

**Artículo de investigación**<https://doi.org/10.61767/mjte.002.1.3043>

López-Ordaz et al., 2023

Recibido: 07-02-2023

Revisado: 17-03-2023

Aceptado: 26-04-2023

Publicado: 30-04-2023

CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE PELÍCULAS COMESTIBLES A BASE DE ALMIDÓN DE MAÍZ (*Zea mays*) Y HARINA DE YUCA (*Manihot esculenta crantz*)

PHYSICALCHEMICAL CHARACTERIZATION OF EDIBLE FILMS BASED ON CORN STARCH (*Zea mays*) AND CASSAVA FLOUR (*Manihot esculenta crantz*)

P. López-Ordaz^{1*}, J. Yáñez-Fernández¹, E.A. Vargas-León², F.J. Martínez-Valdez², J.M. Castillo-Minjarez³, A. Totosaus-Sánchez⁴, M.E. Rodríguez-Huezo⁴ y I. García-Martínez⁴.

¹Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Biotecnología Alimentaria. Av. Acueducto S/N Col. Barrio la Laguna, Ticomán, C.P. 07340, Ciudad de México, México.

²División Química Biológicas, Universidad Tecnológica de Tecámac, Carretera Federal México-Pachuca Km 37.5, Col. Sierra Hermosa, C.P. 55740, Tecámac, Estado de México, México.

³División de Electromecánica Industrial, Universidad Tecnológica de Tecámac, Carretera Federal México-Pachuca Km 37.5, Col. Sierra Hermosa, C.P. 55740, Tecámac, Estado de México, México.

⁴Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica. Av. Tecnológico y Hank González, Ecatepec de Morelos 55210, Estado de México, México.

*Correspondencia: pedroordaz@hotmail.com

Resumen

El aprovechamiento de nuevos materiales para elaborar películas comestibles (PC) ha suscitado en la actualidad el interés de reducir problemas de contaminación y reciclaje, además han cobrado un gran interés debido a su capacidad para conservar los alimentos manteniendo sus propiedades físicas y organolépticas durante más tiempo. Por lo que, estos nuevos materiales deben tener buenas propiedades mecánicas y de barreras aceptables (flexibles y una estructura elástica) para facilitar su aplicación. El objetivo de este trabajo fue estudiar los efectos de la composición sobre las propiedades mecánicas, así como, opacidad, permeabilidad al vapor de agua y microestructura de películas comestibles (PC) de almidón de maíz (*Zea mays*) y harina de yuca (*Manihot esculenta crantz*). Las concentraciones de almidón y harina fueron de 1 y 2%, respectivamente, mezclándose con albumina de huevo (0.75 mg/mL), usando glicerol al 3%



Artículo de investigación

López-Ordaz et al., 2023

como plastificante. Las PC con mejores propiedades mecánicas y ópticas fueron obtenidas con la mezcla al 1% de almidón de maíz (AM) y harina de yuca (HY), requiriendo una fuerza de 15 N de esfuerzo a la punción con 0.35 cm de deformación, 35% de elongación y 10 Kg/mm² de resistencia a la ruptura. Además, mostraron una opacidad de 5.2 Au*nm/mm y 1.2x10⁻¹⁴ g/m s Pa de permeabilidad al vapor de agua (WVP). Estos resultados mostraron que las PC a base de AM - HY al 1% podrían ser usadas como una alternativa para recubrir frutas y hortalizas, prolongando su vida útil.

Palabras clave: Almidón de maíz, harina de yuca, deformación, elongación, permeabilidad al vapor de agua.

Abstract

The use of new materials to elaborate edible films (PC) has currently raised the interest to reduce contamination, and recycling problems, in addition they have gained great interest due to their capacity to preserve food maintaining their physical, and organoleptic properties for a long time. Therefore, these new materials must have good mechanical properties, and acceptable barriers (flexible and elastic structure) to facilitate their application. The objective of this work was to study the effects of composition on the mechanical properties, as well as opacity, water vapor permeability, and microstructure of edible films (PC) of corn starch (*Zea mays*), and cassava flour (*Manihot esculenta cranz*). The concentrations of starch, and flour were 1 and 2%, respectively, mixed with egg albumin (0.75 mg/mL), using 3% glycerol as plasticizer. The PC with the best mechanical, and optical properties were obtained with the 1% mixture of corn starch (AM), and cassava flour (HY), requiring a force of 15 N of puncture stress with 0.35 cm of deformation, 35% of elongation and 10 Kg/mm² of breaking strength. In addition, they showed an opacity of 5.2 Au*nm/mm and 1.2x10⁻¹⁴ g/m s Pa water vapor permeability (WVP). These results showed that 1% AM-HY based PC could be used as an alternative for coating fruits and vegetables, prolonging their shelf life.

Keywords: Corn starch, cassava flour, deformation, elongation, water vapor permeability.

