (x_w) se calculó a partir del peso de agua adsorbida o perdida, según el caso, hasta alcanzar el equilibrio y teniendo en cuenta la humedad inicial del mucílago. Los datos experimentales (x_w , g agua/g s.s., - a_w) se ajustaron al modelo de GAB (Ecuación III.15) y al modelo de BET (Ecuación III.16)

$$w_e = \frac{K \times w_0 \times C \times a_w}{(1 - K \times a_w)(1 + (C - 1)) \times K \times a_w} \quad \text{(III.15)}$$

donde: w_e , humedad de equilibrio (g agua/g s.s.); W_0 , humedad de monocapa (g agua/g s.s.); C , constante relacionada con el calor de sorción de la monocapa; K , factor relacionado con el calor total de sorción de la multicapa, a_w , actividad de agua.

$$w_e = \frac{w_0 C a_w}{(1 - a_w)(1 + (C - 1)) a_w} \quad \text{(III.16)}$$

donde a_w es la actividad de agua; w_e , humedad de equilibrio (g agua/g s.s.); w_0 , humedad de monocapa (g agua/g s.s.) y C una constante relacionada con el calor de sorción de la primera capa.

Este mismo análisis se realizó para una mezcla de mucílago-ácido oleico en una proporción de 1:0,35. La dispersión acuosa de ambos componentes se liofilizó y la mezcla seca se colocó en las cámaras en las mismas condiciones que para el mucílago puro.

3.1.3.4. Determinación de la temperatura de transición vítrea

El análisis de la temperatura de transición vítrea se realizó por calorimetría diferencial de barrido (DSC) con un equipo DSC-220CU (Seiko Instruments Inc.). Las muestras acondicionadas a las diferentes humedades relativas mencionadas en el apartado anterior se colocaron en las cápsulas en el calorímetro y se sometieron al siguiente barrido de temperaturas: de 25 a 80°C, de 80 a -100°C y de -100 a 100°C, todo a 10°C/min (Medina-Torres *et al.*, 2006). Se consideró como temperatura característica de transición vítrea (T_g) al punto medio de la transición observada en el último calentamiento. Los datos experimentales (T_g-x_w) se ajustaron al Modelo de Gordon y Taylor (Ecuación III.17).

$$T_g = \frac{x_w T_{gW} + k_{GT} x_s T_{gS}}{x_s + k_{GT} x_w} \quad \text{(III.17)}$$

donde: T_g es la temperatura de transición vítrea a cierto contenido de humedad; x_w es el contenido de humedad (g agua/g muestra) y x_s es el contenido de sólidos en la

muestra ($x_s=1-x_w$); T_{gw} es la temperatura de transición vítrea del agua pura (-135 °C), T_{gsa} es la del sólido anhidro y k_{G-T} es el coeficiente de Gordon y Taylor.

3.2. Resultados y Discusión

3.2.1. Extracción

Los rendimientos de extracción del mucílago escaldado y decolorado fueron de 0,66 g/100g de nopal fresco; el del mucílago entero de 0,85 g/100g y el del mucílago cocido de 0,33 g/100g. La disminución del rendimiento en el mucílago escaldado y decolorado puede atribuirse a que durante el pelado del nopal se elimina también una fracción de pulpa que también contiene el mucílago. En el caso del mucílago cocido el rendimiento tan bajo puede deberse a que el mucílago se encuentra contenido dentro de células especializadas y el simple troceado de la penca previo a la cocción, no resulta tan eficiente como la molienda para la liberación del hidocoloide en las etapas posteriores. Algunos valores encontrados en la bibliografía respecto a rendimientos de extracción del mucílago de nopal son, por ejemplo, el de Cárdenas *et al.* (1997), que reportan un rendimiento de 0,07 g/100g nopal fresco. Sepúlveda *et al.* (2007) obtuvieron rendimientos entre 1,3-1,6 g/100 g nopal fresco en función del volumen de agua, temperatura y tiempo de extracción.

Majdoub *et al.* (2001b) publican un rendimiento de 0,085 g mucílago purificado/100 g de pulpa fresca, donde se eliminaron proteínas y minerales mediante ultrafiltración. Vargas-Rodríguez (2003), propone una metodología simple para aumentar el rendimiento de extracción de 0,3 a 1,0 g/100 g, valores parecidos a los obtenidos en este trabajo. El proceso de extracción que él propone es muy similar al proceso descrito como ENT en el presente trabajo.

3.2.2. Características químicas

La Tabla III.1 muestra los datos experimentales obtenidos para la caracterización de macrocomponentes de los cuatro mucílagos obtenidos. Como se puede observar el grado de pureza de los mucílagos no es muy alto en ningún caso, situación lógica ya que no se realizó la purificación del extracto a fin de obtener un producto lo más natural posible, que conservara al máximo sus propiedades funcionales.

El contenido de carbohidratos para todos los casos fue de alrededor del 70g/100g ss. El contenido de proteínas y lípidos residuales puede ser beneficioso cuando se utilice el mucílago para desarrollar el film o recubrimiento ya que como se sabe, las proteínas pueden tener capacidad emulsionante y, con frecuencia, son incorporadas como

aditivos emulsionantes a las dispersiones formadoras de films y recubrimientos.

Tabla III.1. Valores promedio y desviación estándar del porcentaje en peso de los diferentes macrocomponentes del mucílago del nopal en los diferentes procesos de extracción.

Porcentaje	ESC	ENT	DEC	COC
Carbohidratos	72,9±1,7 a	68,9±0,9 b	72,6±0,0 a	74,8±0,1 c
Fibra cruda	0,6±0,1 a,b	1,3±0,6 a	0,1±0,0 b	0,1±0,0 b
Proteínas	4,0±0,3 a	3,0±0,1 b	3,7±0,0 a	3,9±0,1 a
Grasa	0,6±0,1 a	0,9±0,0 b	0,8±0,0 b	0,7±0,0 a
Cenizas	21,9±1,8 a	25,9±0,7 b	22,8±0,1 a, b	20,5±0,2 a

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

Comparando los diferentes mucílagos, se puede observar que el proceso ENT da un producto con una composición más diferente al resto, siendo, en general, menor su contenido en carbohidratos y proteínas y mayor su contenido en fibra, grasa y cenizas. Por su parte, los productos obtenidos en los procesos ESC y COC son los más similares en composición. Sepúlveda *et al.* (2007) reportan valores más altos de proteínas y cenizas, siendo estos de, 7,6 y 39,3 g/100 g s.s., respectivamente. En este trabajo utilizan una proporción de agua de 4 a 6 veces mayor para la extracción, lo que no solamente permite aumentar el rendimiento ya comentado sino también la extracción de mayores cantidades de los otros compuestos ligados al mucílago.

Como el contenido de cenizas fue muy alto en los extractos, se consideró de interés cuantificar los minerales que se encuentran en mayor cantidad. La Tabla III.2 muestra el contenido de Ca^{2+} , Na^+ , K^+ y Mg^{2+} en los mucílago. Los resultados obtenidos sugieren que la técnica de extracción afecta al contenido de minerales del mucílago. El tratamiento térmico aplicado al mucílago escaldado parece que fija el calcio a la cadena del polímero, evitando su eliminación durante la etapa de precipitación. El comportamiento que presentaron el sodio y el potasio fue el opuesto al del calcio, es decir, parece que el calor promueve que estos minerales se solubilicen en la fase acuosa durante la etapa de precipitación. El drástico aumento del contenido de Na^+ en el mucílago DEC seguramente se debe a que durante la etapa de decoloración absorbió este mineral presente en la solución de hipoclorito de sodio utilizada. Por su parte, el Mg^{2+} está asociado a la clorofila por lo que la menor cantidad de este mineral se encontró en los extractos a partir de pencas peladas. Sepúlveda *et al.* (2007), en la caracterización de mucílago de nopal encontraron un contenido de K^+ y de Ca^{+2} de 1.892 y 12.044 mg/100 g s.s., respectivamente, valores que son bastante diferentes a los encontrados en este trabajo. No obstante, si se considera el contenido en minerales citado por Stinzing y Carle (2005) para la pencia

de nopal, de 1.953, 1.094 y 23 mg/100g s.s. de K⁺, Ca²⁺ y Na⁺ respectivamente, los valores anteriores no podrían tomarse como referencia.

Tabla III.2. Valores promedio y desviación estándar de minerales (mg/100g s.s.).

Mineral	ESC	ENT	DEC
Ca²⁺	59,9 ± 0,5 a	2,6 ± 0,0 b	9,3 ± 0,1 c
Mg²⁺	No detectado	8,4 ± 0,1 a	0,2 ± 0,0 b
K⁺	231,5 ± 1,4 a	894,2 ± 2,5 b	37,6 ± 0,4 c
Na⁺	0,4 ± 0,0 a	7,4 ± 0,1 b	61,5 ± 0,5 c

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

En la Tabla III.3 se muestran los resultados de la composición de azúcares del hidrolizado del mucílago escaldado. Como se puede observar, el monómero mayoritario es la arabinosa, seguido de la xilosa y galactosa. El peso molecular promedio de los carbohidratos presentes en este mucílago fue de $3,2 \times 10^5$ Daltons. Este último resultado es muy similar a los reportados por Medina-Torres *et al.* (2000) y Majdoub (2001b). No obstante, como se mencionó en el Capítulo I, hay datos de otros autores que han estudiado este mucílago que dan valores muy diferentes para el peso molecular debido, no solamente al grado de purificación y a la técnica utilizada para la determinación, sino también al origen de la materia prima y otras cuestiones relacionadas con el cultivo.

Tabla III.3. Composición de azúcares en el hidrolizado del mucílago obtenido en el proceso de escaldado (ESC).

COMPONENTE	% EN MOLES
Arabinosa	44,54
Galactosa	18,16
Xilosa	23,98
Ramnosa	6,58
Ácido galacturónico	6,80

En la Tabla III.4 se muestran los datos obtenidos en la determinación de pectinas totales y sus fracciones en los mucílagos obtenidos en los procesos ESC, ENT y COC. Este último es significativamente diferente ($\alpha < 0,05$) en todas sus fracciones a los otros dos mucílagos. Los mucílagos ESC y ENT presentaron un contenido total de pectinas de la misma magnitud. Relacionando estos datos con los obtenidos en el análisis de macrocomponentes se puede decir que solamente un 63, 66, 58% de los carbohidratos presentes en los mucílagos ESC, ENT y COC, respectivamente, son pectinas y el resto seguramente será mono, disacáridos u oligosacáridos presentes en el mucílago. Así mismo, estos datos sugieren que la etapa de escaldado y el pelado de la penca no afectan prácticamente ni la cantidad ni el tipo de pectinas extraídas. No obstante, el proceso con cocción llevó a contenidos en pectinas diferentes lo cual es atribuible a las mayores dificultades extractivas en los trozos

enteros de pulpa con piel en comparación con la pulpa molida y a la diferente composición de la piel y la pulpa.

Tabla III.4. Valores medios y desviación estándar de pectina total y sus fracciones, caracterizadas en tres mucílagos (g/g s.s.).

	PT	PSA	POS	PNE
ESC	0,459 ± 0,003 a	0,377 ± 0,006 a	0,067 ± 0,002 a	0,066 ± 0,008 a
ENT	0,454 ± 0,003 a	0,357 ± 0,009 b	0,045 ± 0,002 b	0,053 ± 0,006 a
COC	0,432 ± 0,007 b	0,128 ± 0,008 c	0,012 ± 0,002 c	0,292 ± 0,002 b

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

En la Tabla III.5 se muestran los datos obtenidos en la cuantificación de compuestos fenólicos totales y la actividad antioxidante que presentan los mucílagos ESC, ENT y COC. La revisión realizada sobre el contenido de compuestos fenólicos en mucílago de nopal no ha permitido encontrar ningún trabajo que pueda servir de referencia. Solamente se han encontrado varios estudios de la caracterización de estos compuestos en las pencas y frutos de *Opuntia*. Algunos de ellos son los realizados por Jaramillo-Flores *et al.* (2003), que reportan un contenido de compuestos fenólicos en la penca fresca de 1.589 $\mu\text{g/g}$ de penca y en nopal cocido (93°C/30 min) de 287 $\mu\text{g/g}$, con una actividad antioxidante de 45 y 54%, respectivamente. Así mismo, Lee *et al.* (2002) reportan un contenido de

compuestos fenólicos totales de 3,7 mg/g en nopal fresco variedad Saboten. Según mencionan Jaramillo-Flores *et al.* (2003), la presencia de mucílago afecta a la extracción de estos compuestos debido a que durante los primeros minutos de calentamiento probablemente se forme un complejo entre el hidocoloide y los compuestos fenólicos. De hecho, detectaron 1.429 µg/g de compuestos fenólicos en el nopal cuando previamente eliminaron el mucílago. Correlacionando los resultados del presente trabajo con el de Jaramillo-Flores *et al.* (2003) puede entenderse porque el mayor contenido de compuestos fenólicos totales se encontró en el mucílago COC al igual que la mayor actividad antioxidante. La razón por la cual en el mucílago ESC se detectó un contenido mucho menor es que, como es conocido, la mayor cantidad de estos compuestos se encuentra en la piel de frutas y vegetales y hay que recordar que en este extracto se eliminó la piel para mejorar el color del mucílago. La actividad antioxidante de un alimento depende del tipo y cantidad de compuestos activos presentes. Esto hace suponer que la gran diferencia entre la actividad antioxidante reportada para el nopal cocido y la determinada para el mucílago ESC puede ser debida, no solamente a la disminución del contenido en fenoles, sino también al tipo de compuestos fenólicos

ligados al mucílago durante el proceso de cocción en cada caso.

Tabla III.5. Valores medios y desviación estándar de compuestos fenólicos totales, actividad antioxidante y equivalente en trolox caracterizados a tres mucílagos.

Mues- tra	Fenólicos Totales (mg/g s.s.)	A. Antioxidante (% de Inhibición)	Equivalente Trolox (mg/g s.s.)
ESC	1,517 ± 0,004	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00
ENT	4,731 ± 0,005	2,68 ± 0,03	390,00 ± 4,47
COC	7,624 ± 0,004	15,32 ± 0,04	2230,00 ± 8,82

No hay grupos homogéneos ($\alpha \geq 0.05$) establecido por ANOVA.

3.2.3. Características físicas

3.2.3.1. Color

Los valores de las coordenadas de color para cada mucílago se muestran en la Tabla III.6. Se observa una diferencia significativa ($\alpha < 0,05$) entre los mucílagos debida al proceso de extracción usado. La etapa de decoloración, en el tratamiento DEC comparado con el mucílago ENT, aumentó la luminosidad y disminuyó el valor de a^* aunque no tanto como el tratamiento ESC. Como se puede observar el ángulo de tono del extracto obtenido por el procedimiento de escaldado se encuentra en la zona del diagrama cromático correspondiente a los tonos amarillo-verde mientras que los otros dos están en la zona de los amarillo- naranja (Hutchings, 1999).

El valor más bajo de C^*_{ab} del mucílago ESC indica una pureza de color menor, mientras que su mayor valor de L^* indica una mayor luminosidad. Estos resultados sugieren que el escaldado de las pencas molidas es el tratamiento más efectivo para prevenir el pardeamiento lo que permite obtener un mucílago en polvo para ser usado con menos restricciones. El producto ENT es el que muestra un tono más rojizo. La diferencia de color calculada entre el mucílago ESC y el mucílago ENT fue de $\pm 27,1$ y entre el entero y decolorado fue de $\pm 11,1$, lo que indica también la mayor eficacia del proceso ESC frente al DEC en la eliminación de color del polvo extraído. Los valores de las coordenadas de color que reporta Sepúlveda *et al.* (2007), obtenidos con un procedimiento de medida similar al empleado en este trabajo, son: L^* (86,6-88,9); b^* (6,6-8,0) y a^* (-1,8 a -0,9). Estos valores coinciden con los obtenidos para el mucílago ESC.

TABLA III.6. Valores medios y desviación estándar de las coordenadas y atributos de color de los mucílagos.

	ESC	ENT	DEC
L*	87,6 ± 0,6	61 ± 0,4	71 ± 0,5
a*	-0,7 ± 0,1	3,0 ± 0,2	1,3 ± 0,3
b*	10,6 ± 1,2	14,4 ± 0,1	18,9 ± 0,7
h*_{ab}	93,8 ± 0,7	78,3 ± 0,6	86,1 ± 2,6
C*_{ab}	10,6 ± 1,4	14,7 ± 0,3	18,9 ± 1,2

No hay grupos homogéneos ($\alpha \geq 0.05$) establecido por ANOVA.

Por tanto, para los productos obtenidos, las mejores propiedades de color las presenta el mucílago ESC, con una

mayor claridad, una menor pureza de color y una tonalidad menos parda. Esto es probablemente el resultado de la ausencia de una extracción cuantitativa de clorofilas (al estar la penca pelada) y la inhibición de procesos de pardeamiento enzimático asociada al proceso de escaldado. No obstante, las reacciones de pardeamiento no enzimático progresan en una cierta extensión.

3.2.3.2. Propiedades reológicas

3.2.3.2.1. Viscosidad intrínseca

Las propiedades físicas de un polímero en solución dependen del solvente, temperatura y concentración. A concentraciones bajas, las cadenas de polímero están separadas unas de otras, ocupando un volumen esférico de radio R_g (radio promedio de giro). En estas soluciones, las interacciones polímero-polímero son escasas y el volumen hidrodinámico del polímero viene determinado por las interacciones termodinámicas entre el solvente y el polímero. El volumen hidrodinámico ocupado por unidad masa de polímero se conoce como viscosidad intrínseca, $[\eta]$, parámetro que se puede determinar midiendo la viscosidad de disoluciones muy diluidas. La viscosidad intrínseca es el reflejo de las interacciones de la estructura molecular con la disolución, relacionadas con el peso molecular y otras propiedades. Los valores de viscosidad

intrínseca están determinados por el grado de solvatación de las cadenas en el solvente y son muy útiles para determinar las propiedades fundamentales de los materiales. El grado de asociación hidrofóbica, de hidrólisis y el tamaño de las redes micelares pueden ser determinados a partir de la medida de la viscosidad intrínseca (Lee y Tripathi, 2005).

La Figura III.2 muestra los gráficos correspondientes al comportamiento de las ecuaciones de Huggins (Ecuación III.5) y Kramer (Ecuación III.6), respectivamente. Los valores promedio y la desviación estándar de la viscosidad intrínseca determinada para cada mucílago, calculados a partir de los valores de la ordenada en el origen obtenidos de ambas ecuaciones, se muestran en la Tabla III.7. Se observaron diferencias significativas ($\alpha < 0,05$) entre estos valores. El que presentó el valor de mayor magnitud es el mucílago ESC mientras que el mucílago COC fue el que presentó el menor valor de viscosidad intrínseca. A pesar de que los valores de este parámetro de los mucílagos ESC y ENT son estadísticamente diferentes, se puede decir que ambos se encuentran en un mismo orden de magnitud. La etapa de escaldado puede provocar la inactivación de algunas enzimas responsables de la hidrólisis de algunas cadenas del polímero, como las pectinesterasas, contribuyendo así a preservar en mayor medida el tamaño

molecular inicial de las cadenas. En general, se puede decir que, una vez más, el mucílago COC es el que presenta un comportamiento más diferente a los otros tres (ESC, ENT y DEC). El valor de viscosidad intrínseca obtenido para el mucílago ESC es del mismo orden que el reportado en la literatura para λ -carragenato (6,8 dl/g), pero comparado con la goma de garrofin, con un valor de viscosidad intrínseca de 15,0 dl/g, todos los mucílagos presentaron valores muy por debajo (Camacho et al., 2005). Skendi, et al. (2003) reportan un valor de esta propiedad para β -glucanos de avena de 4,9 a 6,4 dl/g.

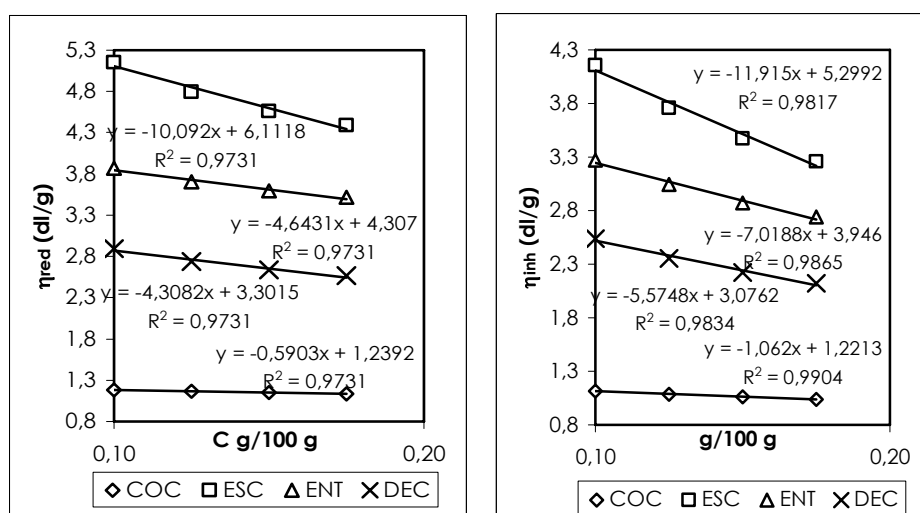


Figura. III. 2. Valores de η_{red} (izquierda, ajuste de Huggins) y valores de η_{inh} (derecha, ajuste de Kraemer) vs C para los diferentes mucílagos.

Un valor de viscosidad intrínseca grande está relacionado con un volumen hidrodinámico grande o un

peso molecular grande y también con un gran poder espesante (Glicksman, 1982).

Tabla III.7. Valores medios y desviación estándar de la viscosidad intrínseca caracterizada para los diferentes mucílagos (dl/g). Se dan también los valores de las constantes de Huggins y Kraemer.

	ESC	ENT	COC	DEC
[η]	5,71 \pm 0,57	4,13 \pm 0,26	1,23 \pm 0,01	3,19 \pm 0,16
K_H	0,27	0,25	0,38	0,92
K_K	0,42	0,45	0,71	1,11

Majdoub *et al.* (2001a) reportan para el mucílago purificado de pencas de *Opuntia ficus-indica*, disuelto en solución de NaCl 0.5 M y en solución de CaCl₂ 0,5 M valores de 8,5 y 7,4 dl/g, respectivamente. Estos valores son mayores a los encontrados en este trabajo para los cuatro mucílagos debido seguramente a un mayor grado de purificación de estos mucílagos, debido seguramente a un mayor grado de purificación en aquellos casos (que supone un incremento en el peso molecular promedio del extracto), como refleja el mayor peso molecular que reportan los autores en este caso ($12,8 \times 10^6$). En un trabajo posterior, Majdoub, con otros colaboradores (2001b), reportan otros valores para el mucílago extraído de la pulpa y mucílago extraído de la piel, disueltos en solución de NaCl 1M: 5.16 y 2,9 (dl/g), respectivamente, aunque se puede considerar que los obtenidos en este trabajo son del mismo orden. También las

diferencias en los valores pueden, en parte, atribuirse al solvente utilizado; en este trabajo agua destilada. Este factor es importante, ya que la viscosidad intrínseca refleja las interacciones del polímero con el solvente, lo cual está afectado por la presencia de otros solutos, fuerza iónica y pH. Los polielectrolitos, como es el caso de los polímeros del mucílago con ácido galacturónico, presentan interacciones muy dependientes del pH que determina el grado de ionización de los grupos ionizables y su correspondiente grado de solvatación y volumen hidrodinámico. Si el volumen hidrodinámico es menor la viscosidad intrínseca disminuirá. El tipo de iones presentes (su concentración y su carga) afectan en gran medida al valor de viscosidad intrínseca por la misma razón. En este sentido, la presencia de una relativamente elevada concentración de iones, algunos divalentes provoca una alta fuerza iónica en el medio, disminuyendo el grado de solvatación del polímero, lo que provoca una disminución del volumen hidrodinámico y de la viscosidad intrínseca.

En conclusión el método de extracción afecta al valor de la viscosidad intrínseca del mucílago, lo cual está en relación con la diferente composición del extracto que radica tanto en la proporción de polímeros extraídos (por ejemplo diferentes fracciones de pectinas) como de solutos moleculares e iónicos que contribuyen a modificar las

características solventes del medio acuoso y por tanto la bondad solvente del mismo, lo cual incide directamente en el volumen hidrodinámico de las cadenas poliméricas presentes. El mucílago ESC, con el mayor valor de viscosidad intrínseca es el que presentará, por tanto, el mayor poder espesante en medio acuoso, lo cual puede atribuirse también a la inhibición de enzimas como la pectinesterasa, que podían actuar sobre las cadenas poliméricas reduciendo el tamaño molecular promedio.

3.2.3.2.2. Comportamiento al flujo

En relación con el comportamiento al flujo de las disoluciones de mucílago a diferentes concentraciones y temperaturas estudiadas, éstas presentaron un comportamiento de fluido no-Newtoniano. Las Figuras III.3 y III.4 muestran, como ejemplo, algunos de los reogramas, o curvas de flujo, obtenidos para el mucílago ESC. Así mismo las Figuras III.5 y III.6 muestran la linealización gráfica log-log de los valores de esfuerzo de corte frente a gradiente de velocidad. En concreto, se muestra el efecto de la concentración a 25°C y el efecto de la temperatura en la muestra preparada al 5%.

Los datos de comportamiento al flujo obtenidos a todas las concentraciones y temperaturas de trabajo y para

los cuatro mucílagos fueron ajustadas al modelo de Ostwald-de-Waele o ley de potencia. Las Tablas III.8, III.9,

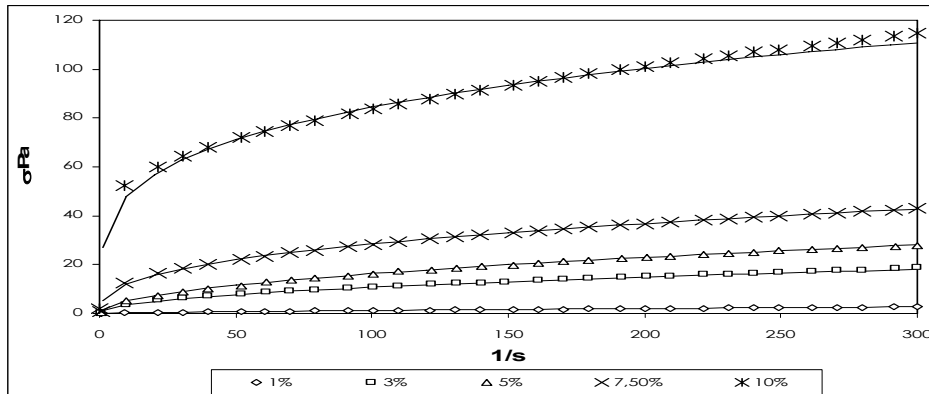


Figura III.3. Curvas de flujo para el mucílago escaldado a diferentes concentraciones (g/100g s.s.) a 25°C. Puntos experimentales y modelo de Ostwald-de-Waele ajustado.

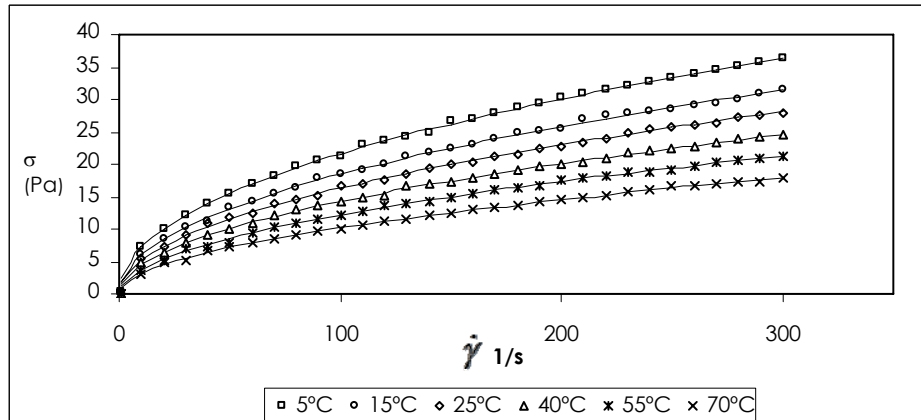


Figura III.4. Curvas de flujo para el mucílago escaldado a diferentes temperaturas a una concentración de 5 g/100g s.s. Puntos experimentales y modelo de Ostwald-de-Waele ajustado.

III.10 y III.11 muestran los valores de los parámetros obtenidos del ajuste de dicho modelo. A partir de estos valores se construyeron las curvas de flujo predichas, con el fin de

observar la bondad del ajuste de este modelo a las curvas de flujo experimentales.

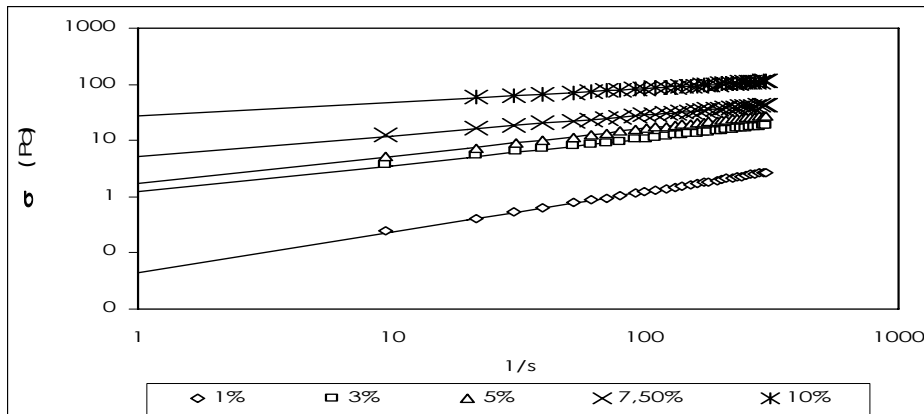


Figura III.5. Linealización de los datos experimentales esfuerzo de corte-gradiente de velocidad para el ajuste de la ley de potencia. Datos correspondientes al mucílago ESC a diferentes concentraciones a 25°C.

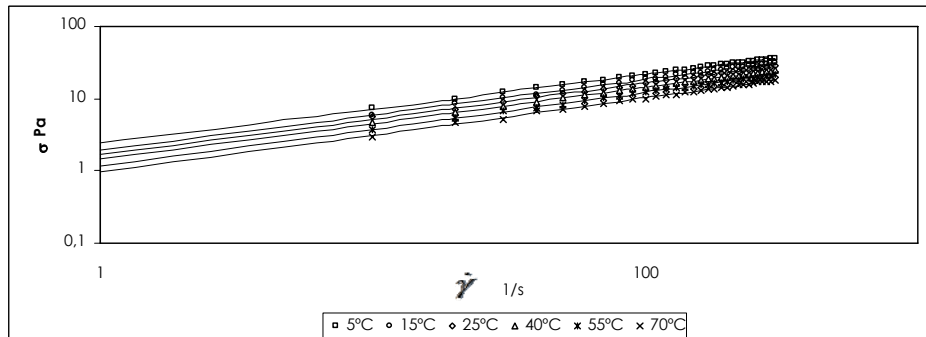


Figura III.6. Linealización de los datos experimentales esfuerzo de corte-gradiente de velocidad para el ajuste de la ley de potencia. Datos correspondientes al mucílago ESC, a una concentración del 5 %, a diferentes temperaturas.

Como se puede observar en las tablas, los parámetros del modelo, índice de consistencia (K) e índice de comportamiento de flujo (n), muestran el efecto esperado:

al aumentar la concentración de mucílago de la disolución los valores de K aumentan y estos disminuyen al aumentar la temperatura para todos los mucílagos. Los mucílagos ESC y COC presentan un comportamiento típico pseudoplástico, en todos los casos ($0 < n < 1$), lo que implica un decremento de la viscosidad al aumentar el gradiente de velocidad aplicado. Este comportamiento suele estar relacionado con un fenómeno de orientación de las partículas sólidas o macromoléculas en el sentido del flujo tanto más intenso cuanto mayor es el gradiente de velocidad aplicado. Los valores de K y n obtenidos para el ESC son del mismo orden que los citados por Medina-Torres *et al.* (2000) para el mucílago similar al ENT. Los mucílagos ENT y DEC a la concentración de 1% (p/p) presentaron un comportamiento dilatante ya que los valores de n obtenidos son mayores a uno. Para el resto de las concentraciones muestran comportamiento pseudoplástico con una evolución en función de la concentración y de la temperatura similar al mucílago ESC.

A partir del valor de los parámetros del modelo de Oswald-de-Waele se obtuvo, a cada concentración y temperatura, la viscosidad aparente de cada mucílago a 1

Tabla III.8. Parámetros del modelo Ostwald-de Waele para el mucílago escaldado a diferentes concentraciones (C, g/100 g disolución) y diferentes temperaturas.

T°C C	1		3		5		7,5		10	
	K(Pa s ⁿ)	n	K(Pa s ⁿ)	n	K(Pa s ⁿ)	n	K(Pa s ⁿ)	n	K(Pa s ⁿ)	n
5	0,078	0,689	1,659	0,478	2,412	0,476	9,134	0,309	30,99	0,262
15	0,060	0,700	1,320	0,487	1,951	0,488	7,076	0,320	29,02	0,254
25	0,044	0,725	1,216	0,473	1,681	0,494	5,885	0,330	26,96	0,248
40	0,029	0,757	0,826	0,499	1,459	0,495	4,565	0,334	22,77	0,246
55	0,021	0,785	0,658	0,504	1,175	0,508	3,710	0,350	19,44	0,244
70	0,015	0,811	0,556	0,553	0,958	0,513	3,562	0,368	18,09	0,226

R² (coeficiente de determinación) estuvo entre 0,9915 y 0,9996.

Tabla III.9. Parámetros del modelo Ostwald-de Waele para el mucílago entero a diferentes concentraciones (C, g/100 g disolución) y diferentes temperaturas.

T°C C	1		3		5		7,5		10	
	K(Pa s ⁿ)	n	K(Pa s ⁿ)	n	K(Pa s ⁿ)	n	K(Pa s ⁿ)	n	K(Pa s ⁿ)	n
5	0,018	0,831	0,231	0,577	0,475	0,526	1,147	0,471	2,371	0,441
15	0,014	0,832	0,181	0,591	0,387	0,543	1,011	0,490	1,951	0,462
25	0,008	0,909	0,136	0,610	0,256	0,566	0,967	0,508	1,439	0,485
40	0,002	1,117	0,083	0,649	0,225	0,605	0,693	0,527	1,224	0,495
55	0,001	1,264	0,051	0,694	0,146	0,636	0,498	0,543	0,908	0,516
70	0,0004	1,369	0,031	0,758	0,098	0,669	0,355	0,568	0,686	0,554

R² (coeficiente de determinación) estuvo entre 0,9504 y 0,9996.

Tabla III.10. Parámetros del modelo Ostwald-de Waele para el mucílago decolorado a diferentes concentraciones (g/100 g disolución) y diferentes temperaturas.

T°C C	1		3		5		7,5		10	
	K(Pa s ⁿ)	n	K(Pa s ⁿ)	n	K(Pa s ⁿ)	n	K(Pa s ⁿ)	n	K(Pa s ⁿ)	n
5	0,001	1,294	0,025	0,888	0,155	0,698	0,519	0,597	1,176	0,534
15	0,001	1,356	0,019	0,890	0,119	0,731	0,405	0,626	0,925	0,560
25	0,001	1,355	0,015	0,916	0,086	0,763	0,292	0,660	0,689	0,596
40	0,0004	1,374	0,012	0,924	0,063	0,768	0,226	0,663	0,588	0,598
55	0,0002	1,463	0,008	0,966	0,041	0,797	0,166	0,684	0,473	0,614
70	0,0001	1,498	0,005	0,999	0,026	0,827	0,109	0,713	0,355	0,641

R² (coeficiente de determinación) estuvo entre 0,9504 y 0,9988.

Tabla III.11. Parámetros del modelo Ostwald-de Waele para el mucílago cocido a diferentes concentraciones (C, g/100 g disolución) y diferentes temperaturas.

T°C C	1		3		5		10	
	K(Pa s ⁿ)	n	K(Pa s ⁿ)	n	K(Pa s ⁿ)	n	K(Pa s ⁿ)	n
5	0,0661	0,5507	0,0769	0,7265	0,1366	0,6706	1,2510	0,6327
15	0,0605	0,5219	0,0709	0,6523	0,1226	0,6576	1,0518	0,6314
25	0,0581	0,4967	0,0649	0,6185	0,1086	0,6446	0,8139	0,6431
40	0,0562	0,4369	0,0559	0,5523	0,0876	0,6251	0,5760	0,6554
55	0,0436	0,3859	0,0469	0,5012	0,0666	0,6056	0,4357	0,6628
70	0,0400	0,3355	0,0379	0,3364	0,0456	0,5861	0,1282	0,6751

R² (coeficiente de determinación) estuvo entre 0,8117 y 0,9919.

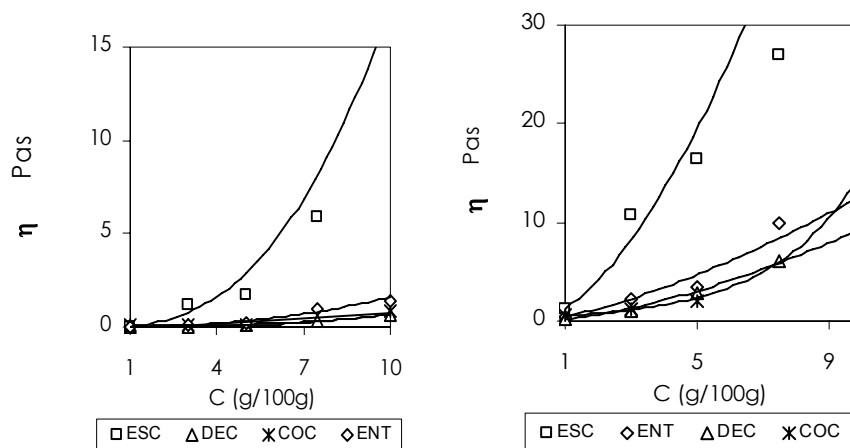


Figura III.7. Comportamiento potencial de los mucílagos ESC, ENT y DEC y comportamiento exponencial del COC a 25°C. Izquierda a 1s⁻¹ y derecha a 100 s⁻¹.

y 100 s⁻¹. En la Figura III.7 se muestran estos datos a 25°C. En todos los casos, las soluciones de mucílago ESC muestran valores más altos de viscosidad que los otros mucílagos, siendo el DEC el que presentó los valores más bajos.

La viscosidad aparente mostró una evolución de tipo potencial en función de la concentración en el caso de los mucílagos ESC, ENT y DEC, mientras que fue exponencial en el caso del COC. En las Tablas III.12 y III.13 se muestran las constantes obtenidas de los respectivos ajustes (Ecuación III.9 y III.10). El efecto del gradiente de velocidad en relación a estas constantes es el siguiente: la constante **a** aumenta al aumentar el gradiente de velocidad y la constante **b** disminuye, lo que implica una mayor variación en la viscosidad por efecto de la concentración a gradientes de

velocidad altos (Figura III.7). Los valores de la constante **a** del modelo potencial disminuyen al aumentar la temperatura y los de la constante **b** se comportan inversamente. Esto supone una mayor influencia de la concentración en la viscosidad de las disoluciones cuanto menor es la temperatura (Figura III.8).

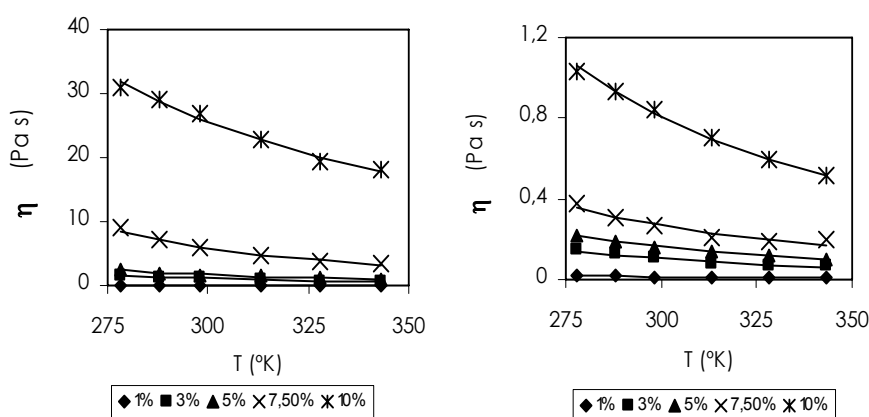


Figura III.8. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad de las soluciones del mucílago ESC a diferentes concentraciones. Izquierda a 1 s^{-1} y derecha a 100 s^{-1} .

El comportamiento de la viscosidad aparente a 1 y 100 s^{-1} en función de la temperatura para los mucílagos ESC, ENT, DEC y COC se ajustó al modelo de Arrhenius. Tanto los valores experimentales como la curva predicha por el modelo para la disolución de mucílago ESC se muestran en la Figura III.8. Las Tablas III.14a y III.14b muestran los valores obtenidos de los parámetros del modelo para los cuatro mucílagos a las diferentes concentraciones. Los valores de

E_a obtenidos son mayores a menor concentración y a menor gradiente de velocidad, lo que refleja la mayor sensibilidad de la viscosidad a la temperatura en estos casos. La viscosidad de las soluciones de mucílago ESC es la menos afectada por la temperatura ya que se obtuvieron valores inferiores de E_a para todas las concentraciones y a los dos gradientes de velocidad. El mucílago COC a un gradiente de velocidad 1 s^{-1} presenta la misma tendencia en la E_a que los otros tres extractos, pero a 100 s^{-1} la E_a aumenta al aumentar la concentración.

Con el fin de considerar de forma conjunta el efecto de la concentración y de la temperatura, se ajustó el comportamiento reológico de los mucílagos ESC, ENT y DEC con la Ecuación III.11, utilizando un proceso de regresión no lineal para la obtención de los parámetros mediante el paquete estadístico STATGRAPHICS 5.1. En la Tabla III.15 se muestran los valores obtenidos de las constantes del modelo para cada mucílago a 1 y 100 s^{-1} . Los valores obtenidos de E_a con este modelo integral son de menor magnitud que los encontrados con el ajuste de Arrhenius. La Figura III.9 muestra la superficie de respuesta para el mucílago ESC a 100 s^{-1} como ejemplo del efecto en forma conjunta de las variables sobre la viscosidad de las dispersiones estudiadas.

Tabla III.12. Valores de las constantes del modelo potencial ajustado a la variación de la viscosidad con la concentración, a las diferentes temperaturas, para los mucílagos ESC, ENT y DEC a dos gradientes de velocidad (1 y 100 s⁻¹).

T°C	1 s ⁻¹						100 s ⁻¹					
	ESC		ENT		DEC		ESC		ENT		DEC	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
5	0,0789	2,4457	0,0188	2,0790	0,0009	3,1497	1,9502	1,6136	0,7731	1,3024	0,3090	1,6040
15	0,0595	2,5006	0,0148	2,1109	0,0006	3,2197	1,5682	1,6456	0,6105	1,3741	0,2629	1,6158
25	0,0455	2,5773	0,0083	2,2803	0,0005	3,1592	1,2951	1,6822	0,4658	1,4351	0,2198	1,6309
40	0,0296	2,6895	0,0026	2,7670	0,0004	3,1976	0,9858	1,7216	0,3342	1,5302	0,1770	1,6335
55	0,0216	2,7535	0,0011	3,0324	0,0002	3,3721	0,8067	1,7430	0,2507	1,5411	0,1375	1,6620
70	0,0155	2,8732	0,0006	3,1947	0,0001	3,5516	0,6950	1,7845	0,2105	1,5479	0,0775	1,8257

R² (coeficiente de determinación) estuvo entre 0,9504 y 0,9988.

Tabla III.13. Valores de las constantes del modelo exponencial ajustado a la variación de la viscosidad con la concentración, a las diferentes temperaturas, para el mucílagos COC a dos gradientes de velocidad (1 y 100 s⁻¹).

	Cts.	5°C	15°C	25°C	40°C	55°C	70°C
1 s ⁻¹	a	0,0336	0,0316	0,0312	0,0303	0,0244	0,0280
	b	0,3431	0,3328	0,3088	0,2757	0,2696	0,1393
100 s ⁻¹	a	0,6091	0,4428	0,3709	0,2544	0,1540	0,1057
	b	0,3588	0,3719	0,3698	0,3778	0,4043	0,3293

R² (coeficiente de determinación) estuvo entre 0,8784 y 0,9970.

Tabla III.14a. Valores de los parámetros del modelo de Arrhenius para los cuatro mucílago a diferentes concentraciones a un gradiente de velocidad de $1s^{-1}$.

g/ 100g	ESC		ENT		DEC		COC	
	Ea Kcal/mol	A (Pas)	Ea Kcal/mol	A (Pas)	Ea Kcal/mol	A (Pas)	Ea Kcal/mol	A (Pas)
1	4,83	1,2E-5	11,62	1,6E-11	6,26	1,1E-8	5,98	3,4E-5
3	3,26	4,5E-3	5,92	5,5E-6	5,09	1,1E-5	3,10	5,4E-4
5	2,56	2,2E-2	4,46	1,0E-4	4,38	1,5E-5	2,02	2,0E-3
7,5	2,82	5,1E-2	3,43	2,5E-3	4,28	2,0E-4	----	-----
10	1,67	1,53	3,53	3,9E-3	3,32	2,7E-3	1,45	4,9E-3

R² (coeficiente de determinación) estuvo entre 0,8711 y 0,9988.

Tabla III.14b. Valores de los parámetros del modelo de Arrhenius para los cuatro mucílago a diferentes concentraciones a un gradiente de velocidad de $100 s^{-1}$.

g/ 100g	ESC		ENT		DEC		COC	
	Ea Kcal/mol	A (Pas)	Ea Kcal/mol	A (Pas)	Ea Kcal/mol	A (Pas)	Ea Kcal/mol	A (Pas)
1	3,14	6,1E-5	3,65	1,1E-5	3,70	4,7E-6	4,22	2,2E-6
3	2,40	1,9E-3	3,56	5,3E-5	3,51	9,2E-5	4,37	1,1E-6
5	2,10	4,7E-3	2,51	6,0E-4	2,98	7,2E-5	5,30	1,83E-5
7,5	2,08	8,1E-3	2,18	2,1E-3	2,78	4,0E-4	----	-----
10	2,07	2,5E-2	2,15	3,7E-3	2,04	3,4E-3	5,42	1,5E-5

R² (coeficiente de determinación) estuvo entre 0,8501 y 0,9988.

Tabla III.15. Valores de las constantes del modelo potencial ajustado y coeficiente de determinación (R^2) al comportamiento de la viscosidad, concentración y temperatura para los tres mucílago.

		α	β	Ea	R^2
ESC	1 s ⁻¹	0,0052	4,8872	0,0181	0,9949
	100 s ⁻¹	0,0119	3,2717	0,0210	0,9732
ENT	1 s ⁻¹	2,6246	2,2375	0,0376	0,9918
	100 s ⁻¹	0,0851	1,7115	0,0228	0,9868
DEC	1 s ⁻¹	0,0208	3,0733	0,0383	0,9917
	100 s ⁻¹	0,0395	1,9917	0,0237	0,9947

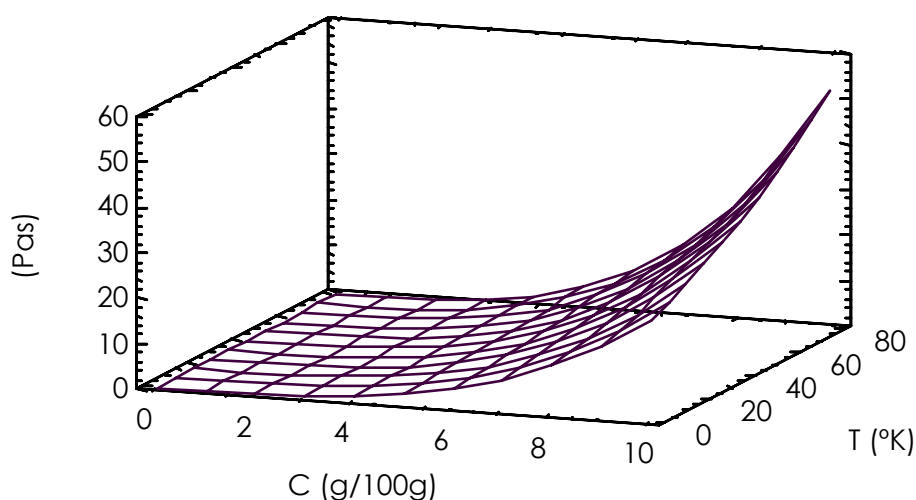


Figura III.9. Variación de la viscosidad aparente a 100s⁻¹ en función de la temperatura y la concentración para el mucílago ESC.

La Figura III.10 muestra el comportamiento de la viscosidad aparente a 100 s⁻¹ del mucílago ESC en función del pH. Se puede apreciar que la viscosidad a ese gradiente de velocidad aumenta a medida que aumenta

el valor de pH, aunque en el intervalo de pH de 2 a 7 este incremento es mucho más suave que en el intervalo 7-9 donde el ascenso es mucho más marcado. El incremento brusco de la viscosidad en el intervalo de pH 7 a 9 indica una transición en la conformación estructural del polímero, de una estructura más compacta a una estructura altamente solvatada. Esto se justifica por el aumento de la carga negativa de las cadenas al aumentar el grado de disociación de los grupos ionizables (ácido galacturónico). La alta densidad de carga incrementa el volumen de la capa de hidratación de las cadenas y por tanto el radio promedio de giro y su volumen hidrodinámico. Este comportamiento es similar al reportado en los trabajos de Medina *et al.* (2000) y Majdub *et al.* (2001a) para mucílago de nopal. Los intervalos de pH a los cuales se lleva acabo la transición son diferentes, de 6 a 7 en el caso del estudio realizado por Medina *et al.* y de 4 a 6 en el caso de los otros autores. Esta diferencia se puede deber a la diferente fuerza iónica de las soluciones empleadas en la preparación, $I = 0,1025$ e $I = 0,025$, respectivamente. La fuerza iónica determinada para la disolución realizada de mucílago, considerando sólo los iones analizados es de $I=0,002$, pero este valor no incluye todos los iones presentes en el alto porcentaje de cenizas cuantificado. Es, por tanto, presumible que la disolución tenga una fuerza iónica muy

superior.

Es destacable, por otro lado, el hecho de que, a pesar del uso de disoluciones tampón para la preparación de las disoluciones, el pH cambia considerablemente después de disolver el mucílago. La Tabla III.16 presenta los valores del pH final alcanzado en cada tampón. Esto refleja el efecto neutralizante del mucílago (ascenso del pH en el intervalo de valores bajos y descenso en el intervalo de valores altos) atribuible a la presencia de sustancias con actividad acido-base con fuerte efecto tamponante como apuntan Corrales-García *et al.*, 2004.

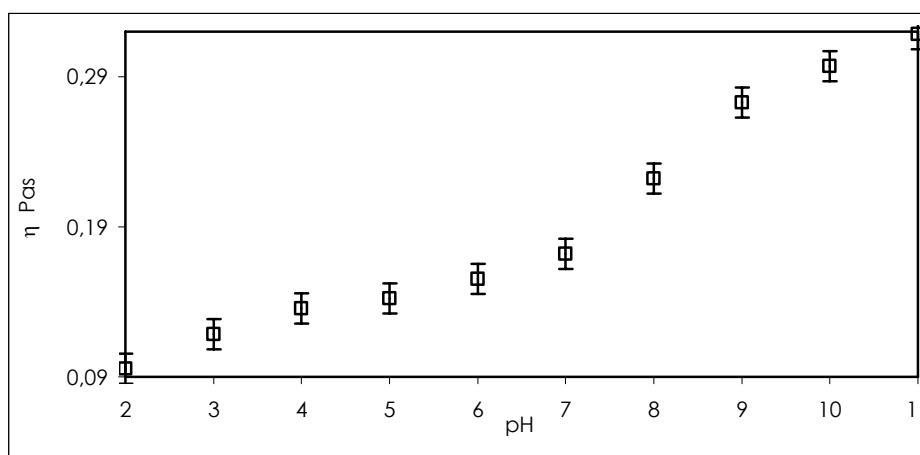


Figura III.10. Gráfico del efecto del pH en la viscosidad de disoluciones de mucílago ESC (5 g/100 g s.s.) a un gradiente de velocidad de 100 s^{-1} y a 25°C .

La representación de la viscosidad en función del pH final de las disoluciones se da en la Figura III.11, donde se observa una disminución del pH al cual se da el salto de

viscosidad, obteniéndose valores similares a los reportados en los trabajos antes citados.

Tabla III.16. Cambio de valores de pH de las disoluciones tampón (pH_i) por efecto de la disolución del mucílago (pH_f).

pH _i	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
pH _f	3,8	3,9	4,3	5,0	6,1	6,6	7,2	8,5	9,4	9,8

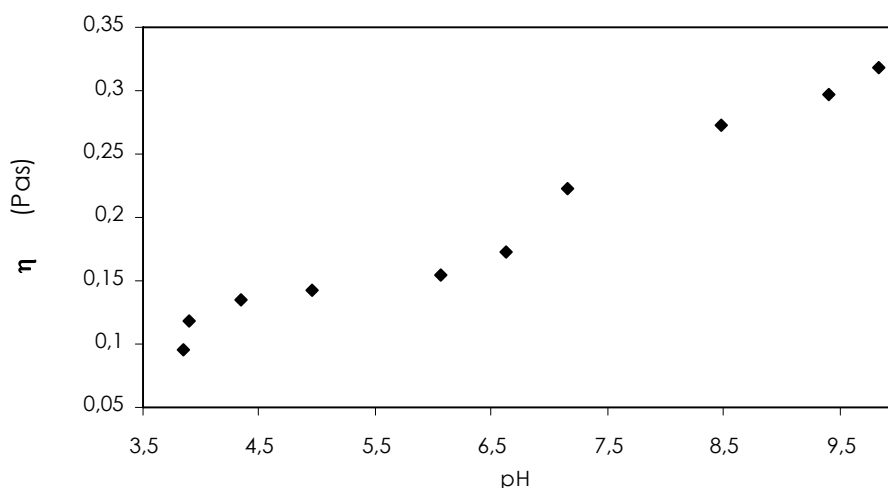


Figura III.11. Gráfico del efecto del pH_f en la viscosidad de disoluciones de mucílago ESC (5 g/100 g s.s.) a un gradiente de velocidad de 100 s⁻¹ y a 25°C.

En conclusión el mucílago del nopal presenta en disolución acuosa a las concentraciones entre 1 y 10 % un comportamiento no newtoniano altamente dependiente de la concentración y de la temperatura. La influencia de esta última es menor a medida que aumenta la concentración. Las diferencias composicionales del mucílago, en función del método de extracción, se reflejan

en diferencias en los valores de las constantes reológicas, siendo el mucílago ESC el que presenta mayor poder espesante. Así mismo, en el caso del mucílago ESC se ha comprobado la dependencia de la viscosidad con el pH del medio, en coherencia con la presencia de grupos ionizables en las cadenas, lo que implica una mayor densidad de carga de las moléculas a pHs altos, con el consiguiente incremento del volumen de hidratación y el volumen hidrodinámico de las macromoléculas.

3.2.3.4. Isotherma de sorción y temperatura de transición vítrea

La relación entre la humedad de las muestras y su actividad del agua constituye la isoterma de sorción del agua de un determinado producto. La Figura III.12 muestra esta relación en el caso del mucílago de nopal.

Los datos se ajustaron a los modelos de BET y GAB descritos en la metodología. Así, el ajuste lineal de $a_w/(1-a_w)w_e$ vs a_w permite obtener los parámetros del modelo de BET a partir de la pendiente y la ordenada en el origen. Por su parte, un ajuste polinómico de segundo grado de a_w/w_e vs a_w proporciona el valor de los parámetros del modelo de GAB. La Figura III.13 muestra los correspondientes ajustes.