1. Introducción

Las películas (PC) y recubrimientos comestibles (RC), son una capa delgada de material biodegradable que proporciona barreras al oxígeno, humedad y actividad de los solutos en alimentos [1,2]. En los últimos años las PC están adquiriendo mayor interés en su uso como empaque de alimentos, debido a su manejabilidad y carácter biodegradable, reduciendo la contaminación ambiental, con respecto al uso de películas sintéticas. Además, la

incorporación de aditivos en su formulación puede extender la vida útil, mejorando y conservando la calidad de los alimentos durante su almacenamiento. Las PC pueden demorar el proceso de madurez de las frutas y hortalizas controlando la pérdida fisiológica de peso (PFP), mejorando la apariencia, tanto en frescura, brillo y firmeza, características deseables en productos perecederos. Dentro de las macromoléculas más utilizadas para la obtención de PC y RC, se pueden encontrar polisacáridos (celulosa, gomas



Artículo de investigación

López-Ordaz et al., 2023

y almidón), proteínas (caseína, colágeno y gelatina) y lípidos (grasas vegetales y animales) [3].

El polisacárido más utilizado en la elaboración de PC y RC es el almidón, ya que es el biopolímero más abundante en la naturaleza, renovable, de bajo costo y biodegradable [4], teniendo una gran diversidad de fuentes botánicas para su obtención, con características funcionales específicas. La harina de yuca es usada en la industria alimentaria para la fabricación de pastas, como espesante de sopas deshidratadas, como relleno para carnes procesadas, en galletería, condimentos y papillas. Su uso en mezclas instantáneas y harinas precocidas ha incrementado gracias a sus propiedades funcionales, por lo que su evaluación en la formulación de PC y RC, se ha convertido en una excelente alternativa de interés para la investigación. En la actualidad la tendencia es combinar diferentes macromoléculas, aprovechando sus propiedades, mejorando las características de las PC. Las PC y RC han demostrado tener diversas aplicaciones, aprovechando sus propiedades como recubrimientos activos (Active Coating Systems), al incorporar agentes antimicrobianos, enzimas, antioxidantes, indicadores de pH, que permitan conservar las propiedades organolépticas de las frutas y hortalizas [3], ya que uno de los problemas que se presentan en la recolección de estos productos en su madurez, son los cambios metabólicos que aceleran la senescencia y destrucción del tejido celular. Asimismo, después de la recolección se produce pérdida de turgencia y cambios fisicoquímicos que demeritan la calidad del producto haciendo necesaria la búsqueda de opciones, que prologuen su vida útil. Por lo que, la finalidad de este trabajo fue caracterizar las propiedades fisicoquímicas, mecánicas, ópticas y microestructurales de las PC formuladas a base de almidón de maíz (*Zea mays*) y harina de yuca (*Manihot esculenta Crantz*).

2. Materiales y métodos

Para la elaboración de las PC se utilizó almidón de maíz (*Zea mays*) (Sigma Aldrich, USA) y harina de

yuca (*Manihot esculenta Crantz*) adquirida en un mercado de la Ciudad de México y glicerol anhidro (J.T. Baker, USA).

2.1. Películas comestibles

Las PC, a partir de la mezcla binaria de AM-HY, se obtuvieron siguiendo la metodología reportada por Mali et al., [5]. Las formulaciones se establecieron tomando en cuenta como variable independiente, la concentración AM y de HY (1 y 2%, respectivamente). La concentración del plastificante fue de 3%, tomando como base un volumen de 35 mL de albumina de huevo a una concentración de 0.75 mg/mL, todos los tratamientos se efectuaron por triplicado. Las suspensiones se mezclaron calentando desde 30 hasta 95 °C en agitación, por 10 min, para producir la gelatinización, posteriormente se adicionó la proteína hasta obtener una solución homogénea que se vertió en cajas Petri de vidrio, que se llevaron a sequedad en un horno de convección forzada (Lab-line modelo Imperial V, USA) a 40 °C durante 12 h.

2.2. Propiedades Fisicoquímicas

2.2.1. Permeabilidad de vapor de agua (WVP)

La WVP se determinó según el método propuesto por Senturk et al., [6], basado en la prueba ASTM E96-80 (ASTM, 1989). La permeabilidad de las PC se midió con muestras de 3 pulgadas cuadradas, que fueron colocadas en frascos de vidrio con un gradiente de humedad relativa al 100% a temperatura ambiente (24 ±1°C). Los frascos se pesaron cada 24 h durante 15 días, tomando el valor de la temperatura. La WVP (g/m s Pa) se calculó empleando la ecuación (1). Se realizaron tres ensayos por cada PC.

$$WVP = \frac{W * L}{A * T * \Delta P} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