En el caso del modelo de BET hay que mencionar que éste sólo es aplicable a valores bajos de a_w , cuando los

fenómenos de sorción predominan frente a los de disolución. En este caso el modelo fue adecuado para valores de $a_w \leq 0.55$. En la Tabla III.17 aparecen los parámetros de ambos modelos obtenidos de los ajustes correspondientes.

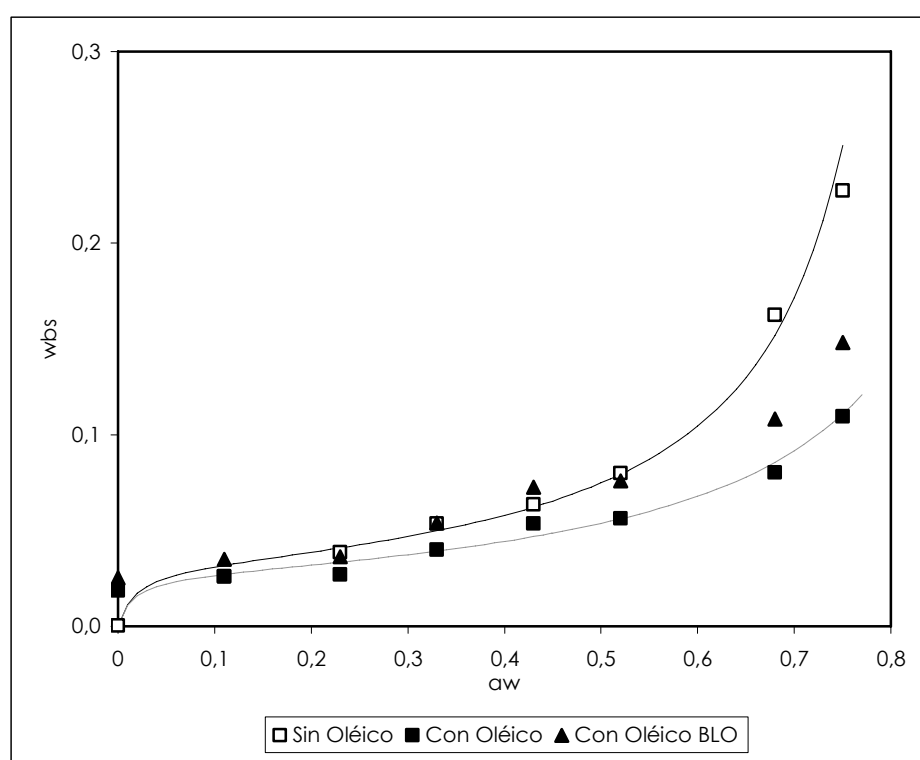


Figura III.12. Isotherma de sorción. Datos experimentales y modelo GAB ajustado para el mucílago sin (símbolos huecos y línea continua) y con ácido oleico (rellenos y punteada). Triángulo: mucílago expresado en base libre el oleico (BLO).

La Figura III.12 muestra los valores predichos por el modelo de GAB, que al igual que el de BET, reproducen fielmente el comportamiento experimental observado en las

muestras.

La comparación de la isoterma del mucílago con las de otros productos como la pectina (Okos, 1986), alguna fruta, como la fresa (Moraga *et al.*, 2004), y mezclas modelo de diferentes componentes (Moraga, 2002) puede observarse en la Figura III.14. La pectina muestra una curva típica de un polímero con alto peso molecular donde los efectos solventes a altos valores de a_w son muy poco patentes ya que el agua es retenida por otros mecanismos. La presencia de solutos de bajo peso molecular, como los azúcares, da lugar a la aparición de estos efectos solventes a partir de a_w del orden de 0,6, aumentando drásticamente la humedad de equilibrio para valores de a_w de este orden.

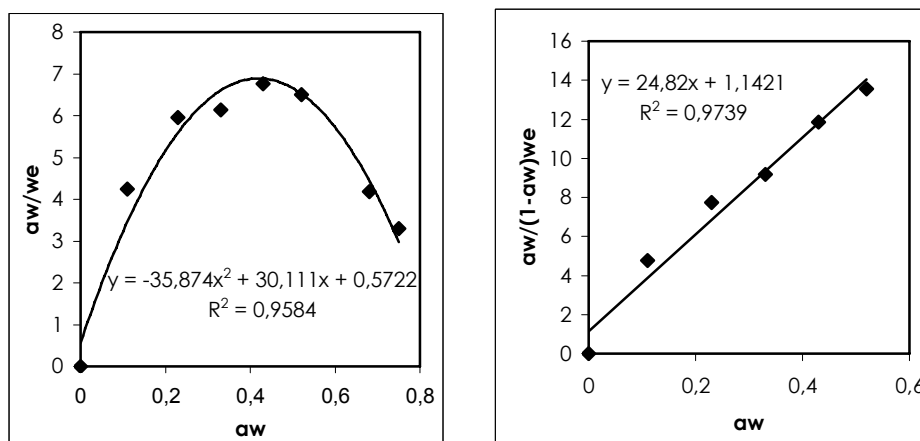


Figura III.13. Gráfico del ajuste polinómico del modelo de GAB (izquierda) y lineal del modelo de BET (derecha)

Tabla III.17 Valores de las constantes del modelo de GAB y BET. R²: Coeficiente de determinación.

Modelo	Constantes	Mucílago	Mucílago más oleico
BET	w ₀	0,039	0,028
	C	22,73	36,31
	R ²	0,974	0,962
GAB	w ₀	0,032	0,027
	C	47,15	65,59
	K	1,17	1,01
	R ²	0,958	0,930

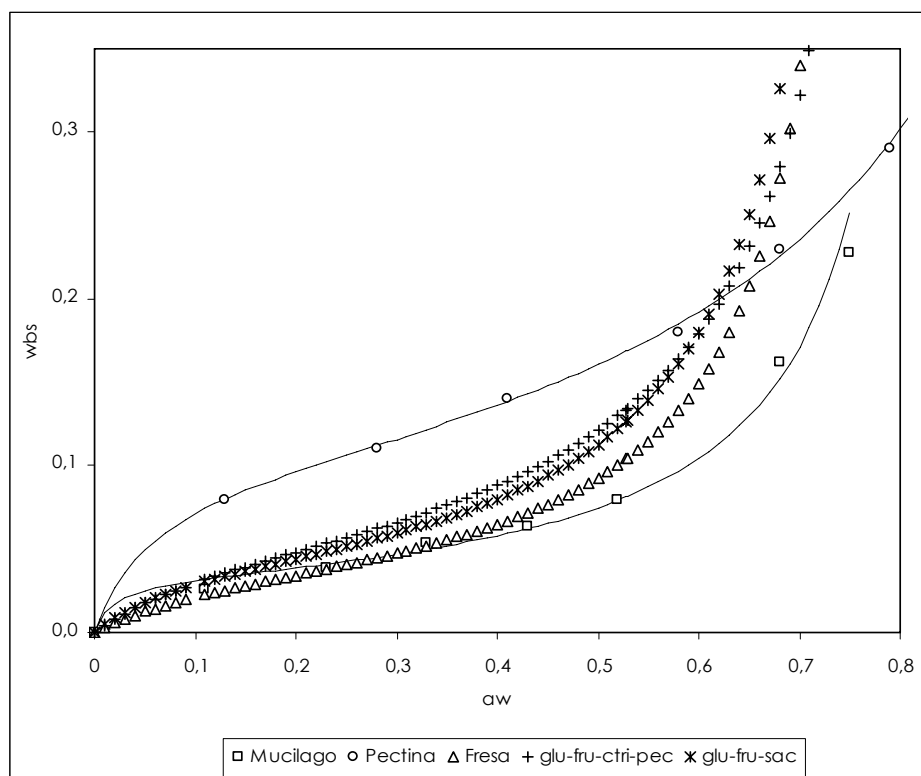


Figura III.14. Isotherma de sorción. Datos experimentales y modelo GAB ajustado para el mucílago, pectina, fresa y mezclas de soluciones modelo, glucosa-fructosa-sacarosa (glu-fruc-sac: 1:1:1 fracción másica) y glucosa-fructosa-ácido cítrico-pectina (glu-fru-citi-pec: 0,473:0,473:0,005:0,05 fracción másica).

En mezclas de pectina y solutos de bajo peso molecular, la isoterma toma una forma muy parecida. Por otro lado, la presencia de iones, con alta capacidad de solvatación puede dar lugar a una curva de sorción similar a la descrita para mezclas de pectina. Esto justifica la forma encontrada para la isoterma del mucílago donde, a pesar del alto valor de peso molecular promedio, existen cantidades notables de iones o solutos de bajo peso molecular que incentivan los efectos solventes frente a los efectos de sorción, dando lugar a una curva menos característica de polímeros purificados.

Se analizó la influencia de la incorporación al mucílago de un ácido graso (ácido oleico) como una medida para disminuir su afinidad por el agua y mejorar las propiedades barrera al vapor del agua del material, en aras a su potencial utilización para la obtención de films comestibles. La incorporación de ácido oleico al mucílago supuso una modificación de las relaciones humedad- a_w , como puede observarse en la Figura III.12. Por una parte, a la a_w más baja el oleico limita en mayor medida la desorción de agua ya que con la misma humedad de partida (6,3 g/g ss), para los valores más bajos de a_w , se llega a humedades de equilibrio mayores que las correspondientes al mucílago sin oleico. Esto podría estar relacionado con una modificación de las interacciones

intramoleculares en la matriz del mucílago, potenciándose la interacción del agua con los grupos activos, incluyendo el grupo carboxilo del ácido oleico, según se deduce del aumento del valor del parámetro C, tanto de GAB como de BET (Tabla III.16). Sin embargo, a actividades del agua más altas, la presencia del oleico parece potenciar las interacciones hidrofóbicas, limitando la capacidad de adsorción de agua de la matriz. La Figura III.12 muestra también los valores de humedad de equilibrio referidos a la muestra sin tener en cuenta la masa de ácido oleico (Base libre de oleico BLO). Esto pone de manifiesto que la disminución de la humedad de equilibrio no es sólo debido a la incorporación del lípido a la masa del material adsorbente, sino que hay una reducción efectiva de la capacidad de adsorción de agua del mucílago debido al ácido oleico, para valores de a_w mayores de 0,5, haciéndose menos patentes los fenómenos de disolución que predominan en esta zona de la isoterma. Esto ratifica la interacción entre el ácido oleico y el mucílago, dependiente de los valores de humedad alcanzados en la matriz.

Se determinaron también los valores de la temperatura de transición vítrea (T_g) del mucílago y de éste en presencia de oleico. Las interacciones del lípido podrían modificar estos valores que son, a su vez, determinantes de los niveles críticos de humedad que llevan a cambios

drásticos en las propiedades de la matriz. La Figura III.16 presenta los termogramas obtenidos para alguna de las muestras analizadas. En las muestras con oleico, el termograma permitió identificar, además de la T_g , las características fundentes del mismo. Como puede observarse en la Figura III.16, el ácido oleico utilizado presenta un intervalo de temperaturas de fusión comprendido entre -20 y 30°C , debido a la inercia térmica del equipo, encontrándose el pico de fusión en 10°C . Cuando el ácido graso se incorpora al mucílago, se modifican sus propiedades en forma dependiente de la cantidad de agua presente en la muestra, lo que es coherente con el desarrollo de interacciones de las moléculas de oleico con la matriz del mucílago que modifican sus características fundentes. En la muestra con mayor humedad se observa un desplazamiento del endotermo de fusión hacia temperaturas más bajas, de manera que queda situado entre -25 y 25°C , estando el pico máximo entorno a 7°C . Puede observarse, además, que el pico es tanto más marcado cuanto mayor es el contenido en agua de la muestra. Así mismo, se detecta una mayor dificultad para la cristalización, facilitándose el proceso a medida que aumenta el contenido en humedad de la muestra (mayor área del endodermo de fusión). Por otro lado, la progresiva disminución del contenido en agua

de las muestras no afecta al intervalo de fusión pero supone un desdoblamiento del pico, de manera que aparecen dos máximos alrededor de -8 y 5°C. Este comportamiento estaría confirmando lo descrito anteriormente, de manera que a bajos contenidos en agua hay una notable interacción agua-lípido-mucílago, que impide la cristalización-fusión de la grasa, mientras que al aumentar la presencia de agua, el lípido queda más libre con un comportamiento más similar al que presenta en estado puro.

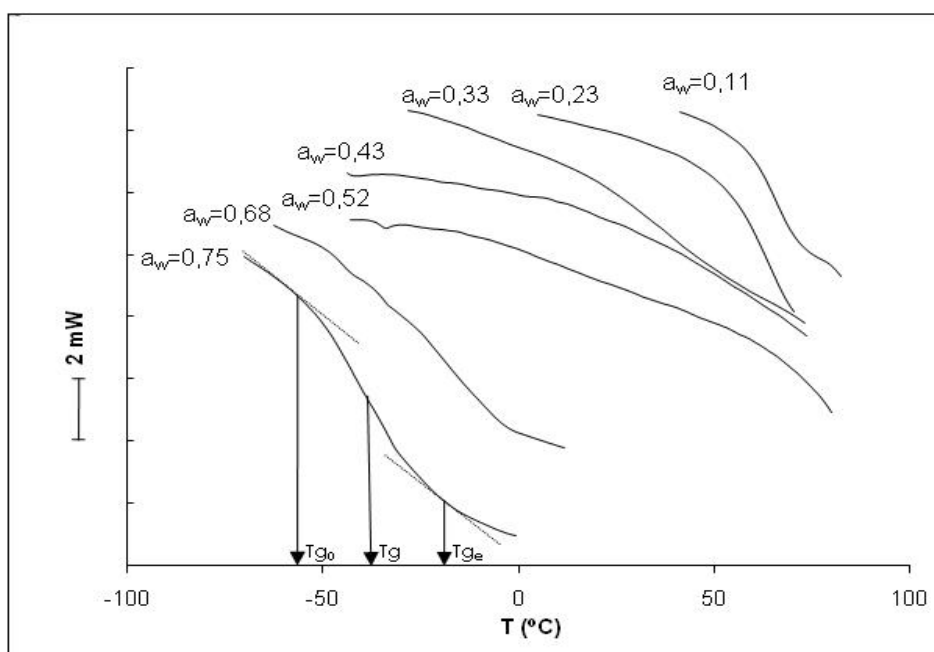


Figura III.15. Termogramas correspondientes al mucílago equilibrado a diferentes a_w , mostrando la transición vítrea (T_{g0} y T_{ge} : temperatura de inicio y fin de la transición; T_g , temperatura del punto medio de la transición, tomado como la característica de la transición vítrea).

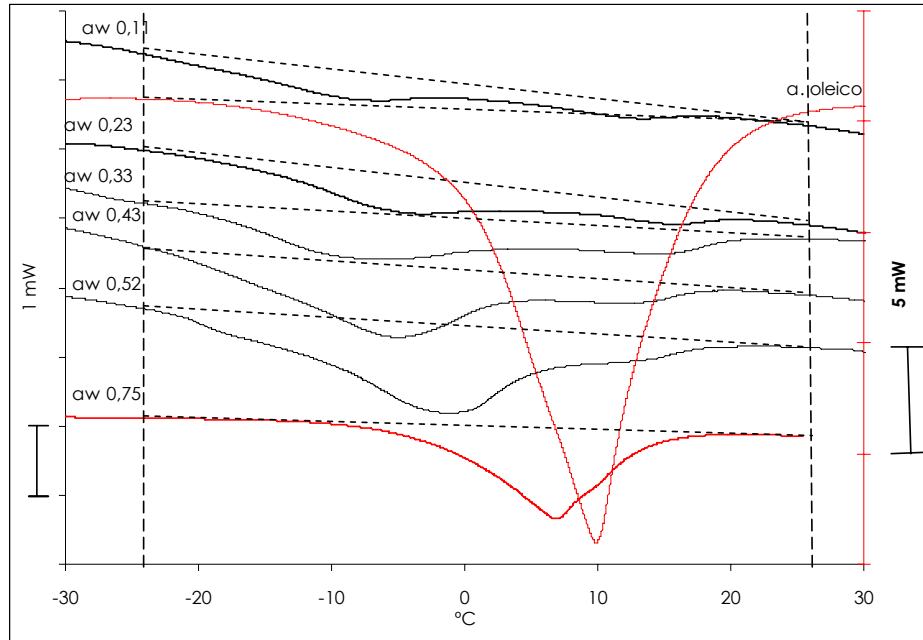


Figura III.16. Termogramas correspondientes al ácido oleico y a las muestras de mucílago con ácido oleico equilibradas a diferentes a_w . Se muestra la zona correspondiente a la fusión del ácido oleico, delimitada por la curva y la línea punteada.

Los valores de T_g que presentó cada una de las muestras de mucílago con diferente humedad aparecen en la Figura III.17. Como se puede observar, hay un claro efecto plastificante del agua que hace disminuir el valor de dicha T_g cuando aumenta el contenido en agua en la muestra. Estos datos fueron ajustados al modelo de Gordon y Taylor. Para ello se ajustó la Ecuación linealizada (III.18) mediante una regresión lineal, de manera que la pendiente coincide con el valor de la constante K y la ordenada en el origen con la T_g de los sólidos anhidros (T_{gs}) (Figura III. 18). El

valor obtenido de los parámetros de este modelo fue $T_{gs} = 100^{\circ}\text{C}$ y $K = 6,36$ ($R^2=0,943$). La Figura III.17 muestra la comparación entre los valores experimentales y el comportamiento predicho por el modelo.

$$T_g = k \left[\frac{x_w(T_{gw} - T_{gs})}{x_s} \right] + T_{gs} \quad (\text{III.18})$$

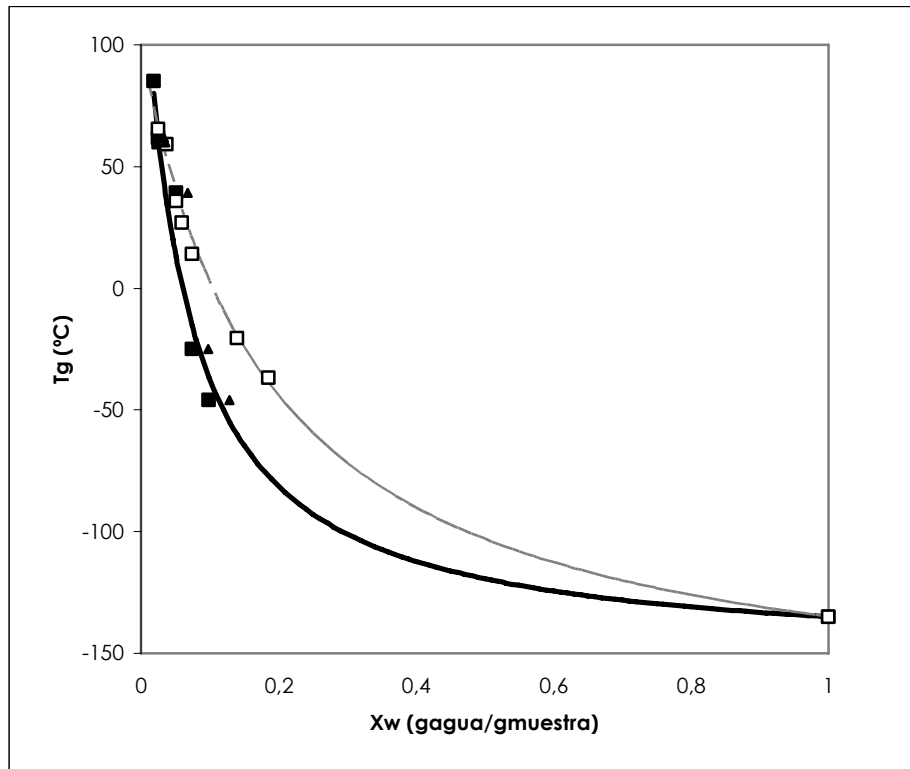


Figura III.17. Relación entre la temperatura de transición vítrea y la humedad del mucílago sin (símbolos huecos) y con ácido oleico (símbolos rellenos). Datos experimentales y Modelo de Gordon y Taylor ajustado. Triangulo: datos de humedad expresada en base libre el oleico (BLO).

Uno de los factores que afectan al valor de T_g de los

polímeros es el peso molecular promedio del compuesto, de manera que el valor de T_g aumenta al incrementar el PM del polímero. El valor de la T_g del mucílago anhidro obtenido del ajuste está en relación con el alto valor del PM (320,000 Daltons) caracterizado para el mucílago ESC.

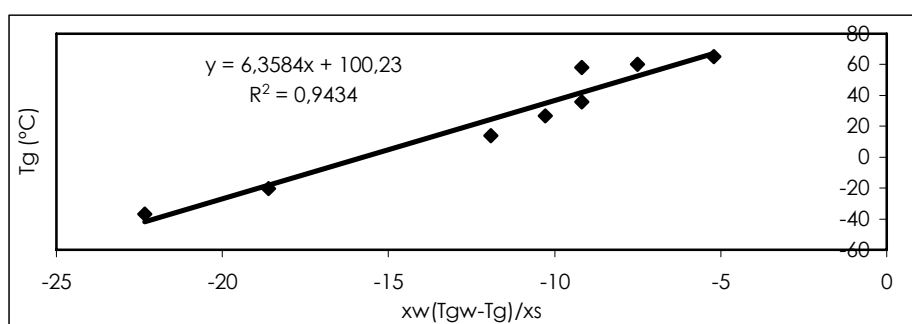


Figura III.18. Gráfico de T_g vs $(x_w * T_{gw} - T_g) / x_s$ para el mucílago ESC.

La incorporación del oleico también modificó las relaciones T_g -humedad, modificándose el efecto plastificante del agua (Figura III.17). El ajuste del modelo de Gordon y Taylor a los valores de T_g -humedad de las muestras con oleico (con un coeficiente de determinación de 0,618) dio como resultado un mayor valor de T_{gs} (149°C) y $K=17,21$.

A partir de la Ecuación de Gordon y Taylor (III.14) se calculó el valor de humedad crítica (CWC) del mucílago que promueve la transición vítrea del mismo a temperatura ambiente (20°C), obteniéndose un valor de 0,0752 g

agua/g mucílago (0,0813 g agua/g mucílago seco). Con este valor, utilizando la Ecuación de GAB (III.12), se obtiene un valor de actividad de agua crítico (CWA) de 0,528. Esto significa que a actividades menores a este valor (HR ambiente inferior a 52,8%), y a esa temperatura de almacenamiento, el mucílago se mantendrá vítreo y por tanto con una movilidad molecular limitada, mientras que a HR mayores se producirá el paso al estado gomoso en el se promueven todos los fenómenos asociados a la difusión molecular debido al incremento en la movilidad de las moléculas: reacciones de deterioro, transferencia de masa, etc. En el caso concreto de los productos en polvo, el principal problema de estabilidad radica en el colapso de la estructura y los fenómenos de apelmazamiento. Una correlación completa de las relaciones T_g -humedad-actividad de agua, como la que se muestra en la Figura III.19 permite seleccionar diferentes condiciones temperatura-HR del ambiente que asegure la estabilidad del producto durante su almacenamiento.

Como se muestra en la Figura III.19 el producto con oleico resulta más inestable. Así por ejemplo, los valores críticos, a 20°C, se reducen a CWC=0,0463 g agua/g mucílago y CWA=0,449. Es decir la plastificación provocada por el agua se hace patente a menor humedad debido a la presencia de oleico, lo que probablemente está

relacionado con la contribución de las moléculas de oleico a la movilidad molecular, potenciándose los efectos plastificantes.

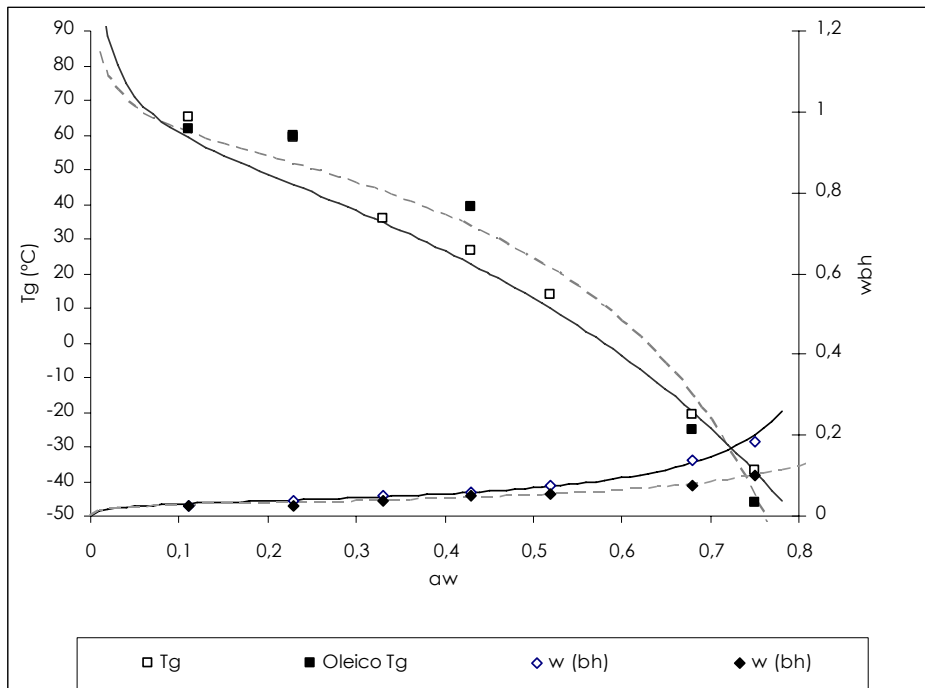


Figura III.19. Relación temperatura de transición vítrea-humedad-actividad de agua para el mucílago sin (símbolo hueco y línea continua) y con ácido oleico (símbolo relleno y línea punteada).

En conclusión el mucílago del nopal presenta un comportamiento vítreo, a temperatura ambiente, a humedades de equilibrio por debajo de 7,5 % (bh), mientras que por encima de estos valores exhibe un comportamiento gomoso que afectará en gran medida a sus propiedades mecánicas y a todas las características dependientes de la

difusión molecular, que afectan a su estabilidad y a las propiedades de transporte. La mezcla con ácido oleico en proporción 1:0,35 presentó valores inferiores de la humedad crítica (4,6 %, bh) probablemente como consecuencia del efecto plastificante del lípido.

IV. DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE LOS FILMS

3.3. 4.1. Materiales y Métodos

4.1.1. Diseño y preparación de las dispersiones formadoras de films (DFF)

Para la elaboración de las dispersiones formadoras de films se utilizó el mucílago escaldado (obtenido como se explico en el Capítulo III), ácido oleico y ácido esteárico (Panreac, Barcelona, España).

Las dispersiones formadoras de películas se obtuvieron solubilizando el mucílago escaldado en agua destilada a una concentración del 3 g de s.s / 100 g de dispersión, a temperatura ambiente, con agitación vigorosa durante 10 min (Ultraturrax T25, 8000 rpm), agitándose posteriormente durante 18 h con agitador magnético (IKA-RCT basic) a 450 rpm (Maftoonazad *et al.*, 2007a). Cuando se incorporó ácido oleico a la formulación, éste se adicionó en las proporciones señaladas en la Tabla IV.1, formándose la emulsión correspondiente en cada caso. La homogenización de la emulsión se llevó a cabo en un equipo Ultraturrax T25 a 13500 rpm durante 4 min a temperatura ambiente (Hoagland y Parris, 1996; Maftoonazad *et al.*, 2007a). Para la obtención de las formulaciones con ácido esteárico, éste se incorporó, previamente fundido, en las proporciones indicadas en la Tabla IV.1, a la dispersión acuosas del mucílago a 80°C, calentando con agitación suave durante 15 min.