W= Cantidad de penetrante que atraviesa la película

L= Espesor de la película,

A= Área de la película

T= Tiempo



Artículo de investigación

López-Ordaz et al., 2023

ΔP = Diferencia de presión parcial a través de la película

2.2.2. Porcentaje de solubilidad (materia soluble total)

El porcentaje de solubilidad (%S) se determinó por el método reportado por Pereda et al., [7]. Se cortaron muestras de PC de 2x2 cm y se pesaron, posteriormente se colocaron en vasos de precipitados con 30 mL de agua destilada en condiciones ambientales (24°C y 55% humedad relativa) durante 24 h. Finalmente, las muestras no disueltas se llevaron a 105 °C durante 24 h. El %S se calculó mediante la ecuación 2.

$$\%S = \frac{P.I.P. - P.F.P.S.}{P.I.P.} \times 100 \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

% S= Porcentaje de solubilidad

P.I.P.= Peso inicial de la película

P.F.P.S.= Peso final de la película seca

2.2.3. Proteína soluble

La proteína soluble se determinó por el método descrito por Jangchud et al., [8], considerando la cuantificación de la proteína soluble por la técnica de Biuret [9], de acuerdo con la ecuación 3.

$$\%P.S. = \frac{C.P.}{P.I.P. \times \% P.T. \times \% M.S.O.} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde

% P.S.= Porcentaje de proteína solubles

C.P. = Concentración de la proteína

P.I.P.= Peso inicial de la película

% P.T.= Porcentaje de la proteína total

%M.S.P.= Porcentaje de la materia seca de la película

2.3. Propiedades mecánicas

2.3.1. Espesor

Los espesores de las PC se midieron con un micrómetro (Mitutoyo modelo Digimatic, Japón) con una precisión de 0.001 mm; midiendo 4 puntos centrales y 6 puntos laterales de cada muestra.

2.3.2. Esfuerzo y deformación a la punción

Para determinar la resistencia a la punción se utilizó la metodología descrita por Senturk et al., [6], usando un textuómetro (TA-XT2i Texture Analyser, Stable Micro System, UK). Se cortaron muestras de 2.5 cm de diámetro, las cuales se sujetaron a través de dos placas de acrílico de 1.6 cm de diámetro. Para perforar las PC se utilizó una celda esférica de 1.27 cm de diámetro con una velocidad constante de 5 mm/s. Se utilizó la ecuación 4 para calcular la deformación a la punción.

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \sqrt{\frac{D^2 - l_0^2}{2a}} - l_0 \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde

$\frac{\Delta l}{l_0}$ = Deformación a la punción

D = Desplazamiento de la sonda

F= Fuerza de punción

l_0 = Radio de la celda

2.3.4. Resistencia a la tensión de ruptura

La resistencia a la tensión de ruptura (RTR) y el porcentaje de elongación (%E) se determinaron utilizando el textuómetro descrito anteriormente, de acuerdo con lo reportado por Chen et al., [10]. Para determinar la tensión de ruptura de las PC se ejerció una carga máxima de 25 Kg a una velocidad de 50 mm/min. Las muestras fueron de 100 mm de largo y 25 mm de ancho. Para calcular la RTM y %E se utilizaron las ecuaciones 5 y 6, respectivamente.

$$RT = \frac{C}{A} \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde

RT= Resistencia a la tensión en la ruptura

C= Carga máxima

A= Área trasversal inicial (espesor por el ancho de la película) en mm²

$$\%E = \frac{D_a - D_i}{D_i} \times 100 \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde

%E = Porcentaje de elongación



Artículo de investigación

López-Ordaz et al., 2023

D_a = Distancia de alargamiento hasta la ruptura (mm)

D_i = Distancia inicial (50 mm)

2.4. Propiedad óptica

2.4.1 Opacidad

La determinación de la opacidad de las PC se hizo de acuerdo por el método reportado por Salgado et al., [11]. Para esta determinación se tomaron muestras de 2 x 3 cm y se colocaron en una celda de un espectrofotómetro (Cary 50 BIO UV-visible, Agilent Technologies, Australia) en forma perpendicular al paso del haz de luz a una longitud de onda de 600 nm absorbancia, la opacidad se calculó usando la ecuación 7.

$$\text{Opacidad} = \frac{\text{Absorbancia (600 nm)}}{\text{Espesor (s)}} \quad \text{Ec. (7)}$$

2.5 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Se realizaron cortes transversales y longitudinales de las PC, que se recubrieron con oro-paladio mediante sputtering (Desk IV, Denton Vacuum, EUA), para obtener micrografías a una magnificación de 1000X, utilizando un microscopio electrónico de barrido (JEOL JEM-6390LV, JEOL, Japón), en modo de alto vacío.

2.6 Temperatura de fusión

La temperatura de fusión de las PC se determinó de acuerdo por la metodología descrita por Vieyra et al., [12]. Se pesaron de 3-5 mg de PC en capsulas de aluminio (No. 0219-0062), se sellaron herméticamente y se llevaron a una rampa de calentamiento de 40-250 °C con una velocidad de calentamiento de 5°C/min, usando un calorímetro diferencial de barrido (DSC) (Pyris 1, Perkin Elmer, USA) calibrando la temperatura y el flujo de calor, utilizando el material de referencia (Indio, No. 0319-0033).

2.7 Análisis estadístico

Las diferencias significativas ($p < 0.0001$) entre las réplicas se verificaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) empleando diferencias mínimas significativas de prueba de Duncan. Dicho análisis se realizó a través del Software

Sigma Plot (versión. 12, Systat Software, Inc., USA).

3. Resultados y discusión

3.1. Permeabilidad de vapor de agua

Las PC de AM 1% y AM-HY 1% mostraron baja permeabilidad al vapor de agua (WVP) con 1.221×10^{-14} g/m s Pa y 1.256×10^{-14} g/m s Pa respectivamente, sin embargo, la permeabilidad al vapor de agua de las PC de AM 2% y HY-2% fue de 1.59×10^{-14} g/m s Pa y 1.815×10^{-14} g/m s Pa, respectivamente, esto quiere decir que a mayor concentración de sólidos, mayor será la permeabilidad al vapor de agua. Así también, estas diferencias podrían estar relacionadas con las modificaciones inter-intramoleculares de las cadenas poliméricas presentes en las PC causadas por el carácter hidrofílico del glicerol, lo que, favorecería la absorción y desorción de moléculas de agua. Además, esto se podría asociar con el espesor, de acuerdo a lo reportado por Vázquez-Luna et al., [13] quienes mencionan que, a mayor espesor, la WVP incrementa en función a la capacidad de adsorción que tiene el material. Esto coincide con los resultados obtenidos en las PC AM 2% y HY 2%, que presentan espesores mayores (0.1329 y 0.1548, respectivamente), observando un efecto significativo ($P < 0.0001$). No obstante, los resultados de WVP obtenidos en este trabajo son menores a lo previamente reportado por Mali et al., [5] en PC de almidón de ñame-glicerol (1.8×10^{-10} g/m s Pa), en PC de metilcelulosa-glicerol 0.5×10^{-10} g/m s Pa determinado por Turhan & Sahbaz, [14], en PC a base de mucilago de nopalgrenetina-cera de abeja 7.578×10^{-11} g/m s Pa reportado por Salazar et al., [15], en PC de almidón de maíz-alcohol polivinílico-nano cristal de celulosa 1.9×10^{-10} g/m s Pa descrito por Noshirvani et al., [16], en PC de almidón de maíz-nano fibra de celulosa 8.3×10^{-11} g/m s Pa determinado por Li et al., [17], y en PC de almidón de papa-nano partículas de zeína 3.56×10^{-11} g/m s Pa reportado por (Farajpour et al., [18]).



Artículo de investigación

López-Ordaz et al., 2023

3.2 Porcentaje de solubilidad

Las PC de HY al 2% mostraron 55.01% de solubilidad, las de AM 2% fueron de 53.97% y las de la mezcla AM-HY al 2%, fue de 53.28%. El análisis estadístico (Tabla 1) indica que la solubilidad es mayor al incrementar el espesor de la PC, esto debido al incremento de la concentración de sólidos de cada formulación. Estos % de solubilidad son mayores a lo reportado por Wang et al., [18] en películas de colágeno-almidón (26.61 y 35.83%). Además, Wang et al., [19] reportó que la solubilidad en agua permite determinar la resistencia de las PC, al exponerse a altos porcentajes de humedad, como las que tienen las frutas y hortalizas de manera habitual, lo que condiciona el éxito o fracaso de los recubrimientos.

3.3 Proteína soluble

La PC de HY al 2% mostro un 35.6% de proteína soluble, mientras que en la PC de AM al 1% disminuyo a 32.4%. No obstante, que la concentración de proteína se mantiene constante en todas las PC, se observa diferencias significativas en la determinación de proteína (tabla 1). La diferencia se produjo por el contenido de proteína del AM, que es bajo, esto es debido a la purificación previa a su comercialización. Mientras que la HY, al no estar purificada, cuenta con una mayor cantidad de proteína en su composición, por lo que, tiene la PC con mayor porcentaje de proteína.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de películas comestibles a diferentes formulaciones

Formulación	Espesores (mm)	% Solubilidad	% Proteína Soluble	P(g/m s Pa)
A.M. 1%	0.1071± 0.003 ^a	51.59± 0.086 ^a	32.4± 0.180 ^a	1.221 x10 ⁻¹⁴ ±0.099 ^a
A.M. 2%	0.1329 ± 0.001 ^c	53.97± 0.086 ^c	34.4± 0.217 ^c	1.59 x10 ⁻¹⁴ ± 0.095 ^b
H.Y. 1%	0.1225 ± 0.001 ^b	52.89± 0.017 ^b	33.4 ± 0.278 ^b	1.435 x10 ⁻¹⁴ ± 0.086 ^c
H.Y. 2%	0.1548± 0.001 ^d	55.01± 0.086 ^d	35.6± 0.264 ^d	1.815 x10 ⁻¹⁴ ±0.086 ^d
A.M.-H.Y. 1%	0.1021± 0.001 ^a	51.15± 0.017 ^a	32.2± 0.212 ^a	1.256 x10 ⁻¹⁴ ± 0.108 ^a
A.M.-H.Y. 2%	0.1259 ± 0.001 ^b	53.28± 0.015 ^c	33.2± 0.215 ^b	1.432 x10 ⁻¹⁴ ± 0.086 ^b