Posteriormente, las DFF se homogenizaron en caliente de la misma manera que las dispersiones anteriores. Todas las DFF se sometieron a vacío para eliminar las burbujas de aire incorporadas durante la homogenización y se extendieron en placas de politetrafluoretileno de 15 cm de diámetro para su posterior secado a temperatura ambiente. El espesor de los films se controló a través de la extensión de la cantidad requerida de DFF para ajustar a un nivel constante la cantidad total de sólidos por unidad de superficie de la placa, la cual fue de 141,47 g/m² (155,61 g/m² para las formulaciones con ácido esteárico). Las películas secas se despegaron de las placas y fueron acondicionadas en su contenido en humedad mediante el equilibrado en desecadores, a 20°C, con tres diferentes niveles de humedad relativa (33, 52 y 75%), obtenidos mediante la presencia de disoluciones sobresaturadas de MgCl, MgNO₃ y NaCl, respectivamente. Posteriormente, los films se caracterizaron en cuanto a diferentes propiedades.

Tabla IV.1. Proporciones másicas de mucílago seco y ácidos grasos en las distintas formulaciones de los films.

Formulación	Mucílago (M)	A. oleico (O)	A. esteárico (E)
M-1:O/E-0	1	0	0
M-1:O-0,25	1	0,25	0
M-1:O-0,35	1	0,35	0
M-1:O-0,50	1	0,50	0
M-1:E-0,10	1	0	0,10
M-1:E-0,15	1	0	0,15
M-1:E-0,20	1	0	0,25

4.1.2. Caracterización de los films

4.1.2.1. Medición del espesor

Para la evaluación de las propiedades mecánicas y de barrera es importante la determinación del espesor de los films. Estos se midieron con un micrómetro digital (Palmer Comecta, España, $\pm 0,001$ mm) en las muestras equilibradas a 52% de humedad relativa. En cada muestra se tomaron 3 ó 5 mediciones, según el tamaño de la muestra para cubrir varias secciones de la misma.

4.1.2.2. Propiedades mecánicas

Los ensayos mecánicos se realizaron en un analizador de textura (Modelo TAXT.plus, Stable Micro Systems, Surrey, Reino Unido), con una célula de carga de 50 N y pinzas de tensión (A/TG). Las condiciones del ensayo fueron: distancia de retorno 50 mm, velocidad de 0,83 mm/s (ASTM, 2001). Las mediciones (seis repeticiones por formulación) se llevaron a cabo en tiras de films de 10 x 2 cm, previamente acondicionadas a las a_w mencionadas anteriormente.

Las curvas fuerza-distancia obtenidas en los ensayos fueron transformadas en curvas de esfuerzo-deformación de Hencky (Peleg, 1979), utilizando las Ecuaciones IV.1 y IV.2. De estas curvas, se obtuvieron el esfuerzo de fractura (TF), el porcentaje de deformación de Henky en el punto de

fractura (% ε_H) y el módulo de elasticidad (E) o pendiente de la curva en el tramo lineal inicial.

$$T = F \frac{L_0 - L_t}{A_0 L_0} \quad (\text{IV.1})$$

$$\varepsilon_H = \ln L_0 + \frac{L_t}{L_0} \quad (\text{IV.2})$$

donde T, esfuerzo (Pa); F, fuerza (N); L_0 , longitud inicial del film (m); L_t , longitud del film en el tiempo t (m); A_0 , área transversal inicial del film (m^2) y ε_H , deformación de Hencky.

4.1.2.3. Permeabilidad al vapor de agua

La permeabilidad al vapor de agua de las películas se determinó por un método gravimétrico a 5°C usando una modificación del método ASTM E96-92 (ASTM, 1995). Se utilizaron unas células de permeabilidad Payne (Elcometer SPLI, Hermelle/s Argenteau, Bélgica) con 5 ml de agua destilada para conseguir una humedad relativa del 100% (P_{w0}) en el interior de la célula. El film acondicionado a cada una de las humedades relativas (disco de 5 cm de diámetro), se colocó en la célula de manera que la cara del film correspondiente a la superficie de secado libre estaba expuesta al ambiente con 100 % de HR. Las células con el film se introdujeron en un desecador con agitación del aire, donde estaba presente la solución saturada de cloruro de magnesio, nitrato de magnesio o cloruro de

sodio, para controlar la HR a 33,6, 58,9 o 75,5%, respectivamente (P_{w2}). Las muestras se pesaron durante 9 h a intervalos de 1,5 h entre cada pesada. Se hicieron 6 repeticiones para cada formulación del film equilibrada a cada uno de los tres niveles de HR.

Se determinaron los valores de la velocidad de transmisión de vapor de agua (VTVA), correspondiente a la pendiente de la curva obtenida del análisis de regresión lineal de los datos de pérdidas de peso en función del tiempo, (Ecuación IV.3). La Ecuación IV.4 permite obtener el valor de la permeabilidad al vapor de agua (PVA) en cada caso.

$$VTVA = \frac{J}{A} \quad (IV.3)$$

$$PVA = \frac{VTVA}{P_{w1} - P_{w2}} L \quad (IV.4)$$

donde: VTVA, velocidad de transmisión de vapor de agua ($\text{g s}^{-1} \text{m}^{-2}$); J, pendiente de la curva de pérdida de peso en el tramo lineal (g s^{-1}); A, área efectiva para la transmisión de vapor de agua (m^2); P_{w1} , presión parcial de vapor de agua en la superficie del film en la cara interna de la celda (Pa); P_{w2} , presión parcial de vapor de agua en la superficie del film en la cara externa (Pa) y L, espesor del film (m).

Se realizó la corrección establecida para films hidrofílicos para los valores de la PVA, ya que en estos casos

no se cumple la hipótesis del método ASTM de que la resistencia al transporte de agua a través del espacio de aire entre la superficie del agua y el film es despreciable. Para ello, se utilizó el método propuesto por Gennadios *et al.*, 1994 para ajustar el valor de P_{w1} , aplicando las Ecuaciones IV.5, IV.6, IV.7 y IV.8.

$$P_{w1} = P_t - (P_t - P_{w0})e^{-N_w \frac{h_i}{D}} \quad \text{(IV.5)}$$

$$N_w = 6,43 \times 10^{-11} VTVA \quad \text{(IV.6)}$$

$$c = \frac{P_t}{RT} \quad \text{(IV.7)}$$

$$D = 0,26 \frac{T^{1,8}}{298} \quad \text{(IV.8)}$$

donde: P_t , presión total del sistema (Pa); P_{w0} , presión de vapor saturado del agua a la temperatura de trabajo (Pa); N_w , flujo de agua en el film ($\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$); h_i , distancia entre el agua y el film (m); c , concentración molar total de aire y vapor de agua (mol m^3); D , difusividad del vapor de agua en el aire ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$); T , temperatura de trabajo (K) y R , constante universal de los gases ($\text{Pa m}^3 \text{mol}^{-1} \text{K}$).

4.1.2.4. Solubilidad en agua

Un trozo de 1 x 1 cm de film (preacondicionado a las tres humedades relativas de trabajo) se colocó en un tubo que contenía 1 ml de agua destilada a 20°C. El sistema se

mantuvo en agitación suave durante 30 min. Transcurrido este tiempo se midieron los °Bx de la fase acuosa. La determinación se hizo por triplicado, para cada formulación de los films equilibrados a cada uno de los niveles de humedad relativa (modificación del método propuesto por Gontard *et al.*, 1992).

4.1.2.5. Propiedades ópticas

4.1.2.5.1. Color

El color de los films se midió en un espectrofotómetro (Minolta CM-3600d, Tokio, Japon), con un área de medida de 10 mm, sobre una placa negra y otra blanca de espectro de reflexión conocido. El color de las muestras se calculó aplicando la teoría de Kubelka-Munk (Hutchings, 1999), determinando la reflectancia para espesor infinito de los films (Ecuación IV.11) y, a partir de ésta, las coordenadas CIE $L^*a^*b^*$, con el sistema de referencia iluminante D_{65} y observador a 10° . La luz que pasa a través de la muestra se ve afectada por el coeficiente de absorción (K) y el coeficiente de dispersión (S) (Ecuación IV.9). En esta ecuación, R_∞ es la reflectancia de la muestra con un espesor infinito, determinada a través de las Ecuaciones IV.10, IV.11 y IV.12 en función de la reflectancia de la muestra (R), medida sobre un fondo negro de reflectancia

conocida (R_g), y R_0 es la reflectancia de la muestra sobre un negro ideal.

$$\frac{K}{S} = \frac{(1-R_{00})^2}{2R_{00}} \quad \text{(IV.9)}$$

$$R_{00} = a - b \quad \text{(IV.10)}$$

$$a = \frac{1}{2} \left(\frac{R_0 - R + R_g}{R_0 R_g} \right) \quad \text{(IV.11)}$$

$$b = (a^2 - 1)^{1/2} \quad \text{(IV.12)}$$

La transparencia fue determinada aplicando la teoría de Kubelka-Munk (Hutchings, 1999) a los espectros de reflexión de las muestras sobre fondo blanco y negro y determinando la transmitancia interna, T_i (Ecuación IV.13):

$$T_i = \sqrt{(a - R_0)^2 - b^2} \quad \text{(IV.13)}$$

Para cada formulación y a los niveles de humedad relativa de 52 y 75 %, se hicieron lecturas en tres diferentes puntos del film y se midieron 3 films diferentes. Para la HR del 33 %, la fragilidad del film dificultó su medición, para lo cual los films se molieron y se midió el polvo compactado por vibración, para algunas formulaciones.

A partir de las coordenadas L^* , a^* y b^* se calculó el índice de blancura (IB) de los films mediante la Ecuación IV.14.

$$IB = 100[(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2} \quad (IV.14)$$

Con el fin de evaluar el efecto de la adición de lípidos en el color del film se calculó la diferencia de color (Ecuación III.3. del Capítulo III, apartado 3.1.3.2) de las diferentes formulaciones a cada nivel de HR, con respecto al film de mucílago. Así mismo, se evaluó la diferencia de color debida al nivel de humectación, considerando para una determinada formulación el valor correspondiente a la humedad más baja como valor de referencia.

4.1.2.5.2. Brillo

El brillo de las películas se determinó con un brillómetro (Multi-Gloss 268. modelo 920, Minolta, Alemania) a diferentes ángulos de incidencia (20, 60 y 85°) perpendicularmente a la superficie del film, de acuerdo con el estándar D523 de la ASTM (ASTM, 1999), usando una placa estándar negra como fondo. Los resultados se expresan en unidades de brillo, relativos a una superficie altamente pulida de un vidrio negro estándar con un valor cerca al 100. Se hicieron repeticiones de las medidas de la misma forma que para el color.

4.1.3. Aplicación de recubrimientos en cubos de jícama.

4.1.3.1. Materia prima

Las jícamas (*Pachyrhizus erosus* (L.) Urban) se compraron en el mercado local de la ciudad de Aguascalientes, México y se procesaron ese mismo día. Se seleccionaron las piezas libres de defectos.

Se lavaron y pelaron las jícamas antes de obtener cubos de 1 cm³ para la aplicación de los recubrimientos y el control.

4.1.3.2. Obtención de las dispersiones formadoras de recubrimientos (DFR) y su aplicación

Las dispersiones fueron obtenidas tal y como se describió en el apartado 4.1.1. Las formulaciones aplicadas fueron las de mucílago y de mucílago con ácido oleico; para el control se usó agua destilada.

Los cubos de jícama, previamente pesados, se sumergieron en las distintas DFR por 30 s, se dejaron escurrir y se pesaron para determinar la cantidad de recubriendo adherido. Después se dejaron secar sobre una rejilla por convección natural durante 45 min a 20°C periodo en el que el producto recubierto perdió el agua procedente de la DFR adherida. Después de ese tiempo se pesaron nuevamente e introdujeron en tarrinas perforadas de polietileno de 250 ml de capacidad, colocando 9 cubos por

envase. Cada formulación se aplicó por triplicado. Las muestras se almacenaron en refrigeración a 5°C y 75% de HR por 14 días. En la Tabla IV.2 se muestra la nomenclatura utilizada para identificar cada formulación.

Tabla. IV.2. Nomenclatura y formulación de los recubrimientos aplicados.

Nomenclatura	Formulación
C	Agua destilada
O-0	M-1:O/E-0
O-25	M-1:O-0,25
O-35	M-1:O-0,35
O-50	M-1:O-0,50

El valor medio del espesor de los recubrimientos, se estimo mediante la cuantificación de la densidad de sólidos superficiales (DSS) alcanzada después de su aplicación y eliminación del exceso de DFR del cubo de jícama. La densidad superficial de sólidos, como indicador del espesor medio del recubrimiento, se determino mediante la Ecuación IV.15:

$$DSS = M_{FA} \frac{x_s}{A} \quad (IV.15)$$

donde: DSS, densidad superficial de sólidos (g/m²), M_{FA}, masa de disolución adherida en la superficie de la muestra (g), x_s, fracción másica de sólidos en la formulación formadora de recubrimiento, A, superficie de la muestra (m²).

4.1.3.3. Evaluación de la pérdida de calidad durante el almacenamiento

4.1.3.3.1. Pérdida de peso

Los pesos individuales de cada muestra fueron registrados cada tres días. La pérdida de peso acumulado se expresó en porcentaje de pérdida de peso en relación al peso inicial.

4.1.3.3.2. Firmeza

La firmeza de los cubos de jicama se determinó en un analizador de textura TA-XT2i (Stable Micro Systems Ltd.), midiendo la fuerza requerida para que una aguja de prueba de 2 mm penetrará en la muestra 6 mm a una velocidad de 1 mm/s.

4.1.3.3.3. Color

Se utilizó un colorímetro Minolta modelo CR-400/410 y el sistema de referencia iluminante D₆₅ y observador 10°. Las mediciones se realizaron cada cuatro días. Se obtuvieron las coordenadas de color CIE L*, a* y b* y la diferencia de color, respecto al color inicial.

4.2. Resultados y Discusión

4.2.1. Propiedades mecánicas de los film

Las propiedades mecánicas de los films dependen, entre otros factores, de su composición y estructura (Maftoonazad *et al.*, 2007a). Los resultados obtenidos en la caracterización mecánica (tensión de Fractura: TF, módulo de elasticidad: E y de deformación en la fractura: % ϵ_H) de los diferentes films obtenidos con mucílago puro, con incorporación de ácido oleico o esteárico y equilibrados a diferentes humedades, se muestran en la Tabla IV.3, junto con el grosor obtenido para cada film. Como se puede apreciar, tanto la adición de lípidos (tipo y cantidad) a la composición del film, como la humedad de equilibrio afectan a las propiedades mecánicas del film. El film elaborado solamente con el mucílago de nopal, equilibrado con una HR de 58%, presentó el valor mayor de tensión de fractura. Este valor, 2,1 MPa, es del mismo orden del reportado por McHugh y Olsen (2004) para films elaborados con pectina de durazno (1,8 MPa), en condiciones similares de humedad. En films de β -glucano, Skendi *et al.* (2003) reportan valores de TF de 70-80 MPa, del módulo de elasticidad E, de 2500-6000 MPa y porcentajes de deformación en la fractura de 3-5%. Algunos valores de las propiedades mecánicas para films elaborados a base de pectina son: TF de 2 a 7,5 MP, E de 127 a 323 MPa y % ϵ_H de 4 a 14% (Maftoonazad, *et al.*, 2007a). Los trabajos realizados por Debeaufort y Voilley (1997) con films de

Tabla IV.3. Valores medios del grosor de los films y de las propiedades mecánicas y desviación estandar a tres HR de equilibrio.

Muestra	Espesor (mm)	a_w 0,33			a_w 0,52			a_w 0,75		
		TF (MPa)	% ϵ_H	E (MPa)	TF (MPa)	% ϵ_H	E (MPa)	TF (MPa)	% ϵ_H	E (MPa)
M-1:O/E-0	0,209 ± 0,013 ab				2,01 ± 0,14 c	0,84 ± 0,09 a	360,06 ± 10,42 c	0,35 ± 0,01 a	31,16 ± 2,54 c	2,69 ± 0,09 a b
M-1:O-0,25	0,198 ± 0,009 a	5,50 ± 0,63 c	0,52 ± 0,04 a	952,08 ± 16,28 b	1,56 ± 0,12 d	2,95 ± 0,02 b	151,06 ± 7,49 b	0,44 ± 0,03 b	34,53 ± 1,18 d	2,90 ± 0,10 b
M-1:O-0,35	0,198 ± 0,021 a	2,43 ± 0,25 a	0,61 ± 0,03 a	633,60 ± 15,17 c	0,66 ± 0,03 b	5,43 ± 0,04 c	73,72 ± 10,11 a	0,25 ± 0,02 c	15,00 ± 0,86 b	2,39 ± 0,12 a
M-1:O-0,50	0,204 ± 0,006 ab	1,37 ± 0,05 b	5,43 ± 0,38 b	318,62 ± 7,76 a	0,52 ± 0,004a	4,52 ± 0,02 d	62,12 ± 15,65 a	0,20 ± 0,01 d	2,99 ± 0,07 e	33,22 ± 0,46 c
M-1:E-0,10	0,218 ± 0,017 ab	2,98 ± 0,14 d	0,49 ± 0,03 a	962,77 ± 39,88 b	0,93 ± 0,03 e	0,53 ± 0,01 e	319,76 ± 13,45 d	0,34 ± 0,01 a	16,80 ± 0,03 b	4,79 ± 0,11 d
M-1:E-0,15	0,215 ± 0,003 ab	2,03 ± 0,19 a	0,62 ± 0,03 a	499,13 ± 26,28 d	0,78 ± 0,04 b	1,19 ± 0,01 f	172,39 ± 9,58 b	0,15 ± 0,04 e	5,46 ± 0,19 a	6,73 ± 0,13 e
M-1:E-0,20	0,223 ± 0,005 b	1,06 ± 0,08 b	0,51 ± 0,04 a	302,47 ± 5,33 a	0,56 ± 0,01ab	7,12 ± 0,21 g	77,26 ± 16,74 a	0,08 ± 0,01 f	5,00 ± 0,10 a	2,90 ± 0,29 b

Grupos homogéneos letras iguales en la columna con un nivel de confianza de ($\alpha < 0,05$)

metilcelulosa reportan valores de estas propiedades de 12 MPa para tensión de fractura y 5% de elongación a HR de 75%. El valor de tensión de fractura es mucho mayor que el obtenido para el film de mucílago en esas condiciones, pero ocurre lo contrario con la elongación del film, siendo el del mucílago mucho más deformable o flexible que el de metilcelulosa. La tensión de fractura es una medida de la integridad y del uso potencial del film en condiciones de manipulación drásticas (Gennadios y Weller, 1993).

En la Figura IV.1 se puede observar que para todos los casos el valor de la tensión de fractura disminuye al aumentar la HR de equilibrio, es decir, la absorción de agua en la matriz del mucílago la vuelve más blanda y menos resistente a la ruptura debido al efecto plastificante del agua en la matriz polimérica discutido en el capítulo anterior. El valor de actividad de agua crítico (CWA) para el paso de estado vítreo (frágil y quebradizo) a gomoso (flexible) se estableció en 0,528 para el mucílago. Esto se refleja claramente en el comportamiento mecánico; mientras los films equilibrados a $a_w=0,33$ no pudieron caracterizarse mecánicamente por su alto carácter quebradizo, los equilibrados a $a_w=0,52$ presentaron valores medibles y muy superiores a los equilibrados a $a_w=0,75$. En el caso de films con lípidos puede observarse que la influencia de la humedad es menor, aunque se observa un efecto

plastificante del mismo lípido, también ya comentado para el ácido oleico en el capítulo anterior. A medida que aumenta la proporción de lípido disminuye la tensión de fractura para un mismo contenido en humedad. Este efecto es de diferente magnitud para el ácido oleico y el esteárico. De hecho, para el ácido esteárico no se pudieron incorporar al film proporciones mayores, del orden de las añadidas de ácido oleico, porque los films obtenidos eran demasiado frágiles y no se podían manipular.

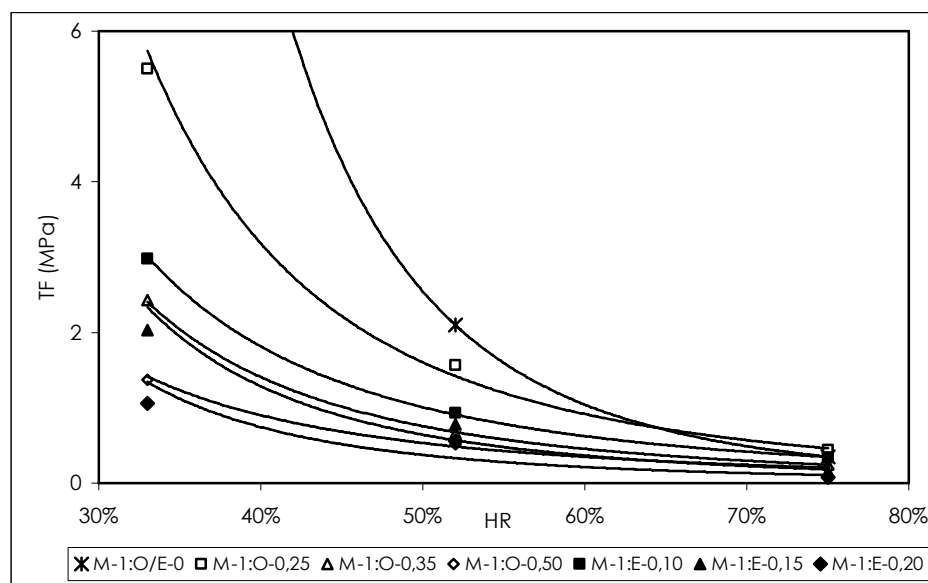


Figura IV.1. Efecto de la HR de equilibrio en la tensión de fractura de los films para el mucílago puro y con lípidos. Datos experimentales (símbolos), ajuste (líneas).

El efecto plastificante del agua, para el caso de la humedad más alta, hace que todos los films presentaran

valores muy similares de la tensión de fractura, independientemente de su composición en lípidos. Sin embargo, a bajas humedades (HR 33%), puede observarse que la proporción y tipo de lípido juega un papel importante en esta característica de los films. La Figura. IV.2 muestra el efecto de la proporción de lípido para las diferentes humedades. A medida que aumenta la proporción de lípido disminuye la tensión de fractura y este efecto es superior para el ácido esteárico que, incluso con proporciones de lípido inferiores, da lugar a films menos resistentes a la fractura. Aparte de las interacciones de los lípidos con las moléculas de la matriz, que modifican el grado de agregación de las cadenas y la resistencia de la red polimérica, la presencia de gotas o partículas lipídicas supone discontinuidades de la matriz que la hace menos resistente a las deformaciones (Morillon *et al.*, 2002; Bravin *et al.*, 2004; Fabra *et al.*, 2008). El estado físico de las partículas de lípido influye también en gran medida en el comportamiento mecánico del film ya que, dependiendo de si son líquidas o sólidas, son más o menos deformables durante la extensión del film, permitiendo en mayor o menor proporción su flexibilidad. En este sentido, el ácido oleico, líquido a temperatura ambiente, permite la obtención de films más flexibles que el ácido esteárico cuyo punto de fusión es de 66 a 69°C. Esto contribuye también a explicar la

imposibilidad de incorporar mayores proporciones de esteárico al mucílago sin incrementar excesivamente su carácter quebradizo.

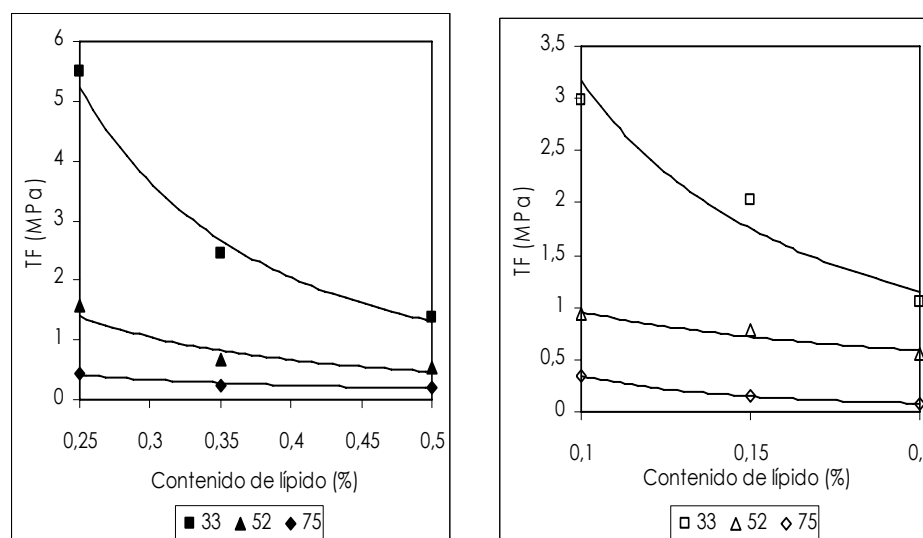


Figura IV.2. Efecto del contenido de lípido en los films en la tensión de fractura a tres HR. Ácido oleico (izquierda), ácido esteárico (derecha).

La Figura IV.3 muestra el efecto de la HR y composición de los films en la deformación alcanzada en el punto de fractura. Ésta va aumentando al aumentar la HR como consecuencia del incremento en el carácter gomoso de la matriz, que la hace más deformable. En cuanto a la composición en lípidos del film, la presencia de ácido oleico hace a los films más deformables que la de ácido esteárico a todas la a_w de equilibrio. Esto está relacionado principalmente con el punto de fusión de los

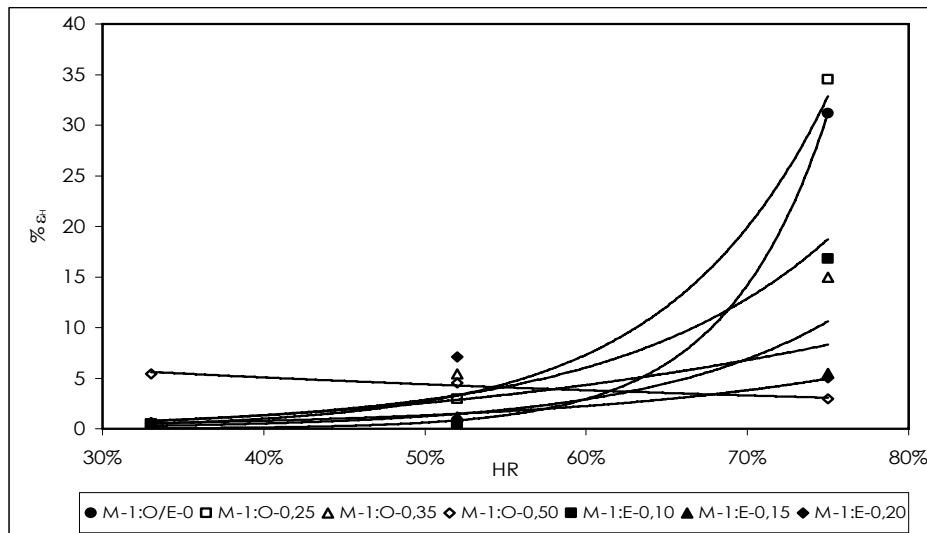


Figura IV.3. Efecto de la HR de equilibrio en la deformación de Henky de los films para el mucílago puro y con lípidos. Datos experimentales (símbolos), ajuste (líneas).

lípidos, tal como se menciona en el párrafo anterior. La Figura IV.4 muestra el efecto de la proporción de lípido en la deformabilidad de los films para las diferentes humedades relativas de equilibrio. Es de destacar que, a bajas humedades, un aumento en la proporción de lípido supone, en general, un aumento en la capacidad de deformación (flexibilidad), pero para humedades más altas, a medida que aumenta la proporción de lípido en el film, se hace menos deformable. Esto apunta a la diferente contribución de la fase continua (matriz polimérica) y de la fase dispersa (glóbulos de lípidos) a la respuesta mecánica, dependiendo del nivel de hidratación de la matriz. Para altas humedades, la red polimérica es muy gomosa y blanda y la presencia de

discontinuidades supone el verdadero límite a la deformación, siendo éstas las responsables de la ruptura. No obstante, cuando la matriz es más rígida, a bajas humedades, la presencia de discontinuidades (sobre todo en estado líquido) le imparte una mayor capacidad de deformación sin fractura.