^{a, b, c, d} Valores en la misma columna con letras diferentes muestran diferencias significativas (P<0.0001)

3.4. Propiedades mecánicas

3.4.1 Esfuerzo a la punción

Esta prueba determina el esfuerzo al impacto y la resistencia de las PC, lo que, permite establecer su durabilidad. En la Figura 1, se puede observar que las PC de almidones no combinadas como AM y HY 1 y 2% presentaron menor esfuerzo a la punción. Por otro lado, las PC combinadas de AM-HY 1 y 2% requieren mayor esfuerzo mecánico (15-14 N, respectivamente), expresando mayor resistencia y flexibilidad. Esto es causado por la presencia del glicerol, ya que tiene la capacidad de enlazar moléculas de agua a las cadenas poliméricas, reduciendo las interacciones que

generan el espacio inter e intramolecular, denominado volumen libre, lo que, provoca una mayor movilidad de las cadenas. Estos resultados concuerdan con lo reportado por [20, 21] para las PC elaboradas a base de almidón de chícharo y las PC de almidón de yuca, las cuales se encuentran en un intervalo de 2 a 24 N respectivamente. Además, Aguilar-Méndez et al., [22] reportaron que para películas de gelatina-carboximetilcelulosa se requiere un esfuerzo a la punción de 25 a 50 N. Sin embargo, al incrementar los sólidos en la formulación las PC son más frágiles y quebradizas.



Artículo de investigación

López-Ordaz et al., 2023

3.4.2. Deformación a la punción

La deformación de las PC mostró diferencia significativa mínima ($p < 0.0001$), lo cual fue influenciado por el incremento de concentraciones de AM y HY, presentando fragilidad. Además, la influencia del glicerol en la capacidad de deformación se observa a bajas concentraciones de AM y HY mostrando una disminución a la resistencia y deformación de las PC. Tapia-Blacido et al., [23], reportaron incrementos en la deformación de PC, con aumentos de concentraciones de almidón y

glicerol, esto se puede atribuir a que, al disminuir las interacciones intermoleculares, se favorece la movilidad de las macromoléculas, lo cual también, contribuye a la disminución de las fuerzas que existen con macromoléculas adyacentes (Sobral et al., [24]). Asimismo, estos resultados coinciden por lo reportado por Coughlan et al., [25], quienes mencionan que las combinaciones proteína-polisacárido presentan propiedades funcionales más efectivas.

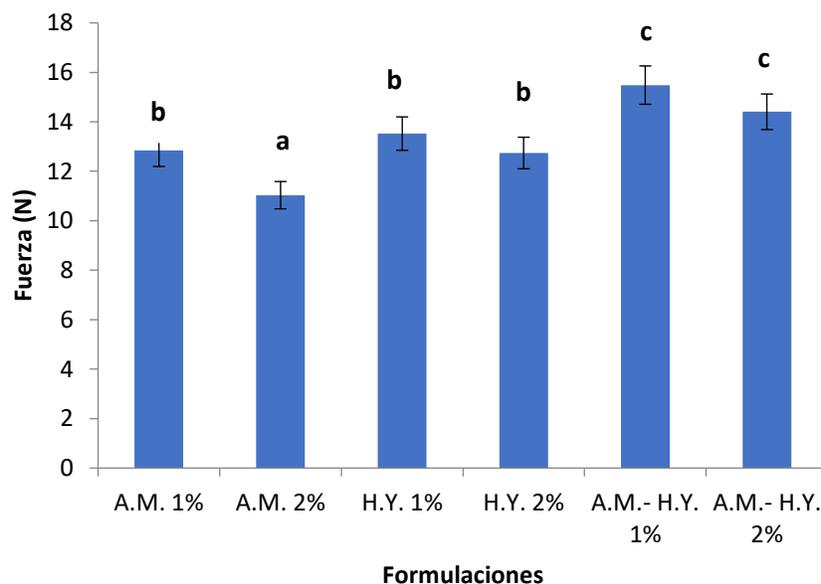


Figura 1. Variación del esfuerzo a la punción con respecto a la composición de las películas comestibles. Las barras marcadas con las mismas letras no presentan diferencias significativas entre sí ($P > 0.0001$).



Artículo de investigación

López-Ordaz et al., 2023

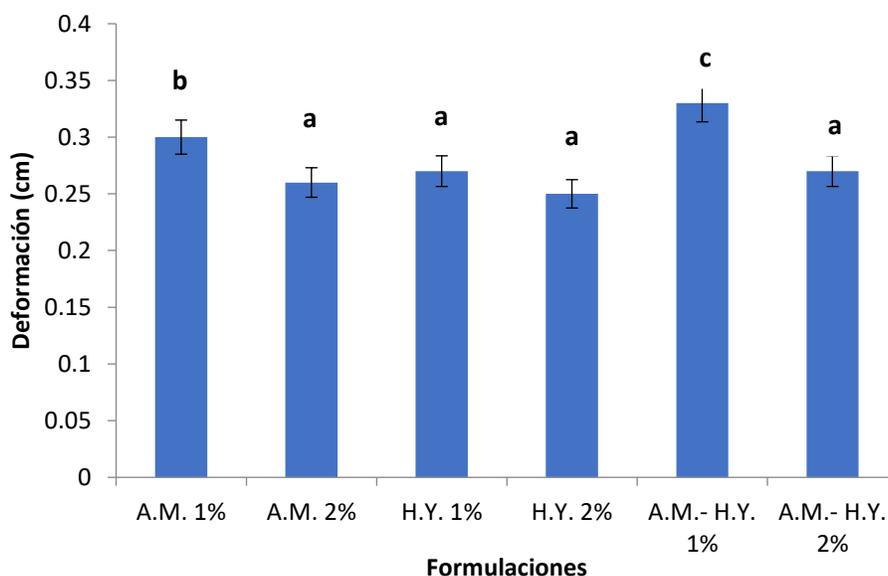


Figura 2. Variación de la deformación con respecto a la composición de las películas. Las barras marcadas con las mismas letras no presentan diferencias significativas entre sí ($P > 0.0001$).

3.4.3. Resistencia a la tensión de ruptura y % de elongación

Los resultados de RTR y %E se traducen como la fuerza máxima que puede soportar una PC ante un esfuerzo de tensión y su capacidad de estiramiento. Las PC de AM y HY al 1% presentaron las mejores propiedades de RTR con 10 Kg/mm^2 , mientras que su %E fue del 35%. El resto de las formulaciones presentaron un efecto negativo significativo, esto se debe posiblemente a la interacción de la albumina y los almidones que propicia una menor cavidad en sus estructuras, (Figura 6). Los resultados obtenidos de elongación a la ruptura fueron superiores a lo

reportado por Mali et al., [21] para películas elaboradas con almidón de yuca-sorbitol, cuyos valores estuvieron entre el 3 y el 30%. Por otro lado, Chang et al., [26] reportaron una mínima capacidad de hidratación de las películas a base de almidón, cuando la concentración de glicerol se encuentra en el intervalo de 10 a 15% p/p. Además, mencionan que esto pudiera atribuirse a factores como la estacionalidad, el grado de madurez y las características propias de cada almidón, así como un efecto antagónico del plastificante en los sistemas de mezclas evaluados.



Artículo de investigación

López-Ordaz et al., 2023

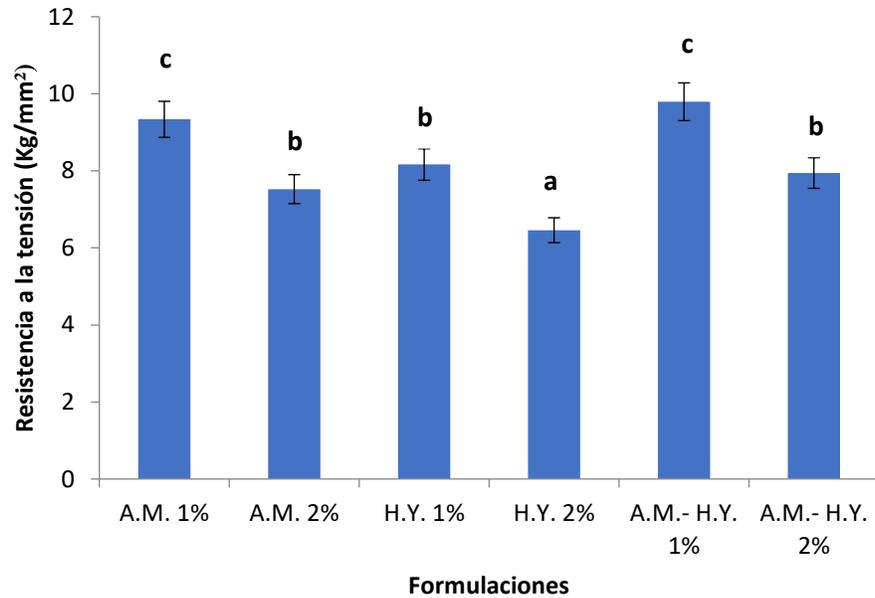


Figura 3. Variación de la resistencia a la tensión de ruptura con respecto a la composición de las películas comestibles. Las barras marcadas con las mismas letras no presentan diferencias significativas entre sí ($P > 0.0001$).