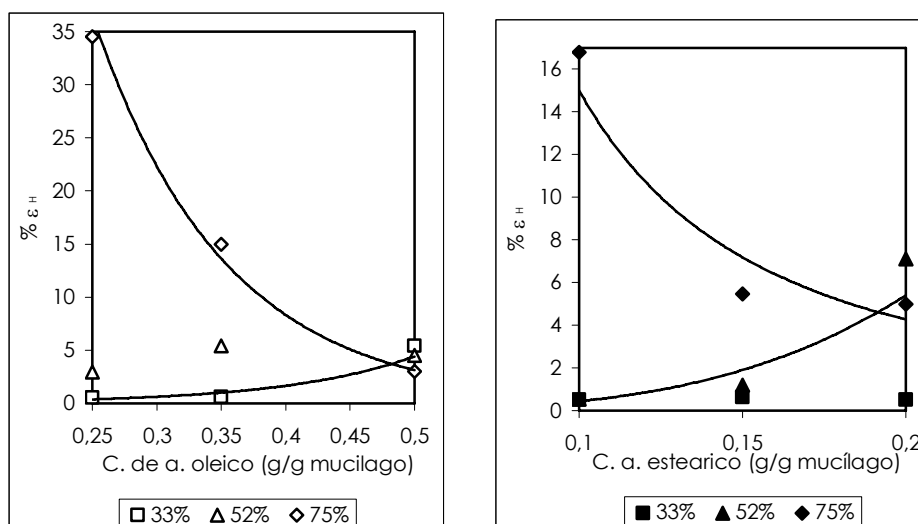


Figura IV.4. Efecto del contenido de lípido en los films en el % de deformación de Henky a tres HR. Ácido oleico (izquierda), ácido esteárico (derecha).

El módulo de elasticidad representa la rigidez intrínseca del film (Chen, 1995). En la Figura IV.5 se da la variación del módulo de elasticidad en función de la HR y composición del film. Para todos los casos el valor de E disminuye al aumentar la HR ya que los films se vuelven gomosos a altas a_w debido a la adsorción de agua (Figura

IV.6). A baja HR el ácido esteárico hace al film más elástico (mayores valores de E) que el ácido oleico, ya que se obtienen valores similares de E para los films elaborados con ácido esteárico aunque éste se encuentra en menor proporción que el ácido oleico (Figura. IV.6). Esto está en coherencia con el estado sólido del ácido esteárico, lo que contribuye a impartir rigidez a la matriz.

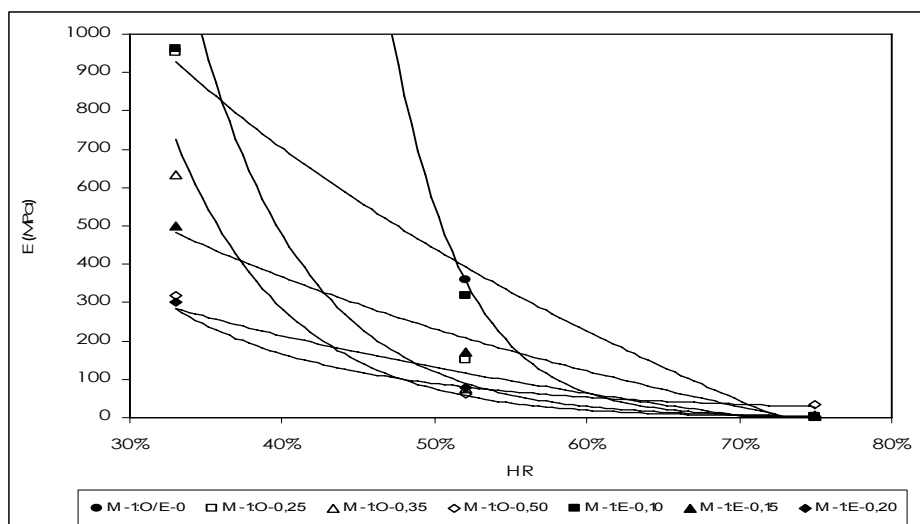


Figura IV.5. Efecto de la HR de equilibrio en el módulo de elasticidad de los films para el mucílago puro y con lípidos. Datos experimentales (símbolos), ajuste (líneas).

Las variaciones observadas para las propiedades mecánicas con la humedad fueron ajustadas a ecuaciones potenciales ($y=ax^b$), exponenciales ($y=a \cdot e^{bx}$) o logarítmicas ($y=a \cdot \ln x + b$). La Tabla IV.4 muestra los valores de los coeficientes

de las relaciones obtenidas, junto a los valores del coeficiente de determinación en cada caso.

El efecto que tienen las concentraciones de ácido oleico y esteárico en las propiedades mecánicas de los respectivos films a las diferentes HR de equilibrio (Figuras IV.2, IV.4 y IV.6), se ajustó a un comportamiento lineal ($y=a+bx$), potencial ($y=ax^b$) o exponencial ($y=a \cdot e^{bx}$) La Tabla IV.5 contiene los valores de las constantes para los films con ácido oleico y esteárico a las tres HR de equilibrio.

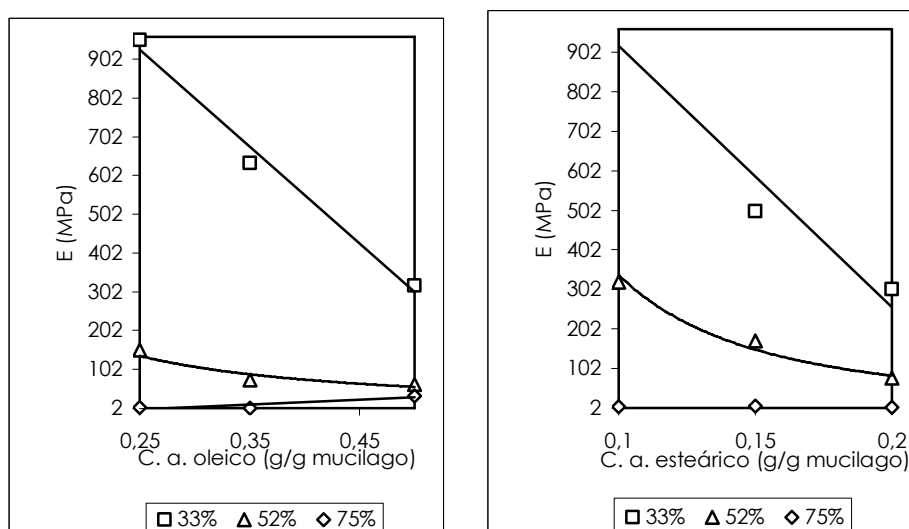


Figura IV.6. Efecto del contenido de lípido en los films en el módulo de elasticidad a tres HR. Ácido oleico (izquierda), ácido esteárico (derecha).

En conclusión, los films del mucílago del nopal mostraron adecuadas propiedades mecánicas cuando se encuentran con valores de humedad de equilibrio con a_w

Tabla IV.4. Valores de los coeficientes y coeficiente de determinación (R^2) de las relaciones existentes entre TF, ϵ_H y E con la HR de equilibrio para los films sin y con ácidos grasos.

P. Mecánica	Muestra	Modelo	a	b	R ²
TF (MPa)	M-1:O/E-0	Potencial	-4,90	0,085	1,000
	M-1:O-0,25		-3,07	0,191	0,996
	M-1:O-0,35		-2,79	0,109	1,000
	M-1:O-0,50		-2,35	0,104	0,996
	M-1:E-0,10		-2,63	0,163	1,000
	M-1:E-0,15		-3,10	0,075	0,957
	M-1:E-0,20		-3,08	0,044	0,884
% ϵ_H	M-1:O/E-0	Exponencial	15,73	0,0002	1,000
	M-1:O-0,25		10,00	0,018	0,998
	M-1:O-0,35		7,53	0,066	0,932
	M-1:O-0,50		-1,44	9,022	0,973
	M-1:E-0,10		8,63	0,017	0,810
	M-1:E-0,15		5,25	0,097	0,971
	M-1:E-0,20	Potencial	2,91	19,192	0,696
E (MPa)	M-1:O/E-0	Exponencial	-21,29	2x10 ⁷	1,000
	M-1:O-0,25		-13,91	124617	0,977
	M-1:O-0,35		-13,33	59173	0,994
	M-1:O-0,50	Potencial	-2,79	12,941	0,964
	M-1:E-0,10	Logarítmica	-1176,70	-375,06	0,982
	M-1:E-0,15		-604,48	-187,03	0,984
	M-1:E-0,20		-370,06	-125,37	0,952

del orden de 0,52. Por debajo, son demasiado frágiles y quebradizos, coherentemente con el estado vítreo de la matriz. La incorporación de ácidos grasos, y en especial de oleico, mejora en gran medida las propiedades mecánicas de la matriz, permitiendo una buena flexibilidad incluso a los valores más bajos de la HR ensayados. No obstante, para humedades de equilibrio del orden del 75%, la matriz es muy deformable y la presencia de lípidos reduce en gran

medida su capacidad de deformación, aumentando su fragilidad.

Tabla IV.5. Valores de los coeficientes y coeficiente de determinación (R^2) de las relaciones existentes entre TF, ϵ_H y E con la fracción de ácido graso en el film a tres HR de equilibrio.

P. Mecánica	Muestra	Modelo	a	b	R^2	
TF (MPa)	OLEICO	Potencial	-2,00	0,328	0,986	
	33%		,1,58	0,157	0,893	
	52%		-1,14	0,085	0,933	
	75%	ESTEÁRICO	-1,46	0,111	0,941	
	33%		-0,71	0,188	0,933	
	52%		-2,10	0,003	0,999	
% ϵ_H	OLEICO	Exponencial	9,78	0,033	0,881	
	33%		-9,87	431,02	0,996	
	52%		Potencial	3,63	1866,1	0,905
	75%	-1,82		0,230	0,875	
	ESTEÁRICO	Lineal		-2499,6	1551,3	0,986
	33%		Potencial	-1,27	23,42	0,877
52%	Lineal		127,90	-34,06	0,832	
E (MPa)	OLEICO	Lineal	-2499,6	1551,3	0,986	
	33%		Potencial	-1,27	23,42	0,877
	52%		Lineal	127,90	-34,06	0,832
	75%	ESTEÁRICO	-6603	1578,6	0,948	
	33%		Potencial	-2,02	3,28	0,971
	52%					
75%						

4.2.2. Permeabilidad al vapor de agua de los films

Los valores medios obtenidos de permeabilidad para los diferentes films se muestran en la Tabla IV.6. Se puede

observar que tanto la presencia del ácido oleico como del esteárico provocan una reducción en la permeabilidad de los respectivos films, efecto que se mantiene a las tres humedades relativas de equilibrio. Los valores obtenidos son mayores que los reportados para films de otros hidrocoloides lo que puede deberse al alto carácter hidrófilico del film, asociado, en parte, a la presencia de solutos polares de bajo peso molecular e iónicos. Fabra *et al.*, (2008), dan valores de 1,1 y 1,0 g/Pa s m x 10⁻⁹, para films a base de caseinato de sodio, sin ácido oleico y con 0,25% de éste, respectivamente, para un gradiente de humedades relativas de 58/100. Maftoonazad *et al.*, (2007a) reportan

Tabla IV.6. Valores medios y desviación estándar de permeabilidad de los diferentes films equilibrados a las tres humedades relativas, utilizando los gradientes de HR: 33,9/100; 58,9/100 y 75,5/100, respectivamente.

Muestra	Permeabilidad g/Pa s m x 10 ⁻⁹		
	HR 33,9%	HR 58,9%	HR 75,5%
M-1:O/E-0	1,38 ± 0,03 b	3,32 ± 0,02 a	8,81 ± 0,34
M-1:O-0,25	0,63 ± 0,04 a	2,42 ± 0,12 b	4,06 ± 0,05 a
M-1:O-0,35	0,53 ± 0,01 a	1,84 ± 0,06 c	3,92 ± 0,03 a
M-1:O-0,50	0,40 ± 0,12 c	1,56 ± 0,11 c	3,45 ± 0,06
M-1:E-0,10	1,27 ± 0,03 d	3,09 ± 0,35 a	5,64 ± 0,03
M-1:E-0,15	1,14 ± 0,05 e	2,70 ± 0,54 a b	5,02 ± 0,02
M-1:E-0,20	0,96 ± 0,06 f	2,61 ± 0,23 b	4,36 ± 0,22

Grupos homogéneos letras iguales en la columna con un nivel de confianza de ($\alpha < 0,05$)

valores de permeabilidad para films a base de pectina cítrica, sorbitol y cera de abeja de 9,9 x 10⁻¹¹ g/Pa s m, a

temperatura ambiente y un gradiente de humedad relativa de 53/0.

En el proceso de la permeabilidad de un film están involucrados fenómenos de adsorción de agua en la capa en contacto con la mayor HR, de difusión a través del grosor del film y de desorción en la capa en contacto con la menor HR (Trejo *et al.*, 2001). Todo esto conlleva la ganancia de humedad del film y el establecimiento de un gradiente de concentración de agua en el mismo. A mayor diferencia de humedades relativas en el ensayo, mayor es el gradiente de humedad establecido. El nivel de hidratación del film es determinante de la movilidad molecular y por tanto de la velocidad con que las moléculas de agua pueden atravesar la barrera. Esto explica el hecho de que, a pesar de los menores valores del gradiente de humedades establecido, las muestras equilibradas con HR del 75,5% presentan los mayores valores de permeabilidad, mientras que las equilibradas al 33,9% presentan los valores más bajos.

En la Figura IV.7 se muestran las representaciones gráficas del comportamiento de la permeabilidad para cada film en función de su HR de equilibrio para cada formulación caracterizada. La evolución de la permeabilidad se ajustó a un comportamiento exponencial

($y=a \cdot e^{xb}$) en todos los casos; los valores de las constantes para cada formulación se muestran en la Tabla IV.7.

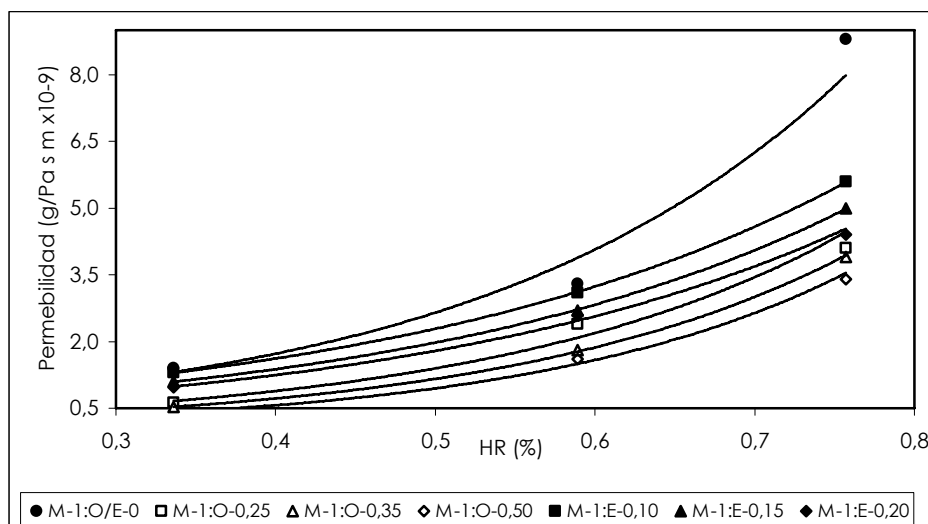


Figura IV.7. Efecto de la HR y contenido de lípido en la permeabilidad de los films. Datos experimentales (puntos), ajuste (líneas).

Tabla IV.7. Valores de los coeficientes y coeficiente de determinación (R^2) de las relaciones existentes entre permeabilidad con la HR de equilibrio para los films con y sin ácidos grasos.

Muestra	a	b	R^2
M-1:O/E-0	0,311	4,29	0,976
M-1:O-0,25	0,405	3,47	1,000
M-1:O-0,35	0,328	3,59	1,000
M-1:O-0,50	0,294	3,62	0,997
M-1:E-0,10	0,146	4,52	0,984
M-1:E-0,15	0,108	4,75	1,000
M-1:E-0,20	0,074	5,12	0,997

Los valores de la constante **b** (pendiente), son un indicativo de la sensibilidad al cambio de la permeabilidad

al variar la HR. Se observa que los films de mucílago puro y los que contienen ácido esteárico son más sensible al aumento de la HR mientras que los films elaborados con ácido oleico presentan valores menores de la pendiente, por lo que se podría decir que la permeabilidad de éstos está menos afectada por la humedad del film. Esto podría explicarse por las diferentes interacciones de las moléculas del ácido graso con los polímeros de la matriz.

La Figura IV.8 muestra el comportamiento potencial que presenta la permeabilidad de los films en función de la concentración de lípido presente en la formulación de los mismos, independientemente del tipo de ácido graso. Los puntos pueden ajustarse a una misma curva en función de la concentración. Esto indica que, a pesar del diferente estado físico y de las diferencias encontradas en cuanto al comportamiento mecánico, el efecto en la permeabilidad es muy similar para ambos ácidos grasos. En la Tabla IV.8 se presentan los valores de los coeficientes para estos ajustes.

Tabla IV.8. Valores de los coeficientes y coeficiente de determinación (R^2) de las relaciones potenciales determinadas entre la permeabilidad y la fracción de ácido graso en el film a tres HR de equilibrio.

Muestra	a	b	R^2
Oleico/Esteárico			
33,6%	0,237	-0,777	0,956
58,9%	1,223	-0,426	0,942
75,7%	2,756	-0,306	0,986

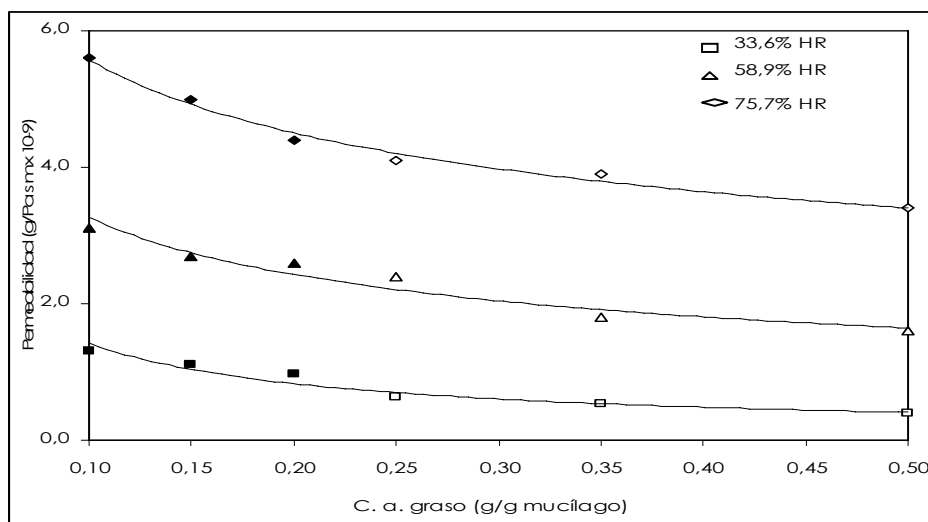


Figura IV.8. Efecto del contenido de lípido en el film en la permeabilidad a las diferentes HR. Oleico (puntos huecos) y esteárico (puntos llenos).

En conclusión, la permeabilidad de los films de mucílago estuvo muy afectada por su humedad de equilibrio y por el contenido en lípidos (ácido oleico/esteárico). La sensibilidad a la humedad fue mayor para el mucílago puro y las mezclas con esteárico. Aunque la influencia del contenido en lípido en los valores de la permeabilidad, a las diferentes humedades relativas, fue muy similar para los dos ácidos grasos ensayados, la incorporación de ácido oleico es más eficaz ya que puede añadirse en mayor proporción, aumentando así el efecto barrera al vapor de agua.

4.2.3. Solubilidad en agua de los films

La solubilidad se define como la cantidad máxima de soluto que puede disolverse en una cantidad determinada de solvente a una temperatura dada. La solubilidad de un film se define como la tolerancia que presenta éste al agua u otro solvente. Esta propiedad está determinada por su estructura química, así como por la permeabilidad de ésta (Lee *et al.*, 2004). Durante la solubilización, el volumen específico de los biopolímeros aumenta debido a la absorción de agua de hidratación por lo que hay una modificación de su estructura.

Para evaluar la solubilidad de los films de mucílago en agua, previamente se realizó un ensayo para determinar el tiempo de permanencia del film con el agua antes de realizar la medición de la concentración en sólidos solubles (°Bx) en la fase acuosa. La Figura IV.9 muestra la evolución del contenido de sólidos solubles con el tiempo. Como se puede observar, a partir de los 15 min el valor de °Bx obtenidos se mantuvo constante por lo que se estableció que en 15 min el tiempo del ensayo para la valoración de la solubilidad en agua de los films en las condiciones de trabajo (relación film:agua y temperatura).

La Figura IV.10 muestra la comparación de los valores medios del contenido de sólidos solubles del agua para las diferentes formulaciones de film a tres humedades de

equilibrio (HR: 33,3%, 52,3% y 75,5%) a temperatura de 20°C. Como se puede observar, tanto el tipo de lípido presente en el film como la HR de equilibrio a la que el film fue preacondicionado modifican la solubilidad del film. En cuanto a la proporción de lípido en el film ejerce un efecto menos apreciable sobre la solubilidad de éstos.

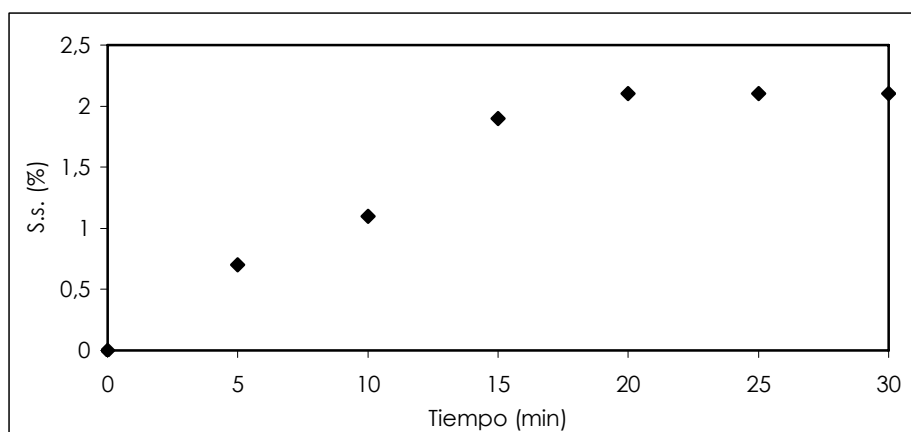


Figura IV.9. Evolución de los sólidos solubles del film a base de mucílago en función del tiempo, equilibrado a HR 58,9%.

El ácido esteárico aumentó la solubilidad del film y el oleico la redujo. Esto se puede deber a las interacciones del lípido con la matriz del mucílago, lo que afecta a su estructura y continuidad, haciéndola más o menos penetrable por el agua. Los films elaborados con ácido esteárico presentaron una mayor fragilidad que con la agitación suave durante el periodo del ensayo, provoca su fragmentación, aumentando por tanto la superficie de contacto entre el film y el agua. El ácido oleico tiene un

efecto contrario en la estructura y los trozos de films elaborados con este lípido mantuvieron su integridad durante el proceso, al igual que los films sin lípidos en su formulación.

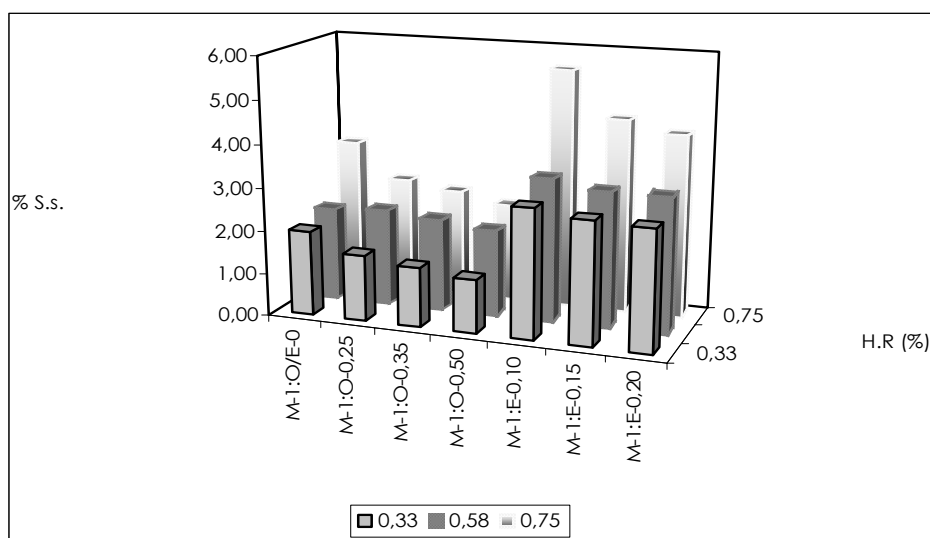


Figura IV.10. Efecto del contenido de lípido en la formulación del film en la solubilidad en función de la HR de equilibrio.

La mayor solubilidad de los diferentes films se obtuvo para las muestras equilibradas a HR de 75,5%. Esto es lógico ya que a valores de a_w altos, el mucílago del film ya ha absorbido agua y ganado movilidad molecular, lo que potencia su solubilización. Nuevamente los films elaborados con ácido esteárico se ven más afectados por la humedad de equilibrio y los elaborados con ácido oleico son los menos afectados por este factor.

La Figura IV.11 muestra el efecto del contenido de mucílago en el film sobre su solubilidad en agua para los films elaborados sin lípido (alto), con ácido oleico (bajo) y ácido esteárico (medio). Se observa nuevamente que la solubilidad de los films se ve más afectada por el tipo de lípido adicionado que por el contenido de mucílago. Se puede decir que el ácido esteárico por su efecto estructural que convierte a los films en más frágiles y disgregables potencia su solubilidad, tanto más cuanto mayor es la humedad de equilibrio de los mismos.

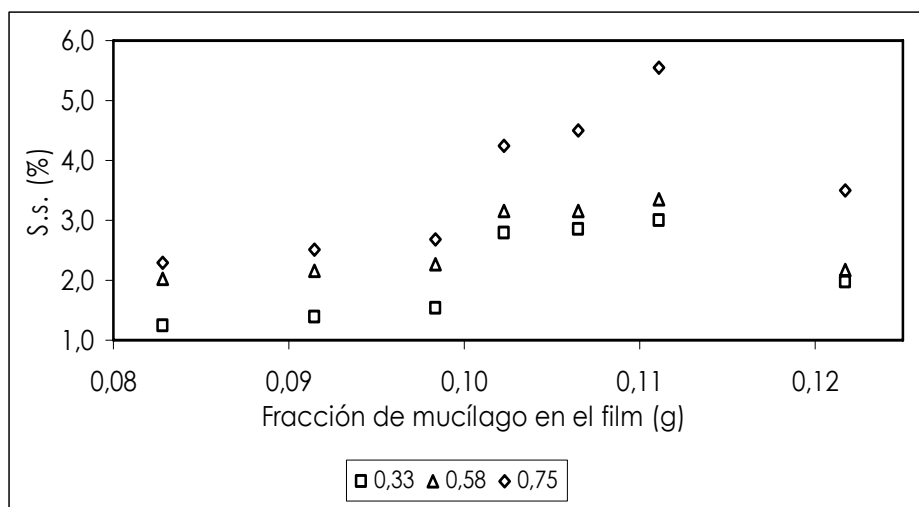


Figura IV.11. Efecto del contenido de mucílago en la solubilidad del film a diferentes HR de equilibrio.