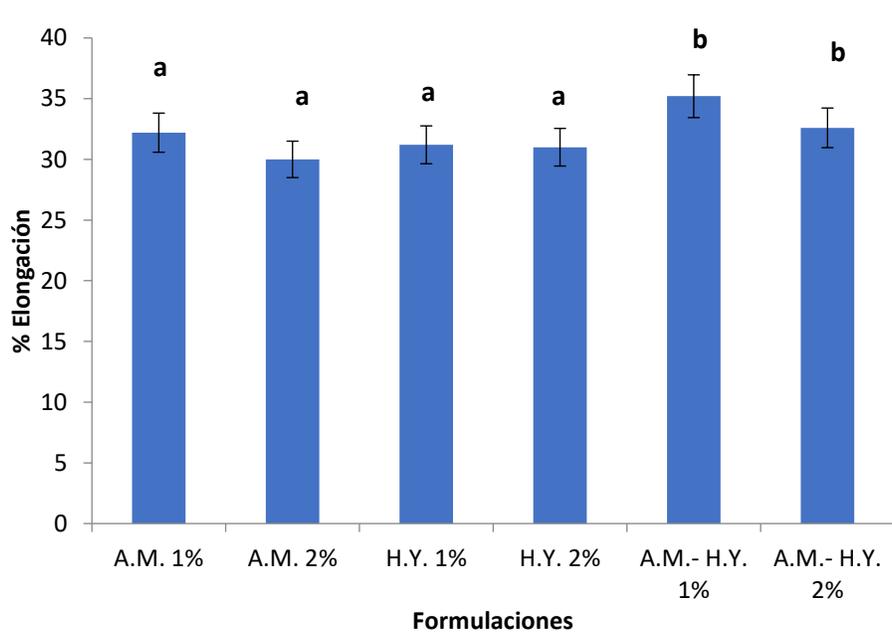


Figura 4. Variación del porcentaje de elongación con respecto a la composición de las películas. Las barras marcadas con las mismas letras no presentan diferencias significativas entre sí ($P > 0.0001$).



Artículo de investigación

López-Ordaz et al., 2023

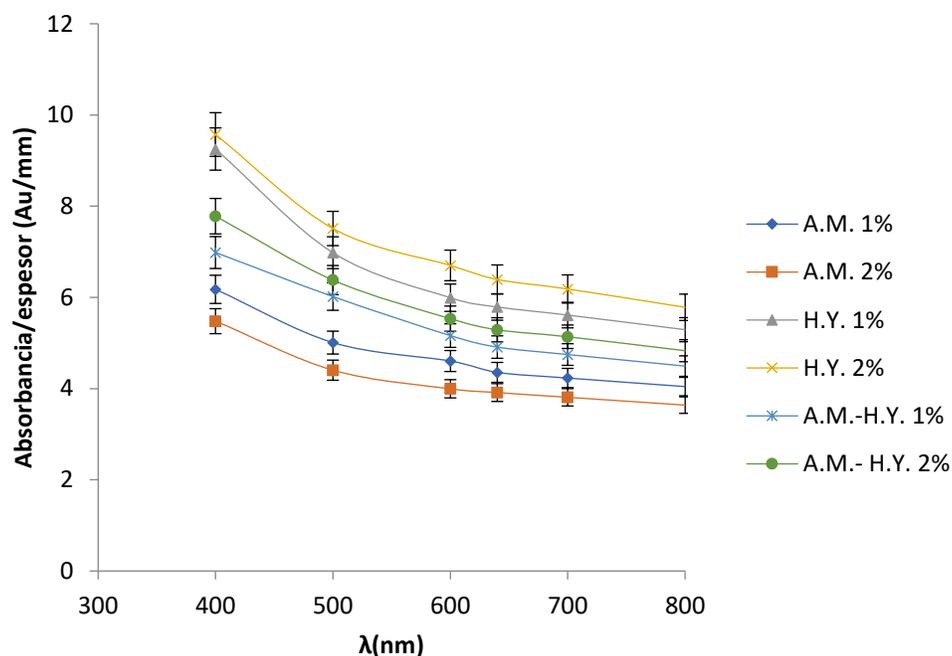


Figura 5. Variación de opacidad con respecto a las formulaciones en las películas comestibles.

3.5. Propiedad óptica

Las formulaciones de HY al 1 y 2% presentan un valor de opacidad significativamente mayor ($P < 0.0001$) en comparación con las películas de AM 1 y 2%. Sin embargo, las PC de AM-HY 1 y 2%, tuvieron opacidad intermedia debido a la buena interacción inter-intramolecular de los almidones y la albumina. Lo anterior, puede ser asociado a la interacción de las cadenas poliméricas de almidones y proteínas, al respecto, Olu-Owolabi et al., [27], señalan que la transparencia o claridad de las PC de almidón se incrementa a medida que disminuye el contenido de amilosa, interfiriendo con el paso de luz en la estructura de la PC, generando una apariencia opaca. Contreras-Pérez et al., [28] reportaron que, la opacidad en el caso de las PC de almidón es afectada por las fuentes de almidones.