4.2.4. Propiedades ópticas de los films

En la Tabla IV.9 se presentan las coordenadas de color en el espacio uniforme de color CIE $L^*a^*b^*$, las

coordenadas psicométricas y la diferencia de color obtenidas para los diferentes films acondicionados a dos HR (52 y 75%), a 20°C. En general, se puede decir que existe diferencia significativa a un nivel de confianza del 95% en las coordenadas de color entre films de la misma formulación a las dos humedades de equilibrio caracterizadas. Las coordenadas de color que no fueron significativamente diferentes por efecto de la humedad a ese nivel de confianza fueron: a^* en el film M-1:E-0,15 y b^* en las muestra M-1:O-0,25 y M-1:E-0,10.

En cuanto al análisis de la diferencia global de color para cada par de muestras con diferente humedad se observa que los films elaborados con solo mucílago, los dos de mayor concentración de oleico y el de mayor concentración de esteárico presentaron mayores diferencias de color debidas a la diferente humedad; el resto de los films presento un ΔE muy bajo. En la Figura IV.12 se representa la diferencia total de color entre el film de mucílago puro (M-1:O/E-0) y los films con ácidos grasos a las dos humedades de equilibrio. Los films con una mayor concentración de ácido oleico, a una HR del 52%, presentaron la mayor diferencia de color y los films con ácido esteárico en la proporción 0,2, a la humedad del 52%, los que presentaron la menor diferencia de color total.

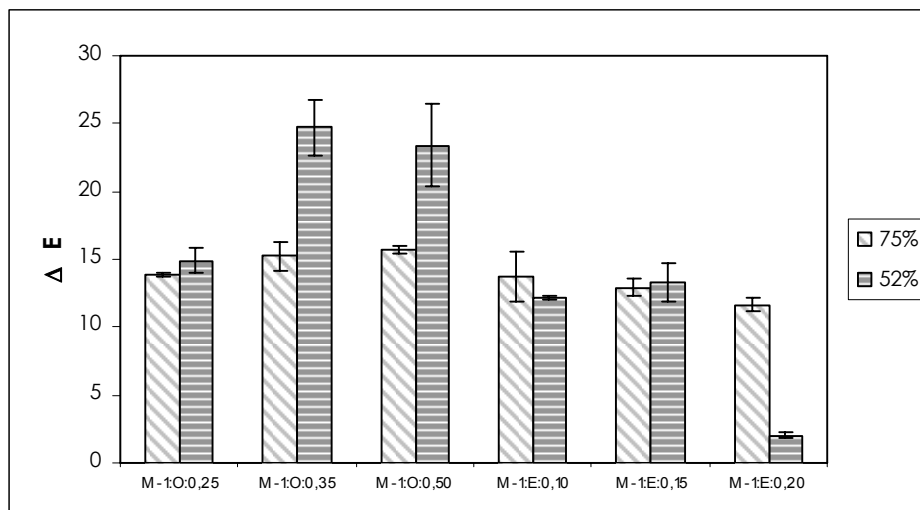


Figura IV.12. Diferencia de color total entre los films sin y con ácidos grasos a dos humedades relativas de equilibrio.

Como se puede observar en la Figura IV.13 todos los films (a las dos humedades de equilibrio) se encuentran en el cuadrante de los tonos rojo-amarillo. En general, los films con ácido oleico presentaron valores más altos en las coordenadas a^* y b^* seguramente debido al color impartido por el ácido oleico que es ligeramente amarillo y, a medida que se oxida, se vuelve más rojizo. En cambio, el ácido esteárico (escamas blancas) imparte a los films valores de a^* menores. Los films equilibrados a una HR de 75% presentan una menor variación en los valores de las coordenadas a^* y b^* mientras que para los equilibrados a 52% de HR, estos valores presentan mayor dispersión. El film sin lípidos presentó una menor sensibilidad al cambio de color debido a la humedad y el film con una mayor proporción

Tabla IV.9. Valores medios y desviación estándar de las coordenadas y atributos de color y diferencia de color total en los films a dos HR de equilibrio.

Muestra	HR%	L*	a*	b*	Cab*	hab*	ΔE
M-1:O/E-0	52	62,9±0,6 a	2,5±0,0 a	16,8±0,4 a	17,0±0,4 a	71,5±0,2 c	17,1±0,6 a
	75	80,0±0,1D	3,0±0,0 C	15,8±0,0 D	16,1±0,0 D	79,3±0,1B	
M-1:O-0,25	52	67,4±0,3 c	11,1±0,1 b	28,1±1,6 b	30,2±1,5 b	68,3±1,3 a	6,1±0,6 b
	75	72,0±0,4 AB	8,2±0,2 A	25,9±0,1 A	27,2±0,0 ABC	72,3±0,4 A	
M-1:O-0,35	52	64,8±0,6 b	16,4±1,6 c	37,2±1,8 c	40,7±2,2 c	66,3±1,2 ab	14,5±0,7 cd
	75	72,9±0,1 C	8,4±0,5 A	28,1±1,1 B	29,4±0,9 AB	73,3±1,6 A	
M-1:O-0,50	52	62,0±1,3 a	16,8±3,0 c	35,3±1,9 c	39,2±2,9 c	64,8±3,1 b	15,6±1,6 ad
	75	72,7±0,3 B C	7,8±0,0 A	28,8±0,4 B	29,9±0,4 B	74,8±0,1 A	
M-1:E-0,10	52	69,4±0,5 d	10,1±0,5 b	23,7±0,2 d	25,9±0,4 d	67,2±0,7 a	3,4±0,5 b
	75	71,5±0,0 A	8,4±0,8 A	25,1±2,3 A	26,5±2,4 AC	71,6±0,1 A	
M-1:E-0,15	52	68,3±0,9 cd	6,6±0,5 d	28,3±1,7 b	29,0±1,8 b	76,9±0,4 d	5,6±1,0 e
	75	70,4±0,7 E	7,5±2,0 B	23,3±0,7 C	22,2±4,3 E	73,2±6,3 A	
M-1:E-0,20	52	64,9±0,4 e	2,7±0,1 a	16,5±0,2 a	16,7±0,2 a	80,7±0,2 e	13,2±0,8 c
	75	74,1±0,7 B	6,9±0,8 B	25,0±0,7 AC	26,0±0,9 C	74,6±1,3 A	

Grupos homogéneos: letras iguales en la misma columna. Minúsculas HR = 52% y mayúsculas HR = 75%. A un nivel de confianza del 95%.

de ácido esteárico, equilibrado a 52% HR, presentó valores similares de a^* y b^* a los de los films de solo mucílago. Los films formulados con ácido oleico presentaron una mayor sensibilidad al cambio de color asociado al nivel de humedad. En la Figura IV.13 se representaron las líneas isotono para alguno de los films, mostrando el intervalo del tono en el que se encuentran ubicadas las diferentes muestras: de 65 a 71°.

En la Figura IV.14 se representa el comportamiento del croma contra la luminosidad de los diferentes films equilibrados a 52 y 75% HR. Todos los films presentaron una mayor luminosidad para humedades de equilibrio con 75%. Parece que cuando los films absorben agua en la matriz, adquieren una apariencia más blanquecina que se refleja en los valores mayores de luminosidad. Los films formulados con ácido oleico equilibrados a 52% de HR fueron los que presentaron mayor saturación de color, como ya se ha comentado en el párrafo anterior. La luminosidad del film de sólo mucílago se ve más afectada por la humedad de equilibrio, sin embargo el valor de croma se mantiene en el mismo nivel a ambas humedades.

Para evaluar la translucidez o grado de transparencia de los films se selecciono una longitud de onda (600 nm) a la cual la absorción por parte de las sustancias coloreadas

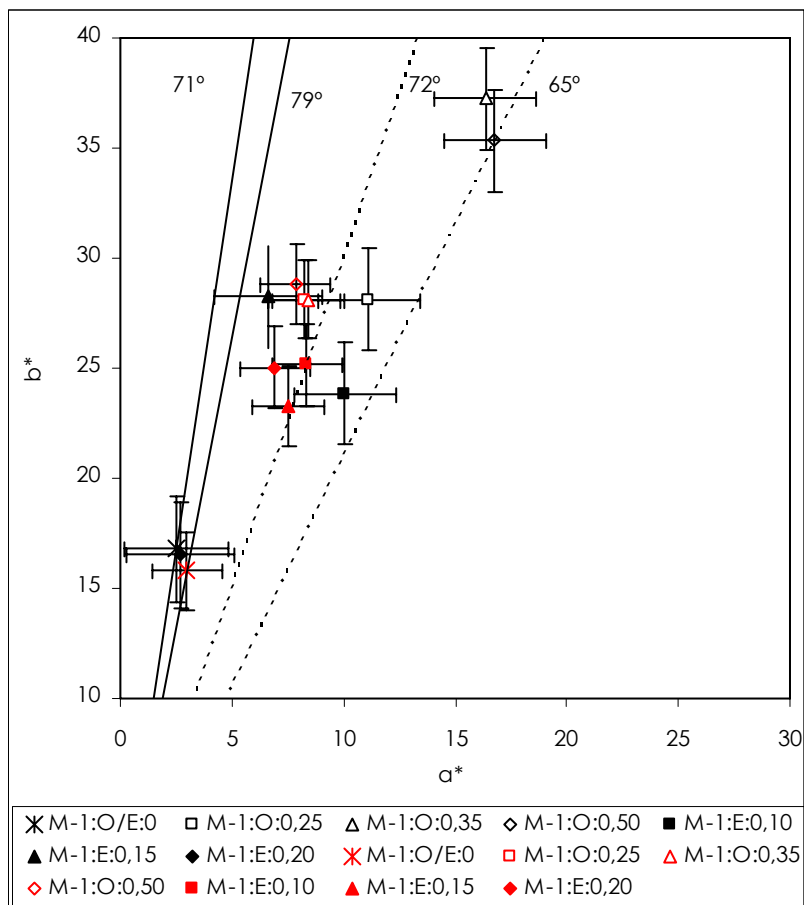


Figura IV.13. Plano a^* - b^* para los diferentes films. Símbolos negros, muestras equilibradas a 52% HR y símbolos rojos, a 75% HR.

presentes fue mínima, para tomar los valores respectivos de transmitancia interna (T_i), como índice de transparencia de las muestras. La Figura. IV.15 muestra los valores de T_i a dicha longitud de onda a las dos HR de equilibrio. Los films con ácido esteárico en menor concentración son los que se ven menos afectados por la humedad en esta característica óptica, mientras que los más afectados son

los de las mayores concentraciones de ambos ácidos grasos y el film sin lípido.

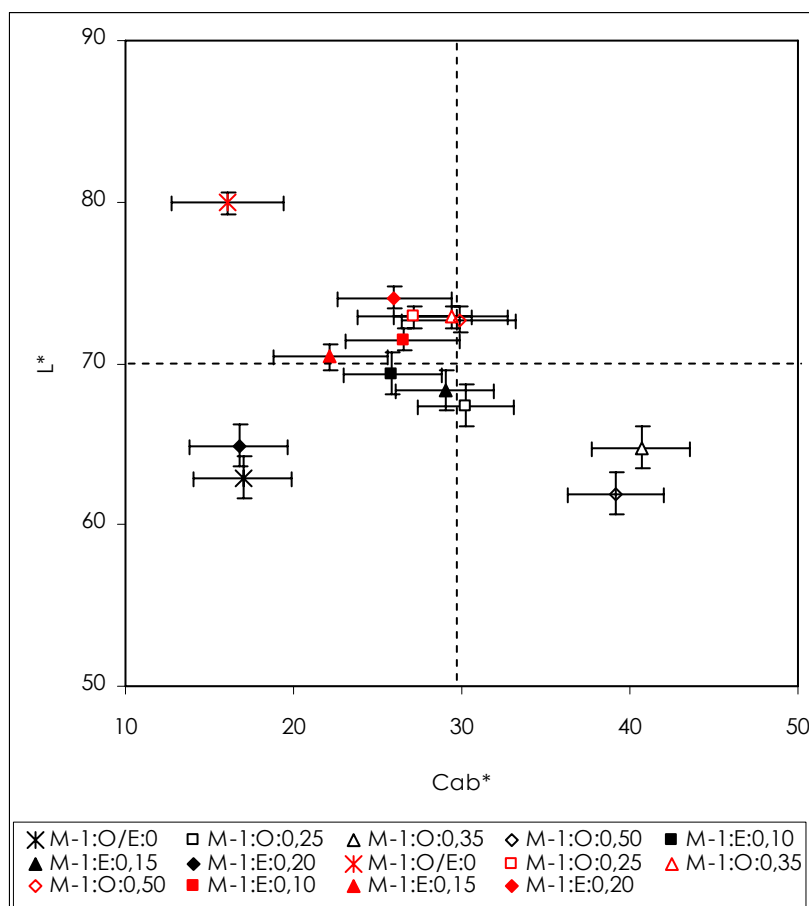


Figura IV.14. Gráfico cromático para los diferentes films. Símbolos negros a 52% HR y símbolos rojos a 75% HR.

Los films formulados con ácido esteárico y con ácido oleico a la mayor proporción y con la menor y mayor humedad, respectivamente, fueron los menos

transparentes. Para el mucílago puro, el incremento de humedad implicó un aumento notable en su opacidad.

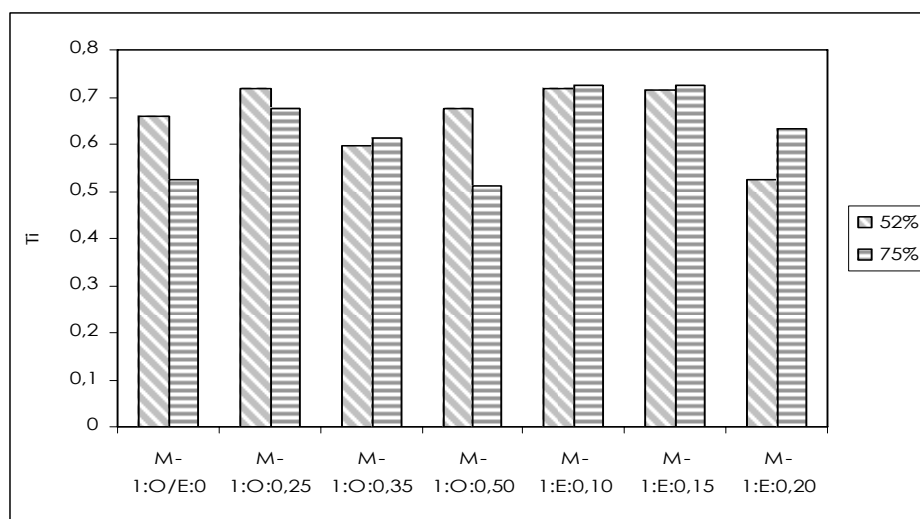


Figura IV.15. Efecto de la HR de equilibrio en la transparencia de los diferentes films (transmitancia interna a 600 nm).

Los valores promedio y desviación estándar del índice de blancura (IB), obtenidos para los diferentes films, se presentan en la Figura IV.16 a dos HR de equilibrio. El IB de los films con ácido esteárico en su formulación es el menos afectado por la humedad y el que no contiene ningún lípido fue el que presento mayor sensibilidad a la misma. El film de mucílago puro (M-1:O/E-0), a 75% HR, presentó el valor más alto de este parámetro y los formulados con mayor proporción ácido oleico, a esta misma humedad, los que presentaron los menores valores de IB.

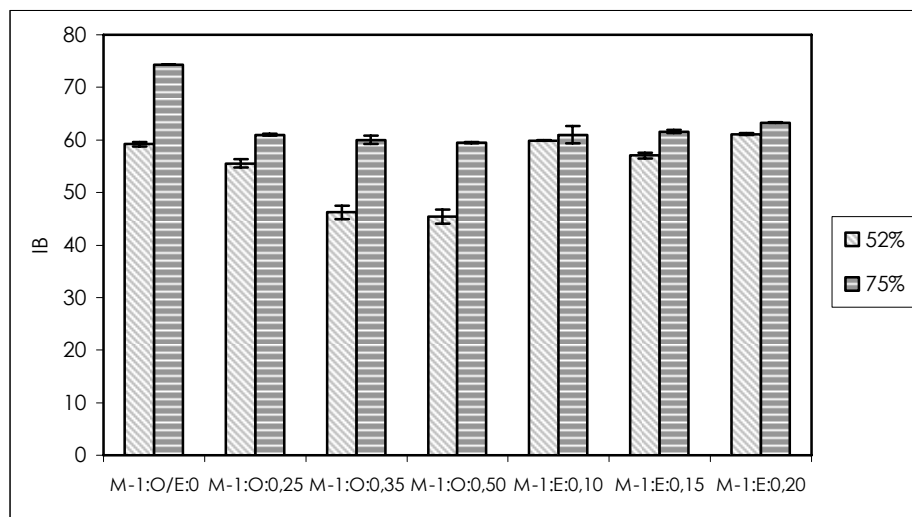


Figura IV.16. Índice de blancura de los diferentes films en función de la humedad relativa de equilibrio.

La medición de color de los films a baja a_w (0,33) no se pudo realizar directamente sobre los films por la alta fragilidad que éstos presentaron. Por esta razón, la medición a esa HR se hizo en la muestra molida. Estos resultados se muestran en la Tabla IV.10.

Todas las muestras presentaron diferencias estadísticamente significativas en los valores de las coordenadas de color a un nivel de confianza de 95%. Solamente el tono del polvo del film de mucílago no fue estadísticamente diferente al film con ácido oleico. En cuanto a la diferencia de color total entre los diferentes films con el mucílago en polvo, solamente entre el film con esteárico y el de mucílago puro no hubo diferencia estadísticamente significativa.

Tabla IV.10. Valores medios y desviación estándar de las coordenadas y atributos de color en los films secos y molidos y el mucílago. Diferencia de color en base al mucílago e índice de blancura.

Mues- tra	L*	a*	b*	Cab*	hab*	ΔE	IB
Mucí- lago	81,4± 0,9 a	1,6± 0,2 a	10,9± 0,0 a	11,0± 0,1 a	81,8± 1,2 b	-	78,4± 0,7 a
M- 1:O/E-0	80,0± 0,1 b	3,0± 0,0 b	15,8± 0,0 b	16,1± 0,0 b	79,3± 0,1 a	5,3± 0,1 a	74,3± 0,0 b
M-1:O- 0,35	75,1± 0,3 c	4,3± 0,2 c	21,5± 0,2 c	21,9± 0,2 c	78,6± 0,3 a	12,6± 0,4 b	66,2± 0,0 c
M-1:E- 0,20	76,8± 0,5 d	3,5± 0,1 d	14,3± 0,4 d	14,7± 0,4 d	76,3± 0,2 c	6,2± 0,6 a	72,5± 0,2 d

Grupos homogéneos: letras iguales en la misma columna con un nivel de confianza de 95%.

El brillo se define como la intensidad de luz reflejada especularmente de una superficie, comparada con una intensidad de luz que es reflejada de una superficie estándar, a un cierto ángulo de incidencia (ASTM, 1995). Una superficie con un valor de 70 o mayor a 60° es considerada como una superficie de alto brillo. El valor obtenido con un ángulo de 20° puede ayudar a diferenciar entre dos muestras de alto brillo, mientras que el valor a un ángulo de 85° ayuda a diferenciar entre muestras de bajo brillo, con valores menores de 10 a un ángulo de 60° (BYK, 1997, citado por Trezza y Krochta, 2000).

En la Tabla IV.11 se muestran los valores promedio del brillo de los diferentes films a tres ángulos de medición (85, 60 y 20°). La presencia de ácido oleico en los films los hace

más brillantes mientras que el esteárico reduce el brillo, incrementándose sus efectos respectivos con el aumento del contenido del ácido en el film. Ya que los valores de brillo obtenidos a un ángulo de 60° para todos los films son menores a 10 se consideran films de bajo brillo, siendo el film con la mayor proporción de oleico el único que supera ligeramente este umbral.

Tabla. IV.11. Valores medios y desviación estándar de brillo a tres ángulos diferentes de los films a HR de 52%.

Muestra / Angulo	85°	60°	20°
M-1:O/E-0	18,0 ± 4,1 ab	3,9 ± 1,7 a	0,7 ± 0,2 a
M-1:O-0,25	22,2 ± 3,1 ac	6,7 ± 1,3 bc	0,7 ± 0,2 a
M-1:O-0,35	27,4 ± 1,3 c	8,3 ± 1,7 b	0,8 ± 0,0 ab
M-1:O-0,50	38,7 ± 5,0 e	10,9 ± 1,9 d	1,0 ± 0,2 b
M-1:E-0,10	16,3 ± 1,4 bd	5,4 ± 0,5 ac	0,7 ± 0,1 a
M-1:E-0,15	11,4 ± 2,7 d	4,4 ± 1,0 ac	0,6 ± 0,1 a
M-1:E-0,20	4,5 ± 0,5 f	4,0 ± 1,0 a	0,6 ± 0,1 a

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

El efecto de los lípidos puede explicarse por la presencia de una fase dispersa de lípidos en diferente estado físico. En ambos casos la fase dispersa experimenta fenómenos de desestabilización durante el proceso de secado del film. La evaporación del agua va asociada a fenómenos de floculación de los glóbulos de lípidos que, dependiendo de la estabilidad de la membrana pueden llevar a la coalescencia. Las partículas de mayor tamaño

bajo la acción gravitacional emigran a la parte superior del film (superficie de secado) en un proceso de cremado que supone el establecimiento de un gradiente de concentración de lípido en el film con gran acumulación en la superficie (Villalobos *et al.*, 2005). La presencia de partículas superficiales incrementa la rugosidad superficial cuando estas están en estado sólido o la disminuyen cuando están en estado líquido y se extienden en la superficie llenando los microporos superficiales de la matriz (Fabra *et al.*, 2008; Vargas *et al.*, 2008). La rugosidad superficial está directamente correlacionada con el brillo de la superficie (Villalobos *et al.*, 2005). En el caso del film con mucílago puro, el bajo brillo puede estar asociado a la complejidad composicional del mismo que dificulta la orientación ordenada de las cadenas poliméricas, dando lugar a superficies menos rugosas a nivel microestructural.

La Figura IV.17 muestra los valores obtenidos a un ángulo de 85° (mayor diferenciación entre muestras) para todos los films, poniendo de manifiesto el efecto opuesto de ambos lípidos en el brillo, destacando el film elaborado con 0,5 partes de ácido oleico como el más brillante y el menos el elaborado con 0,2 partes de ácido esteárico.

En conclusión las propiedades ópticas de los films del mucílago del nopal estuvieron muy afectadas por la humedad y por el contenido en lípidos. Los films de

mucílago puro presentaron la menor saturación de color, con una tonalidad menos amarilla (mayor índice de blancura), aumentando la luminosidad del film con el nivel de hidratación. La incorporación de oleico modifico especialmente el color, aumentando la saturación y desplazando el tono hacia el amarillo, efectos que son mucho menos marcados con el ácido esteárico. No obstante, el brillo de los films aumenta considerablemente con la incorporación de ácido oleico mientras que se reduce en gran medida por efecto del ácido esteárico.

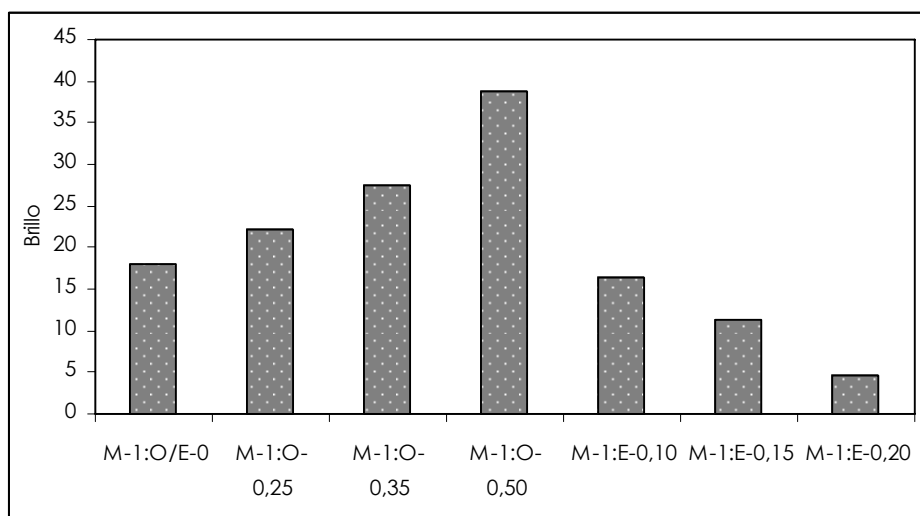


Figura IV.17. Efecto del tipo y concentración de lípido en el brillo de los films a un ángulo de 85°.

4.2.5. Aplicación de recubrimientos en cubos de jícama

En la Tabla IV.12 se presentan los valores obtenidos de la densidad se sólidos superficiales para cada DFR aplicada

a los cubos de jícama. Estos valores están expresados en base a los sólidos totales, así como en base a la fracción másica de los componentes de la formulación. Todos los valores de DSS obtenidos están muy por debajo de la densidad de sólidos de los films preparados de forma aislada con estas formulaciones, dando seguramente como resultado un espesor de recubrimiento insuficiente para obtener una adecuada barrera al vapor de agua. A medida que aumenta la proporción de oleico en la DFR, aumenta la DSS como consecuencia del incremento en la viscosidad provocado por la dispersión del lípido. Este

Tabla. IV.12. Valores promedio y desviación estándar de la densidad de sólidos superficiales de las diferentes DFR en los cubos de jícama.

Muestra	DSS (g/m ²)	DMS* (g/m ²)	DOS* (g/m ²)
C	0,00±0,00	0,00±0,00	0,00±0,00
O-0	4,09±0,01	4,09±0,01	0,00±0,01
O-25	6,38±0,01	5,10±0,01	1,28±0,01
O-35	7,84±0,00	5,81±0,00	2,03±0,00
O-50	9,64±0,01	6,43±0,01	3,21±0,01

*Valores en base a las fracciones másicas de mucílago y ácido oleico en la DFR.

aumento de la viscosidad aumenta la cantidad de DFR retenida frente al drenaje gravitacional durante las etapas de escurrido y secado del film (Villalobos *et al.*, 2008). Por otro lado, el carácter tensoactivo del ácido oleico puede contribuir a facilitar la extensibilidad de la FFR sobre la

superficie de la muestra, aumentando la homogeneidad del recubrimiento (Villalobos *et al.*, 2008, Vargas *et al.*, 2006).

La Figura IV.18 representa la evolución de la pérdida de peso de las diferentes muestras durante el tiempo de almacenamiento a 4°C. Como se observa todas las muestras recubiertas presentaron mayor pérdida de peso que el que tuvieron las muestras control. Este comportamiento podría deberse a que al ser el mucílago una sustancia higroscópica, absorbe agua de la jícama, la cual es liberada más fácilmente al medio ambiente. La pérdida de peso es mayor al aumentar la DSS en base la fracción másica de mucílago. Las muestras cubiertas con la formulación con 50% de ácido oleico (O-50) presentaron una menor pérdida de peso a pesar de que el contenido en masa total de mucílago adherido es mayor al de la muestra O-35. Esto podría indicar que a estos niveles de contenido de ácido oleico empieza a reducirse la pérdida de agua. La posible razón por la que la muestra control presenta una menor pérdida de peso es la formación de una costra de células superficiales secas que impide la salida de agua. La presencia del film inhibe la formación de costra al mantenerse más húmedo el propio recubrimiento.

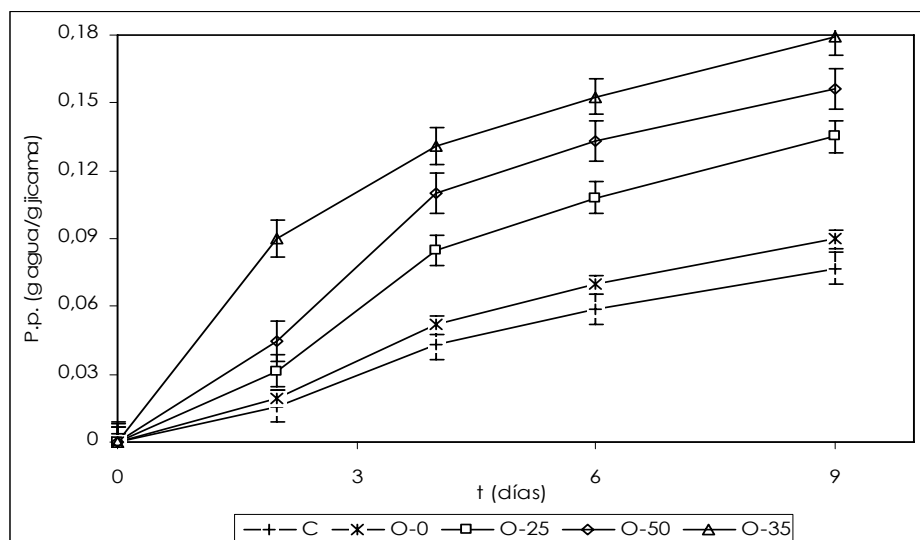


Figura IV.18. Evolución de la pérdida de peso durante el tiempo de almacenamiento a 4°C de los cubos de jícama cubiertos con las diferentes DFR.

IV.19. Los cubos de jícama O-50 presentaron una mayor resistencia a la penetración del punzón al final del periodo de almacenamiento y para la muestra control se obtuvieron los menores valores de fuerza de penetración. A medida que evoluciona el tiempo, la diferencia de textura entre las muestras aumenta. Obviamente, en el día cero las muestras cubiertas con las diferentes DFR no presentaron diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95%; todas las muestras pertenecen al mismo grupo homogéneo. En el día cuatro las muestras C y O-0 son iguales y O-0 y O-25, también; las formulaciones O-35 y O-50 no pertenecen a ningún grupo homogéneo. En el último día todas las muestras presentaron diferencias estadísticamente

significativas a ese nivel de confianza. Se puede decir que a mayor proporción de ácido oleico en el film (lo que supone también un valor mayor de la DSS), se reduce la pérdida de firmeza durante el almacenamiento de las muestras.

Del Valle *et al.* (2005) reportan que al aplicar un recubrimiento de mucílago en fresa, la firmeza del fruto se ve incrementada con la aplicación de recubrimiento de 92 a 153 N, aunque el porcentaje de pérdida de firmeza fue mayor en los cubiertos que en el control, 33 y 20,7%, respectivamente. En este trabajo no hubo incremento en la firmeza de los cubos de jícama por efecto del recubrimiento, lo que puede estar relacionado con la alta humedad superficial de los productos y el alto grado de plastificación del film; a alto nivel de humedad los films presentan muy bajos valores de la tensión de fractura. En el caso de los trozos de jícama, la humedad superficial es muy alta ya que no cuenta con ninguna membrana de separación por lo que el recubrimiento alcanza un muy bajo nivel de secado y no se logra un aumento de firmeza.

Las coordenadas y atributos de color presentados por las diferentes muestras a lo largo del periodo de almacenamiento se muestran en la Tabla. IV.13. Como se puede observar las muestras que no contienen ácido oleico en su cubierta (C y O-0) son las que presentan una menor diferencia de color entre el día 0 y el día 9.

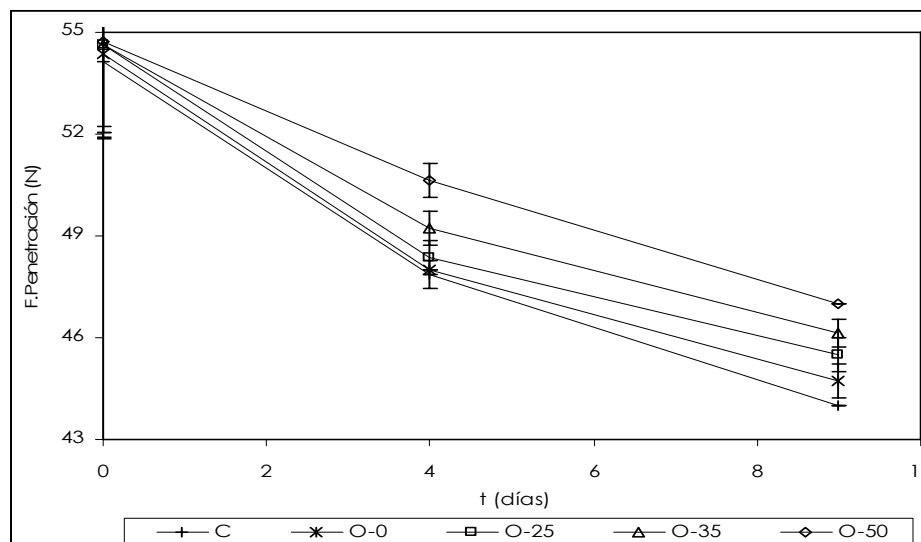


Figura IV.19. Evolución de la pérdida de firmeza durante el tiempo de almacenamiento a 4°C de los cubos de jícama cubiertos con las diferentes DFR.

Los valores de luminosidad de las muestras en el día 0 se agrupan en dos, las muestras C y O-0, y las muestras que contienen oleico; es decir, el ácido oleico modifica más esta coordenada de color que el mucílago solo. Para las coordenadas a^* y b^* y los atributos de color C^*_{ab} y h^*_{ab} no se observaron diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95%. Al final del periodo de almacenamiento, en general, todas las coordenadas de color presentaron diferencias estadísticamente significativas a este nivel de confianza.

Tabla IV.13. Valor medios y desviación estándar de las coordenadas, atributos y diferencia total de color en los cubos de jícama cubiertos con las diferentes DFR durante el almacenamiento a 4°C.

M	t (d)	L*	a*	b*	C*ab	h*ab	ΔE
C	0	70,6±2,1 a	-2,0±0,2 a	6,2±1,4 a	6,5±1,3 a	107,7±0,1 a	6,9± 2,3 a
	4	65,3±0,1	-1,7±0,0	8,2±0,0	8,4±0,0	101,9±0,0	
	9	65,0±0,1 A	-1,5±0,0 A	10,1±0,1 A	10,3±0,1 A	98,2±0,0 A	
O-0	0	68,8±2,6 ab	-2,0±0,2 a	6,3±1,4 a	6,6±1,2 a	107,6±0,1 a	7,0± 2,5 a
	4	64,3±0,2	-1,7±0,0	8,4±0,1	8,6±0,1	101,3±0,0	
	9	63,7±0,2 B	-1,3±0,1 B	10,9±0,3 A	11,0±0,3 A	96,9±0,0 B	
O-25	0	68,6±2,3 a b	-2,0±0,2 a	6,4±1,4 a	6,7±1,2 a	107,5±0,1 a	10,1± 2,3 b
	4	63,2±0,2	-1,6±0,0	8,7±0,1	8,8±0,1	100,6±0,0	
	9	60,1±0,2 C	-1,1±0,0 C	11,7±0,3 B	11,8±0,3 B	95,4±0,0 C	
O-35	0	67,9±2,1 b	-2,0±0,2 a	6,5±1,2 a	6,9±1,1 a	107,3±0,1 a	10,8± 2,0 b
	4	62,0±0,4	-1,6±0,0	9,2±0,1	9,3±0,1	100,0±0,0	
	9	59,1±0,4 D	-1,0±0,1 D	12,7±0,3 C	12,7±0,3 C	94,4±0,0 D	
O-50	0	67,4±1,6 b	-2,1±0,2 a	6,6±1,1 a	7,0±1,0 a	107,2±0,1 a	13,7± 0,9 c
	4	61,0±0,4	-1,6±0,1	9,6±0,2	9,7±0,2	99,2±0,0	
	9	56,9±1,3 E	-0,7±0,0 E	15,4±1,7 D	15,4±1,7 D	92,7±0,0 E	

Grupos homogéneos del mismo tratamiento en función del tiempo: letras minúsculas

Grupos homogéneos entre tratamientos en el día 0: letras mayúsculas

Grupos homogéneos entre tratamientos en el día 8: símbolos

Letras o símbolos en la misma columna grupos homogéneos a un nivel de confianza del 95%

La Figura IV.20 muestra la diferencia de color total entre la muestra C y las diferentes formulaciones aplicadas en el día 0 y en el 9 de almacenamiento. Se puede observar que los cubos recién recubiertos con las diferente DFR presentaron un valor ΔE relativamente bajó, las muestras O-

0, O-25 y O-35 forman un grupo homogéneo y las muestras O-35 y O-50 otro. No obstante, en el día 9 los valores ΔE aumentaron considerablemente, excepto para la muestra O-0, donde disminuyeron, siendo las diferencias entre todas las muestras significativas a un nivel de confianza del 95%. El valor de ΔE aumentó al aumentar la proporción de ácido oleico en la DFR, lo que hace suponer que el color final de las muestras está dado principalmente por el ácido graso presente en la superficie del cubo de jícama. El mayor cambio de color en las muestras con ácido oleico durante el almacenamiento puede estar asociado a la oxidación del lípido que da lugar a compuestos más anaranjados.

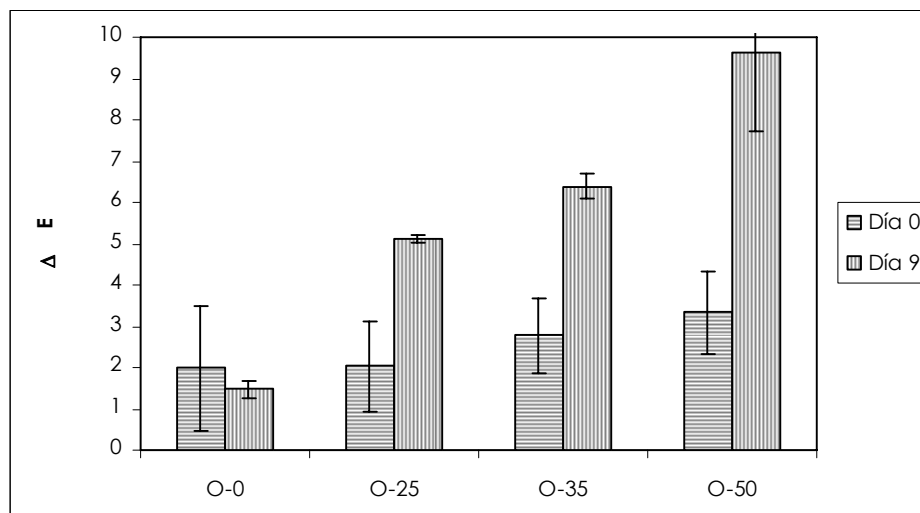


Figura IV.20. Diferencia de color al inicio y final del periodo de almacenamiento de los cubos de jícama cubiertos con las diferentes DFR con respecto a la muestra control.

La Figura IV.21 muestra la evolución de la luminosidad con respecto al croma durante el tiempo de almacenamiento de las diferentes muestras. Se puede observar, en general, que con el tiempo el color se satura ya que los valores de C^*_{ab} aumentan, siendo la muestra recubierta con la fórmula que contiene una proporción mayor de ácido oleico la que presenta un color más puro con el tiempo.

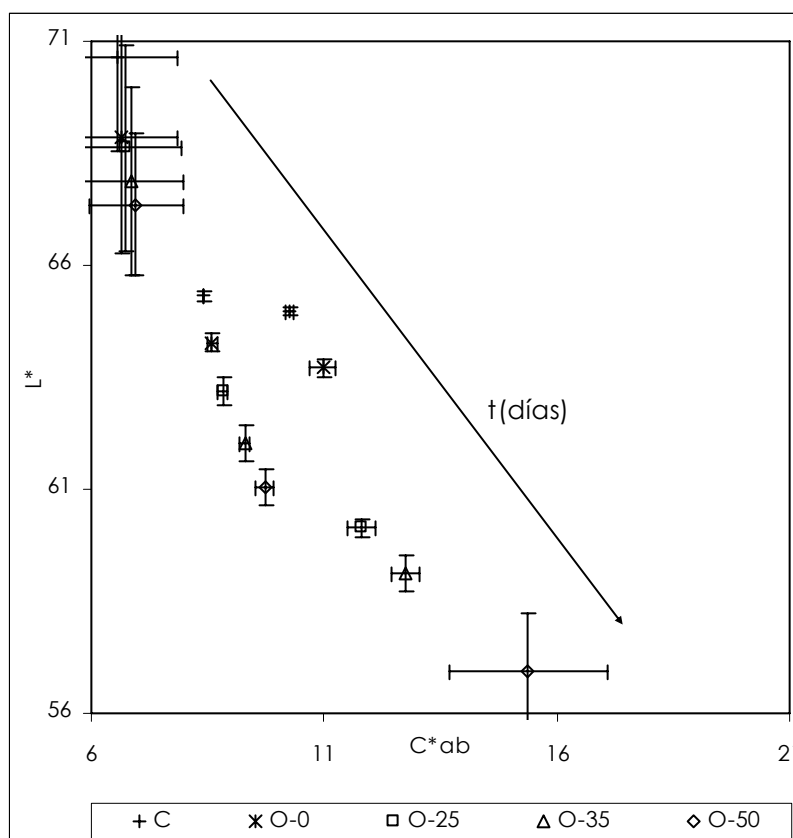


Figura IV.21. Gráfico cromático para los diferentes cubos de jícama recubiertos.

En la Figura IV.22 se observa la evolución que presentaron las coordenadas de color a^* y b^* . En todos los casos las muestras van adquiriendo tonos menos verdes, más amarillos, lo cual está relacionado con la presencia de ácido oleico y su posible cambio de coloración por oxidación.

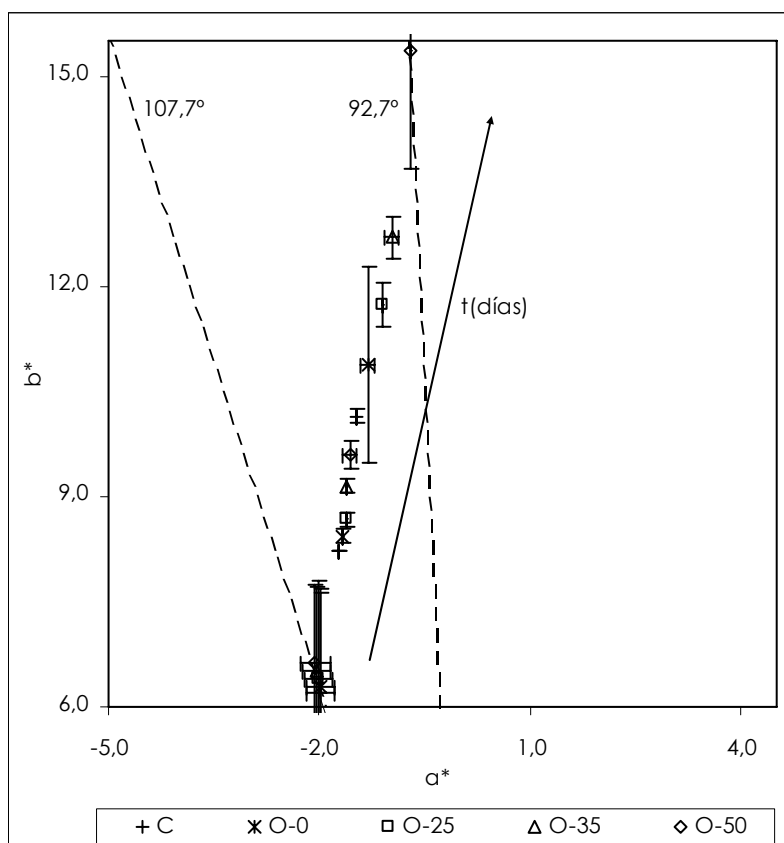


Figura IV.22. Plano a^* - b^* para los diferentes cubos de jícama en función del tiempo.

El trabajo de Del-Valle *et al.* (2005) reporta que el color de las fresas recubiertas con mucílago (obtenido por

exudación de la penca en agua) no modifica ninguna de las coordenadas de color durante el periodo de almacenamiento a 4°C por 9 días. Aquino-Bolaños *et al.* (2004) reportan en su trabajo en jícama precortada una disminución mínima en el tono (105° a 103°), atribuida al pardeamiento (por oxidación de polifenoles) en las muestras evaluado visualmente.

En las muestras recubiertas con mucílago, sin ácido oleico el tono de color de la jícama no sufrió cambios durante el almacenamiento. Los cambios ocurridos en las muestras recubiertas con ácido oleico experimentaron el amarillamiento ya comentado, atribuible a la degradación de este componente.

En conclusión, la aplicación de recubrimientos comestibles a base de mucílago de nopal en jícama cortada no resultó eficaz para reducir la pérdida de peso de las muestras durante el almacenamiento, debido probablemente a la alta plastificación del film en la superficie húmeda de la muestra. No obstante, si que se observa una mejora en la evolución de la pérdida de firmeza de las muestras, probablemente debido al establecimiento de perfiles de humedad más planos en el tejido, asociados al secado durante el almacenamiento, por la presencia del film, tanto más cuanto mayor es el contenido en lípido. No obstante, la incorporación de ácido oleico comporta cambios en el

color superficial de las muestras debido probablemente a su oxidación. En este sentido, parece conveniente la utilización de otro lípido menos susceptible a estos procesos.

V. CONCLUSIONES

- El método utilizado para la extracción del mucílago del nopal afecta las características químicas y físicas del producto obtenido. El proceso con cocción da lugar a un producto con mayor cantidad de polifenoles totales, mayor actividad antioxidante, menor pectina total y menor relación pectina hidrosoluble:pectina no extractable. Su viscosidad intrínseca es menor, lo que está en relación con un menor peso molecular de sus componentes. La decoloración con hipoclorito sódico no resultó efectiva en la mejora del color del mucílago y además aumentó el contenido en sodio. Por su parte, la operación de escaldado es la que permite obtener un producto con características químicas y físicas más adecuadas para ser utilizado en la elaboración de films y recubrimientos. Éste presenta un elevado contenido en calcio y bajo en sodio y un aspecto más incoloro. Además, es el que contiene mayor cantidad de pectina total y de pectina hidrosoluble lo que le confiere un mayor poder espesante (mayor viscosidad intrínseca).
- La isoterma de sorción de agua del mucílago obtenido con aplicación de una etapa de escaldado evidencia los efectos solventes del agua a partir de a_w intermedias, asociados a la presencia de cantidades notables de iones y solutos de bajo peso molecular, en contraposición al comportamiento observado en

polímeros purificados. La adición de ácido oleico al mucílago modifica las interacciones agua-sustrato en forma dependiente de la cantidad de agua presente. A bajos contenidos en agua, se da una fuerte interacción agua-lípido-mucílago, que inhibe la desorción del agua y la cristalización de la grasa. Cuando aumenta el contenido en agua, se potencian las interacciones hidrofóbicas, limitándose la capacidad de adsorción de agua en la matriz al mismo tiempo que se facilita la cristalización del ácido oleico.

- El mucílago del nopal presenta un estado vítreo, a temperatura ambiente, a humedades de equilibrio por debajo de 7,5 % (bh), mientras que por encima de estos valores exhibe un comportamiento gomoso que afecta a sus propiedades mecánicas y a todas las características dependientes de la difusión molecular, que determinan su estabilidad y a las propiedades de transporte. La mezcla con ácido oleico en proporción 1:0,35 presentó valores inferiores de la humedad crítica (4,6 %, bh) probablemente como consecuencia del efecto plastificante del lípido.
- El mucílago de nopal tiene buenas propiedades formadoras de films comestibles. Los films mostraron adecuadas propiedades mecánicas cuando presentan humedades de equilibrio con a_w del orden de 0,52. Por

debajo, son demasiado frágiles y quebradizos, coherentemente con el estado vítreo de la matriz. La incorporación de ácidos grasos, y en especial de oleico, mejora en gran medida las propiedades mecánicas de la matriz, permitiendo una buena flexibilidad incluso a los valores más bajos de humedad. No obstante, para humedades relativas de equilibrio del orden del 75%, la matriz es muy deformable y la presencia de lípidos reduce en gran medida su capacidad de deformación, aumentando su fragilidad.

- La permeabilidad de los films de mucílago estuvo muy afectada por su humedad de equilibrio y por el contenido en lípidos (ácido oleico/esteárico). La sensibilidad a la humedad fue mayor para el mucílago puro y las mezclas con esteárico. Aunque la influencia del contenido en lípido en la permeabilidad, a las diferentes humedades relativas, fue muy similar para los dos ácidos grasos ensayados, la incorporación de ácido oleico es más eficaz ya que puede añadirse en mayor proporción, aumentando así el efecto barrera al vapor de agua.
- Las propiedades ópticas de los films del mucílago del nopal estuvieron muy afectadas por la humedad y por el contenido en lípidos. Los films de mucílago puro presentaron la menor saturación de color, con una

tonalidad menos amarilla (mayor índice de blancura), aumentando la luminosidad del film con el nivel, de hidratación. La incorporación de oleico modifica especialmente el color, aumentando la saturación y desplazando el tono hacia el amarillo, efectos que son mucho menos marcados con el ácido esteárico. No obstante, el brillo de los films aumenta considerablemente con la incorporación de ácido oleico mientras que se reduce en gran medida por efecto del ácido esteárico.

- La aplicación de recubrimientos comestibles a base de mucílago de nopal en jícama cortada no resultó eficaz para reducir la pérdida de peso de las muestras durante el almacenamiento, debido probablemente a la alta plastificación del film en la superficie húmeda de la muestra. No obstante, si que se observa una mejora en la evolución de la pérdida de firmeza de las muestras, tanto más cuanto mayor es el contenido en lípido. No obstante, la incorporación de ácido oleico comporta cambios en el color superficial de las muestras debido probablemente a su oxidación. En este sentido, parece conveniente la utilización de otro lípido menos susceptible a estos procesos.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- AFNOR NF T51-100. 1971. Plastiques: vocabulaire relatif aux essais mécaniques et thermo-mécaniques et à leur interprétation. Association Française de Normalisation, Paris.
- AFNOR NF H00-030. 1974. Détermination du coefficient de transmission à la vapeur d'eau pour matières en feuilles. Association Française de Normalisation, Paris.
- Ahamd, A., Davies, J., Randall, S. y Skinner, G. R. B. 1996. Antiviral properties of *Opuntia streptacantha*. Antiviral Research, 30: 75-85.
- AOAC. 2000. Official methods of analysis. 17th Edition. Washinton, D.C. Association of analytical chemists international.
- Aquino-Bolaños, E.N., Cantwell, M.I., Peiser, G. Y Mercado-Silva, E. 2000. Changes in the quality of fresh-cut jicama in relation to storage temperatures and controlled atmospheres. Journal of Food Science, 65: 1238-1243.
- Aquino-Bolaños, E.N., Mercado-Silva, E. 2004. Effects of polyphenol oxidase and peroxidase activity, phenolics and lignin content on the browning of cut jicama. Postharvest Biology and Technology, 33: 275-283.
- ASTM D882. 1988. Standard test methods for tensile properties of thin plastic sheeting. In: ASTM book of standards.
- ASTM E96. 1980. Standard test method for specular gloss. Disignation (D-523). Vol. 06.01. Annual book of ASTM standards. Philadelphia, PA. American Society for testing materials.
- ASTM. 1995. Standard test methods for water vapor transmission of material. Standard Designations: E96-95. En. Annal Book of ATSM, Philadelphia, PA, 406-413.
- ASTM. 1999. Standard method for tensile properties of thin plastic sheeting. En: Annual Book of ASTM, Philadelphia, PA, 162-170.

- ASTM. 2001. Standard method for tensile properties of thin plastic sheeting. En: Annual Book of ASTM, Philadelphia, PA, 162-170.
- Avena-Bustillos, R. J. y Krochta, J. M. 1993, Water Vapor Permeability of Caseinate-Based Edible Films as Affected by pH, Calcium Crosslinking and Lipid Content. *Journal of Food Science*, 58: 904-907.
- B.S. 3177. 1959. Permeability to water vapor of flexible sheet materials. British Standards, London.
- Baldwin, E.A., Nisperos-Carriedo, M.O. y Baker, R.A. 1995. Edible coatings for lightly processed fruits and vegetables. *HortScience*: 30: 35-38.
- Barrientos, P.F. 1983. Nopal y agaves como recurso de zonas áridas y semiaridas de México en recursos agrícolas de zonas áridas y semiáridas de México. Centro de genética, Chapingo, Mexico,
- Biquet, B. y Labuza, T.P. 1988. Evaluation of the moisture permeability of chocolate films as edible moisture barrier. *Journal of Food Science*, 53: 989-991.
- Brandenburg, A. H., Weller, C. L. y Testin, 1993. Edible Films and Coating from Protein Soy. *Journal of Food Science*. 58: 1086-1089.
- Bravin, B., Peressini, D. y Sensidoni, A. 2004. Influence of emulsifier type and content on functional properties of polysaccharide lipid-based edible films. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52: 6448-6455.
- Bravo, H.H. 1978. Las cactáceas de México. Tomo 1. Ed. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Camacho, M.M., Martínez-Navarrete, N. y Chiralt, A. 2005. Rheological characterization of experimental dairy creams formulated with locust bean gum (LBG) and λ -carrageenan combinations. *International Dairy Journal*, 15: 243-248.
- Cantweel, M.I., Peiser, G. y Mercado-Silva, E. 2002. Induction of chilling injury in jicama (*Pachyrhizus erosus*) roots: changes in texture, color and phenolics. *Postharvest Biology and Technology*, 25: 311-320.

- Cárdenas, A., Higuera-Ciapara, I. y Goycoolea, F. 1997. Rheology and aggregation of cactus (*Opuntia ficus-indica*) mucilage in solution. J. Profess. Assoc. Cactus Develop. 2: 152-159.
- Cardenas, A., Argüelles, W.M. y Goycoolea, F.M. 1998. On the posible rol of *Opuntia ficus-indica* mucilage in lime mortar perfomance in the protection of histotical buildings. J. Profess. Assoc. Cactus Develop. 3: 64-71.
- Cardenas, A., Goycoolea, F.M. y Rinauto, M. 2008. On the gelling behaviour of nopal (*Opuntia ficus-indica*) low methoxyl pectin. Carbohydrate Polymers, 73: 212-222.
- Castellar, R., Obón, J.M, Alacid, M. y Fernández-López, J.A. 2003. Color properties and stability of betacyanins from *Opuntia* fruits. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 51: 2772-2776.
- Chen, H. 1995. Funtional properties and application of edible films made of milk proteins. Journal of Dairy Science, 78: 2563-2583.
- Coffin, D.R. y Fishman, M.L. 1993. Viscoelastic properties of pectin/starch blends. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 41: 1192-1197.
- Contreras-Medellín, R. y Labuza, T.P. 1981. Prediction of moisture protection requirements for foods. Cereal Food World, 26: 335-349.
- Corrales-García, J., Peña-Valdivina, C.B., Razo-Martínez, Y. y Sánchez-Hernández, M. 2004. Acidity changes and pH-buffering capacity of nopalitos (*Opuntia* spp.). Postharvest Biology and Technology, 32: 169-174.
- Cuq, B., Gontard, N., Cuq, J.L. y Guilbert, S. 1996. Funtional properties of myofibrillar protein-based biopackaging as affected by film thickness. Journal of Food Science, 61: 580-584.
- De la Rosa, J.P. y Santana, D. 2001. El nopal. Usos, manejo agronómico y costes de producción en México. CONAZA-UACH-CIESTAAM. Texcoco, pp: 23-35.
- Deasy, P.B. 1984. Microencapsulation and related drug processes. Marcel Dekker Inc. New York.

- Debeaufort, F., Tesson, N. y Voilley, A. 1994. Aroma compounds and water vapor permeability of edible and polymeric packagings. In: Food and Packaging Materials-Chemical Interactions. Ackemann, P., Jägerstad, M. And Ohlsson, T. Eds., The Royal Society of Chemistry, Cambridge. pp. 169.
- Debeaufort, F. y Voilley, A. 1995. Effect of surfactants and drying rate on barrier properties of emulsified edible films. *Journal of Food Science and Technology*. 30: 183-187.
- Debeaufort, F. y Voilley, A. 1997. Methylcellulose-based edible films and coatings: 2. Mechanical and thermal properties as a function of plasticizer content. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45: 685-689.
- Debeaufort, F., Quezada-Gallo, J.A. y Voilley, A. 1998. Edible films and coatings: Tomorrow's Packagings: a review. *Critical Reviews in Food Science*, 38: 299-313.
- Del-Valle, V., Hernández-Muñoz, P., Guarde, A. y Galotto, M.J. 2005. Development of a cactus-mucilage edible coating (*Opuntia Picus-indica*) and its application to extend strawberry (*Fragaria ananassa*) shelf-life, *Food Chemistry*, 91: 751-756.
- Donhowe, I.G. y Fennema, O. 1993. Edible films-barriers to moisture migration in frozen foods. *Food Australia*, 45: 521-525.
- El Ghaout, A., Arul, J., Ponnampalam, R. y Boulet, M. 1991. Chitosan coating effect on storability and quality of fresh strawberry. *Journal of Food Science*, 56: 1618-1622.
- El Kossori, R.L., Villaume, C., El Boustani, E., Sauvaire y Menean, L. 1998. Composition of pulp, skin and seeds of prickly pear fruit (*Opuntia ficus-indica* sp.). *Plant Foods for Human Nutrition*, 52: 263-270.
- Espinosa, S. 2002. Estudios de algunas características físicas de hidrocoloides provenientes de semilla de algarrobo (*Prosopis chilensis* (Mol.) Stuntz) y de cladodios de nopal (*Opuntia Picus-indica* (L.) Mill). Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias Agropecuarias.

Facultad de Ciencias Agronómicas y Forestales.
Universidad de Chile. Santiago.

- Fabra, M.J., Talens, P. y Chiralt, A. 2008. Tensile properties and water vapor permeability of sodium caseinate films containing oleic acid-Beeswax mixtures. *Journal of Food Engineering*, 85: 393-400.
- Fang, Q. y Hanna, M. 2000. Funcional properties of polylactic acid-starch-based loose fill packaging films. *Cereal Chemistry*, 77: 779-783.
- Fellows, P. 1990. *Food Processing Technology: principles and practices*. Ellis Horwood, New York.
- Fernández-López, J.A., Castellar, R., Obón, J.M. y Almeda, L. 2002. Screening and Mass-Spectral Confirmation of Betalains in Cactus Pear. *Chromatography*, 56: 591-595.
- Fishman, M.L., Coffin, D.R., Onwulata, C.I. y Willett, J.L. 2006. Two stage extrusion of plasticized pectin/poly(vinyl alcohol) blends. *Carbohydrate Polymers*, 65: 421-429.
- Fishman, S.M. y Salvador, A. 2003. Recent developments in coating batters. *Trends in Food Science and Technology*. 14: 399-407.
- Forni, E., Penci, M. y Polerello, 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.
- Frati, A.C., Jiménez, E. y Ariza, C.R. 1990. Hypoglycemic effect of *Opuntia ficus-indica* in non insulin-dependent diabetes mellitus patients. *Phytotherapy Research, PTR*, 4: 195-197.
- Frati-Munari, A., Vera Lastras, O. y Ariza-Andraca, C.R. 1992. Evaluación de cápsulas de nopal en Diabetes Mellitas. *Gaceta Médica de México*, 128: 431-436.
- Galati, E.M., Monforte, M.T., Tripodo, M.M., d'Aquino, A. y Mondello, M.R. 2001. Antiulcer activity of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae): ultrastructural study. *Journal of Ethnopharmacology*, 76: 1-9.
- Galati, E.M., Pergolizzi, S., Miceli, N., Monforte, M.T. y Tripodo, M.M. 2002a. Study on the increment of the

- production of gastric mucus in rats treated with *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. Cladodes. *Journal of Ethnopharmacology*, 83: 229-233.
- Galati, E.M., Tripodo, M.M., Trovato, A., Miceli, N. y Monforte, M.T. 2002b. Biological effect of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae) waste matter. Note I: diuretic activity. *Journal of Ethnopharmacology*, 79: 17-21.
 - Gardiner, D., Felker, P. y Carr, T. 1999. Cactus extract increases water infiltration rates in two soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 30: 1707-1712.
 - Garti, N. 1999. Hydrocolloids as emulsifying agents for oil-in-water emulsions. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 20: 327-355.
 - Gennadios, A. y Weller, C. L. 1990. Edible films coating from wheat and corn protein. *Food Technology*. 44: 63-69.
 - Gennadios, A. y Weller, C. L. 1993. Temperature Effect on oxygen Permeability of Edible Protein-based Films. *Journal of Food Science*. 58: 212-214.
 - Gennadios, A., Weller, C.L. y Gooding, C.H. 1994. Measurement errors in water-vapor permeability of highly permeable, hydrophilic edible films. *Journal of Food Engineering*, 21: 395-409.
 - Glicksman, M. 1982. *Food hydrocolloids*. Boca Raton, FL: CRC Press, Inc.
 - Goldstein, G. y Nobel, P.S. 1991. Changes in osmotic pressure and mucilage during low-temperature acclimation of *Opuntia ficus-indica*. *Plant Physiology*, 97: 954-961.
 - Gontard, N., Guilbert, S. y Cuq, J.L. 1992. Edible wheat gluten films: influence of the main process variables on film properties using response surface methodology. *Journal of Food Science*, 57: 190-195.
 - Gontard, N., Duchez, C., Cuq, J.L. y Guilbert, S. 1994. Edible composite films of wheat gluten and lipids: water vapour permeability and other physical properties.

International Journal of Food Science and Technology, 29: 39-50.

- Granados Sánchez, D. y Castañeda Pérez, A.D. 2000 El Nopal. Historia, Fisiología, Genética e Importancia Frutícola. Editorial Trillas. México.
- Greener, I. y Fennema, O. 1989. Edible films and Coatings: characteristics, formation, definitions and testing methods. Chapter 1, pp. 1-21.
- Guilbert, S., Gontard, N. y Gorris, G.M. 1996. Prolongation of the shelf-life of perishable food products using biodegradable films and coatings. Lebensm-Wiss. u.- Technol. 29: 10-17.
- Habibi, Y., Heyraud, A., Mahrouz, M. y Vignon, M.R. 2004. Structural features of pectic polysaccharides from the skin of *Opuntia ficus-indica* prickly pear fruits. Carbohydrate Research, 339: 1119-1127.
- Habibi, Y., Mahrouz, M. y Vignon, M.R. 2005. Isolation and structural characterization of protopectin from the skin of *Opuntia ficus-indica* prickly pear fruits. Carbohydrate Polymers, 60: 205-213.
- Hammouch, H., Shiri, A., Ajjaji, N. y Benhamouch, I. 2004. Inhibition of iron corrosion using *Opuntia* extract. Resúmenes. 3^{er} Congreso Nacional de la tuna, Ben Guerir, Marruecos.
- Heredia, Z.A. 1996. Guía para cultivar jícama en el Bajío. INIFAP. Centro de Investigaciones del Centro. Campo Experimental Bajío. Celaya, México.
- Hernández, J. B. y Serrano, G. R. 2003. Uso del nopal en la industria de la construcción. p.p. 286-289. In: Memorias. IX Congreso Nacional y VII Congreso Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, Zacatecas. México.
- Hiorth, M., Verstand, T., HeiKKilä, J., Tho, I y Sande, S.A. 2006. Immersion coating of pellets with calcium pectinate and chitosan. International Journal of Pharmaceutics, 308: 25-32.

- Hoagland, P.D. y Parris, N. 1996. Chitosan/pectin laminated films. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44: 1915-1919.
- Hutching, J.B. 1999. Food color and appearance. 2nd Ed. Chapman y Hall Food Science Book. Aspen Publisher, Inc. Maryland, USA.
- ISO 6239. 1988. Plastiques: Détermination des caractéristiques en traction sur petites éprouvettes. Association Française de Normalisation. Paris.
- Jagannath, J.H., Nanjappa, C., Das Gupta, D. y Bawa, A.S. 2006. Studies on the stability of an edible film and its use for the preservation of carrot (*Daucus carota*). *International Journal of Food Science and Technology*, 41: 498-506.
- Jaramillo-Flores, M.E., González-Cruz, L., Cornejo-Mazón, M., Dorantes-Álvarez, L., Gutiérrez-López, G.F. y Hernández-Sánchez, H. 2003. Effect of thermal treatment on the antioxidant activity and content of carotenoids and phenolic compounds of cactus pear cladodes (*Opuntia ficus-indica*). *Food Science and Technology International*, 9: 271-278.
- Kester J. J. y Fennema, O. 1986. Edible Films and Coating: A Review. *Food Technology*. 40: 47-57.
- Kim, J.H., Park, S.M., Ha, H.J., Moon, C.J., Shim, T.K., Kim, J.M., Lee, N.H., Kim, H.C., Jang, K.J. y Wie, M.B. 2006. *Opuntia ficus-indica* attenuates neuronal injury in in vitro and in vivo models of cerebral ischemia. *Journal of Ethnopharmacology*, 104: 257-262.
- Kintner, P.K. y Van Buren, J.P. 1982. Carbohydrate Interference and its correction in pectin analysis using the m-hydroxydiphenyl method. *Journal of Food Science*, 47: 756-759.
- Krochta, J.M. 1992. Control of mass transfer in food with edible coatings and films. In: *Advances in Food Engineering*, Singh, R.P. and Wirakartakusumah, M.A., Eds. CRC Press, Boca Raton, pp. 517.

- Kwak, K.P. 2002. Neuroprotective effects of the flavonoids isolated from *Opuntia ficus-indica* var. *saboten*. P5 Degenerative and neurological disorders. (P.5.022).
- Lee, J. y Tripathi, A. 2005. Intrinsic viscosity of polymers and biopolymers measured by microchip. *Analytical Chemistry*, 77: 7137-7147.
- Lee, K.Y., Shim, J. y Lee, H.G. 2004. Mechanical properties of gellan and gelatin composite films. *Carbohydrate Polymers*, 56: 251-254.
- Lee, J.C., Kim, H.R., Kim, J. y Jang, Y.S. 2002. Antioxidant property of an ethanol extract of the stem of *Opuntia ficus-indica* var. *Saboten*. *Journal Agricultural and Food Chemistry*, 50: 6490-6496.
- Letendre, M. Aprano, G.D., Lacroix, M., Salmieri, S. y St-Gelais, D. 2002. Physicochemical properties and bacterial resistance of biodegradable milk protein films containing agar y pectina. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50: 6017-6022.
- Lindstrom, T.R., Morimoto, K. y Cante, C.Y. 1992. Edible films and coatings. In: *Encyclopedia of Food Science and Technology*. Hui, Y.H., Ed. Wiley Interscience, New York, pp. 1
- Liu, L.S., Liu, C.K., Marshall, L. y Hicks, K.B. 2007a. Composite films from pectin and fish skin gelatin or soybean flour protein. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55: 2340-2355.
- Liu, L.S., Finkenstadt, V.L., Liu, C.K., Jin, T., Fishman, M.L. y Hicks, K.B. 2007b. Preparation of poly(lactic acid) and pectin composite films intended for applications in antimicrobial packaging. *Journal of Applied Polymer Science*, 10.1002: 801-810.
- López, E. 2000. Utilización de productos naturales en la clarificación de aguas para consumo humano. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Química. ISPJAE. Universidad de la Habana. Cuba.
- Loro, J. F., Del Río, L. y Pérez-Santana, L. 1999. Preliminary studies of analgesic and anti-inflammatory properties of

- Opuntia dillenni* aqueous extract. Journal of Ethnopharmacology, 61: 213-218.
- Maftoonazad, N., Hosahalli, S.R. y Marcotte, M. 2007a. Evaluation of factors affecting barrier, mechanical, and optical properties of pectine-based films using response surface methodology. Journal of Food Process Engineering, 30: 539-563.
 - Maftoonazad, N., Ramaswamy, H.S., Moalemiyan, M. y Kushalappa, A.C. 2007b. Effect of pectin-based edible emulsion coating on changes in quality of avocado exposed to *Lasiodiplodia theobromae* infection. Carbohydrate Polymers, 68: 341-349.
 - Majdoub, H., Roudesli, S., Picton, L., Le Cerf, D., Muller, G. y Grisel, M. 2001a. Prickly pear nopal pectin from *Opuntia ficus-indica* physico-chemical study in dilute and semi-dilute solutions. Carbohydrate Polymers, 46: 69-79.
 - Majdoub, H., Roudesli, S. y Deratani, A. 2001b. Polysaccharides from prickly pear peel and nopals of *Opuntia ficus-indica*: extraction, characterization and polyelectrolyte behaviour. Polymer International, 50: 552-560.
 - Malainine, M.E., Mahrouz, M. y Dufresne, A. 2005. Thermoplastic nanocomposites based on cellulose microfibrils from *Opuntia ficus-indica* parenchyma cell. Composites Science and Technology, 65: 1520-1526.
 - Mazza, G. y Qi, H. 1991. Control after-cooking darkening in potatoes with edible film forming products and calcium chloride. Journal of Agricultural and Food Chemistry: 39: 2163-2166.
 - McConn M. y Nakata A. 2004. Oxalate reduces calcium availability in the pads of prickly pear cactus through formation of calcium oxalate crystals. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 52: 1371-1374.
 - McDowell, D., Kirwan, M.J. y Coles Richard. 2003. Food Packaging Technology. Editorial CRC Press, Oxford, Inglaterra.

- McGarvie, D., y Parolis, H. 1979a. The mucilage of *Opuntia ficus-indica*. Carbohydrate Research, 69: 171-179.
- McGarvie, D. y Parolis, H. 1979b. The mucilage of *Opuntia ficus-indica*. Part 2. The degraded polysaccharide. J.C.S. Perkin I.
- McGarvie, D., y Parolis, H. 1981. The mucilage of *Opuntia ficus-indica*. Part 4. The acid-labile, peripheral chains of the mucilage of *Opuntia ficus-indica*. Carbohydrate Research, 94: 57-65.
- McHugh, T.H y Krochta, J.M. 1994a. Sorbitol vs glycerol plasticized whey protein edible films: integrated oxygen permeability and tensile property evaluation. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 42: 841-850.
- McHugh, T.H y Krochta, J.M. 1994b. Milk-protein-based edible films and coatings. Food Technology. 48: 97-103.
- McHugh, T.H. y Olsen, C.W. 2004. Tensile properties of fruit and vegetables edible films. United States-Japan Cooperative Program to Natural Resources, 104-108.
- Medina-Torres, L. Brito-de la Fuente, E., Torrestiana-Sanchez, B. y Katthain, R. 2000. Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia Picus-indica*). Food Hydrocolloids, 14: 417-424.
- Medina-Torres, L. Brito-de la Fuente, E., Torrestiana-Sanchez, B. y Alonso, S. 2003. Mechanical properties of gels formed by mixtures of mucilage gum (*Opuntia ficus-indica*) and carrageenans. Carbohydrate Polymers, 52: 143-150.
- Medina-Torres, L. Brito-de la Fuente, E., Gómez-Aldapa, C.A., Aragon-Piña, A. y Toro-Vazquez, J.F. 2006. Structural characteristics of gels formed by mixtures of carrageenan and mucilage gum from *Opuntia ficus-indica*. Carbohydrate Polymers, 63: 299-309.
- Mei, Y. y Zhao, Y. 2003. Barrier and mechanical properties of milk protein-based edible films containing nutraceuticals. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 51: 1914-1918.

- Mercado-Silva, E. y Cantwell, M. 1998. Quality changes in jicama roots stored at chilling and nonchilling temperatures. *Journal of Food Quality*, 21: 211-221.
- Mercado-Silva, E., Garcia, R., Heredia-Zepeda, A. y Cantwell, M. 1998. Development of chilling injury in five jicama cultivars. *Postharvest Biology and Technology*, 13: 37-43.
- Moraga, G. 2002. Aspectos fisicoquímicos relacionados con la crioprotección de fresa y kiwi. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Moraga, G., Martínez-Navarrete, N. y Chiralt, A. 2004. Water sorption isotherms and glass transition in strawberries: influence of pretreatment. *Journal of Food Engineering*, 62: 315-321.
- Morillon, V., Debeaufort, F., Blond, G., Capelle, M., y Voilley, A. 2002. Factors affecting the moisture permeability of lipid-based edible films: a review. *Critical Review in Food Science and Nutrition*, 42: 67-89.
- Ncibi, S., Othman, M.B., Agacha, A., Krifi, M.N. y Zourgui, L. 2008. *Opuntia ficus-indica* extract against chlorpyrifos-induced damage on mice liver. *Food and Chemical Toxicology*, 46: 797-802.
- Nobel, P.S., Cavelier, J. y 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.
- Noman, A.S.M., Hoque, M.A., Haque, M.M., Pervin, F. Y Karim, M.R. 2007. Nutritional and anti-nutritional components in *Pachyrhizus erosus* L. tuber. *Food Chemistry*, 102: 1112-1118.
- Nussinovitch, A., Ward, G. y Lurie, S. 1996. Nondestructive measurement of peel gloss and roughness to determine tomato fruit ripening and chilling injury. *Journal of Food Science*, 61: 383-387.
- Okos, R. 1986. Physical and Chemical Properties of Food. American Society of Agricultural Engineers. Michigan, USA. Capítulo IV: 173.

- Pagan i Gilabert, J. 1996. Degradación enzimática y características físicas y químicas de la pectina de bagazo de melocotón. Tesis doctoral. Universidad de Lleida.
- Panico, A.M., Cardile, V., Garufi, F., Puglia, C., Bonina, F. y Ronsisvalle, S. 2007. Effect of hyaluronic acid and polysaccharides from *Opuntia ficus indica* (L.) cladodes on the metabolism of human chondrocyte cultures. *Journal of Ethnopharmacology*, 111: 315-321.
- Park, E.H. y Chun, M.J. 2001. Wound healing activity of *Opuntia ficus-indica*. *Fitoterapia*, 72: 165-167.
- Park, E.H., Kahng, J.H., Lee, S.H. y Shin, K.H. 2001. An anti-inflammatory principle from cactus. *Fitoterapia*, 72: 288-290.
- Park, H.J., Weller, C.L., Vergano, P.J. y Testin, R.F. 1993. Permeability and mechanical properties of cellulose-based edible films. *Journal of Food Science*, 58: 1361-1366.
- Park, S. y Zhao, Y. 2006. Development and Characterization of edible films from cranberry pomace extracts. *Journal of Food Engineering and Physical Properties*, 71: E95-E101.
- Pastrana-Bonilla, E., Akoh, C.C., Sellappan, S. y Krewer, G. 2003. Phenolic content and antioxidant capacity of muscadine grapes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51: 5497-5503.
- Paulsen, B.S. y Luna, P.S. 1979. Water-soluble polysaccharides of *Opuntia ficus-indica* CV "Bubank's spineless". *Phytochemistry*, 18: 569-571.
- Pimienta, E. 1990. El nopal tunero. Universidad de Guadalajara, México.
- Ramsey, J. E. 1999. Evaluación del comportamiento del adobe estabilizado con cal y goma de tuna. Tesis para optar al Título de Ingeniero Agrícola. Universidad Nacional Agraria. La Molina. Lima.
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M. y Rice-Evans, C. 1999. Antioxidant activity applying an

- improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26: 1231-1237.
- Reineccius, G.A. 1994. Flavor encapsulation. In: *Edible coating and films to improve food quality*, Krochta, J.M., Baldwin, E.A. and Nisperos-Carriedo, M.O., Eds., Technomic Publishing Co. Inc., Basel, pp. 105.
 - Rico-Peña, D.C. y Torres, J.A. 1991. Sorbic acid and potassium sorbate permeability of an edible methylcellulose-palmitic acid film: water activity and pH effects. *Journal of Food Science*, 56: 497-501.
 - Rodríguez-Felix, A. y Cantwell, M. 1988. Developmental changes in composition and quality of prickly pear cactus cladodes (nopalitos). *Plant Foods for Human Nutrition*, 38: 83-93.
 - Rogers, C.E. 1985. Polymer permeability. Comyn, J., Ed., Elsevier Applied Science, New York, pp. 11
 - Rowe, R.C. 1978. The measurement of the adhesion of film coating to tablet surface: the effect of tablet porosity, surface roughness and film thickness. *Journal of Pharmaceutical Science*, 30: 343-346.
 - Ruales, J. y Zumba, J. 1998. Cuantificación y caracterización de fibra dietética en frutas y hortalizas ecuatorianas. pp. 55-59. In: M. Lajolo y E. Wenzel de Menezes, eds. *Temas en Tecnología de Alimentos*. Vol. 2. Fibra Dietética. F. CYTED. Dirección de Publicaciones y Materiales Educativos, Instituto Politécnico Nacional. México.
 - Sáenz, C. y Sepúlveda, E. 1993. Alternativas de industrialización de la tuna (*Opuntia ficus-indica*). *Alimentos*, 18: 29-32.
 - Sáenz, C., Sepúlveda, E. y Matsuhira, B. 2004. *Opuntia* spp mucilage's: a functional component with industrial perspectives. *Journal of Arid Environments*, 57: 275-290.
 - Sáenz, C. et al. 2006. Utilización agroindustrial del nopal. *Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO*.
 - Sapru, V. y Labuza, T.P. 1994. Dispersed phase concentration-effect on water-vapor permeability in

- composite methyl cellulose-stearic acid edible films. *Journal of Food Processing and Preservation*, 18: 359-368.
- Saravia-Tasayco, P.L. 2004. Programa fundamental par el desarrollo económico del Estado de México hacia el 2005 y de competitividad visión 2020. Cluster Nopal. Tecnológico de Monterrey, México.
 - Sepúlveda, E. y Sáenz, C. 1988. Industrialización de la tuna (*Opuntia ficus-indica*). I. Aceite de la semilla. *Alimentos*, 13: 35-38.
 - Sepúlveda, E., Sáenz, C., y Gómez, C. 2003a. Determinación de betanina en ecotipos de tuna roja colectados en Chile. pp. 282-285. *In*. Memorias IX Congreso Nacional y VII Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal. Zacatecas, México.
 - Sepúlveda, E., Sáenz, C., y Gómez, C. 2003b. Comportamiento reológico de néctar elaborado con hidrocoloide de nopal: efecto del tratamiento térmico. pp. 269-272. *In*. Memorias IX Congreso Nacional y VII Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal. Zacatecas, México.
 - Sepúlveda, E., Sáenz, C., Aliaga, E. y Aceituno, C. 2007. Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *Journal of Arid Environments*, 68: 534-545.
 - Skendi, A., Biliaderis, C.G., Lazaridou, A. y Izydorezyk, M.S. 2003. Structure and rheological properties of water soluble β -glucans from oat cultivars of *Avena sativa* y *Avena Bysantina*. *Journal of Cereal Science*, 38: 15-31.
 - Sorensen, M. 1990. Observations on distribution, ecology and cultivation of the tuber-bearing legume genus *Pachyrhizus* Rich-ex D.C, Fabaceae: Phaseoleae. Wageningen. Paper, 90: 1-38.
 - Sothornvit, R. y Pitak, N. 2007. Oxygen permeability and mechanical properties of banana films. *Food Research International*, 40: 365-370.

- Stintzing, F.C. y Carle, R. 2005. Cactus stems (*Opuntia spp.*): a review on their chemistry, technology, and uses. *Molecular, Nutrition and Food Research*, 49: 175-194.
- Tharanathan, R.N. 2003. Biodegradable films and composite coatings: past, present and future: a review. *Trends in Food Science and Technology*, 14: 71-78.
- Torres Acosta A. A., Martínez M. y Celis, C. 2004. Cement-based mortar improvement from nopal and *Aloe vera* additions. 4º Foro de Investigación UDEM: Universidad de Monterrey, Monterrey, Nuevo León, México.
- Torres, J. A. 1994. Edible films and coatings from proteins. In: *Protein Functionality in Food Systems*. Hettiarachchy, N.S. and Ziegler, G.R., Eds. Marcel Dekker Inc., New York, pp. 467.
- Trachtenberg, S. y Mayer, A.M. 1981. Composition and properties of *Opuntia ficus-indica* mucilage. *Phytochemistry*, 20: 2665-2668.
- Trachtenberg, S. y Mayer, A.M. 1982. Mucilage cells, calcium oxalate crystals and soluble calcium in *Opuntia ficus-indica*. *Botany*, 50: 549-557.
- Trejo-González, A., Gabril-Ortiz, G., Puebla-Pérez, A. M., Guisar-Contreras, M.D., Murguía-Mazariegos, M. del R., Mejía-Arreguín, S y Calva, E. 1996. A purified extract from Prickly pear cactus (*Opuntia fuliginosa*) controls experimentally induced diabetes in rats. *Journal of Ethnopharmacology*, 55: 27-33.
- Trejo, V., Aragón, N. y Miranda, P. 2001. Estimación de la permeabilidad al vapor de agua en películas a base de quitosán. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 45: 1-5.
- Trezza, T.A. y Krochta, J.M. 2000. The gloss of edible coatings as affected by surfactants, lipids, relative humidity, and time. *Journal of Food Science*, 65: 658-662.
- Trombetta, D., Puglia, C., Perri, D., Licata, A., Pergolizzi, S., Lauriano, E.R., De Pssquale, A., Saija, A. y Bonina, F.P. 2006. Effect of polysaccharides from *Opuntia ficus-indica*

- (L.) cladodes on the healing of dermal wounds in rat. *Phytomedicine*, 13: 352-358.
- Valverde, J.M., Valero, D., Martínez-Romero, D., Guilén, F., Castillo, S. y Serrano, M. 2005. Novel edible coating based on *Aloe vera* gel to maintain table grape quality and safety. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53: 7807-7813.
 - Vargas, M., Albors, A., Chiralt A. y González-Martínez, C. 2006. Quality of cold-stored strawberries as affected by chitosan-oleic acid edible coatings. *Postharvest Biology and Technology*, 41: 164-171.
 - Vargas, M, Albors, A., Chiralt, A., González-Martínez, C. 2008 Characterization of chitosan-oleic acid composite films. *Food Hydrocolloids* (en prensa).
 - Vargas-Rodríguez, L. y Ramos-Ramírez, E. 2003. Un método simple de extracción de mucílago en nopal verdura. I Congreso de Ingeniería Agroindustrial, Universidad de Chapingo, México.
 - Vázquez-Ramírez, R., Olguín-Martínez, M. y Hernández-Muñoz, R. 2006. Reversing gastric mucosal alterations during ethenol-induced chronic gastritis in rats by oral administration of *Opuntia ficus-indica* mucilage. *World Journal Gastroenterol*, 12: 4318-4324.
 - Velásquez, E. 1998. El nopal y su historia. Editorial Clío. México.
 - Villalobos, R., Chanoma, J., Hernandez, P., Gutierrez, G. y Chiralt, A. 2005. Gloss and transparency of hydroxypropyl methylcellulose films containing surfactanta as affected by their microstructure. *Food Hydrocolloids*, 19: 53-61.
 - Villalobos-Carvajala, R., Hernández-Muñoz P., Albors A. y Chiralt, A. 2008. Barrier and optical properties of edible hydroxypropyl methylcellulose coatings containing surfactants applied to fresh cut carrot slices *Food Hydrocolloids* (en prensa).
 - Villegas, C. y De Gante, M. 1997. Los Nopales (*Opuntia spp.*) recursos y símbolos tradicionales en México. pp. 271-273. *In. Memorias. VII Congreso Nacional y V*

Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal. Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México.

- Wiese, J., McPherson, S. y Odden, M. 2004. Effect of *Opuntia ficus-indica* on symptoms of the alcohol hangover. *Arch. Intern. Med.* 164: 13334-1340.
- Yu, L., Reitmeier, C.A. y Love, M.H. 1996. Strawberry texture and pectin content as affected by electron beam irradiation. *Journal of Food Science*, 61: 844-846.
- Zambrano, M. L., Hernández, A. D. y Gallardo, Y. 1998. Características fisicoquímicas del nopal. P. 29-42. *In.* M. Lajolo y E. Wenzel de Menezes, eds. *Temas en Tecnología de Alimentos*. Vol. 2. Fibra Dietética. F. CYTED. Dirección de Publicaciones y Materiales Educativos, Instituto Politécnico Nacional, México.