3.6 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

En los resultados de los estudios de microestructura mediante SEM de la PC de AM y HY al 1%, se observan algunas regiones rígidas

(estructura cristalina) y gomosas (Figura 6a), provocadas por la presencia del glicerol, que influyó significativamente. Por otro lado, en la figura 6b se observa una estructura característica del almidón de maíz, mostrando gránulos de forma esférica y poliédrica en su mayor parte. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Aguilar-Méndez et al., [29] en PC a base de almidón-gelatina. Además, se observa una estructura compacta de la PC, lo que permite menor permeabilidad al vapor de agua (Tabla 1), mayor esfuerzo de punción, tensión, elongación y resistencia de tensión a la ruptura (Figuras 1-4). De esta manera se observa que las combinaciones de almidones a baja concentración con proteína, presenta una buena interacción con el glicerol. Esto se debe a que el glicerol tiene la capacidad de enlazar moléculas de agua a la estructura polimérica, reduciendo de esta forma la interacción entre sus cadenas que generan el espacio inter e intramolecular ya mencionado previamente, provocando una mayor movilidad en las cadenas poliméricas [20].



Artículo de investigación

López-Ordaz et al., 2023

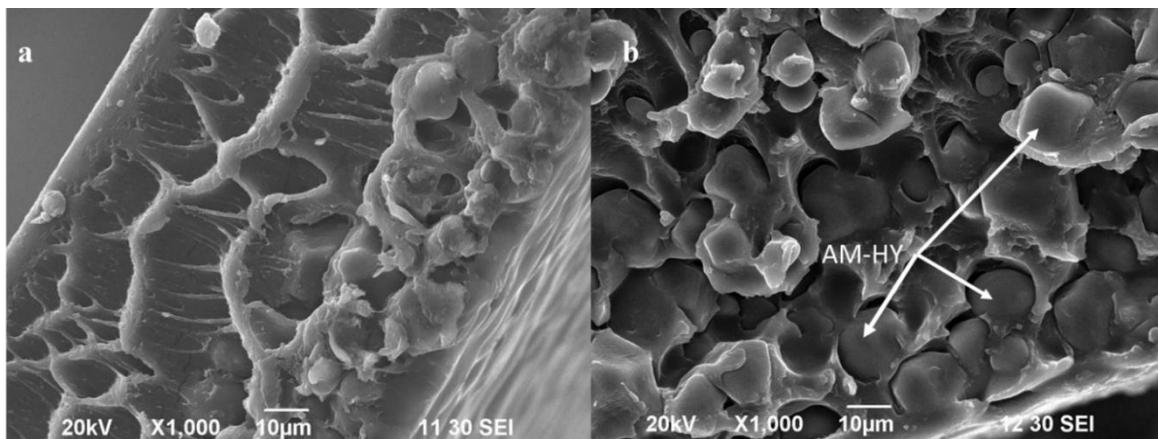


Figura 6. Imágenes de microscopía electrónica de barrido a 1000X de películas comestibles AM-HY 1% a) corte transversal, b) corte longitudinal. La barra de escala corresponde a 10 µm.

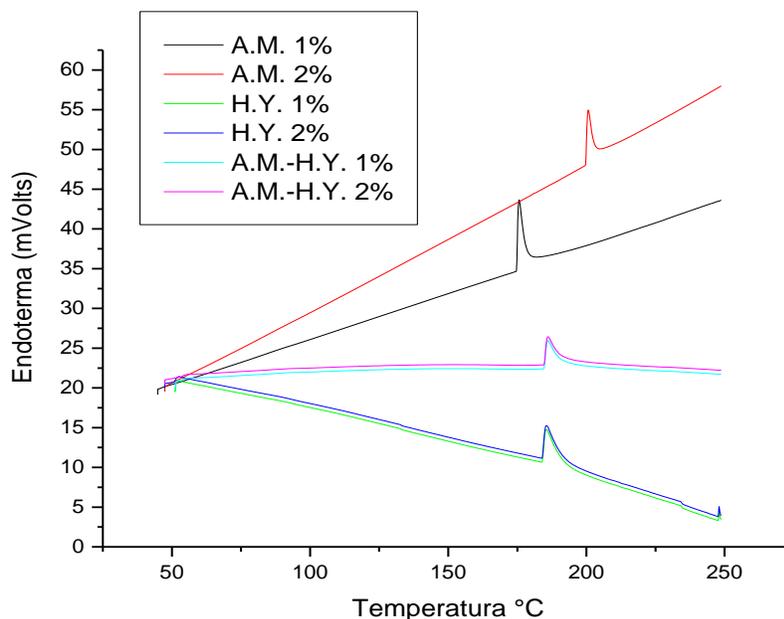


Figura 7. Termogramas de las diferentes formulaciones

3.7 Temperatura de fusión

Los termogramas obtenidos del DSC (Figura 7), no mostraron una transición vítrea o Tg en las PC. [30], indicando que es difícil detectar la transición vítrea en sistemas muy complejos, tales como gelatina-almidón-poliol-agua, en particular a bajos contenidos de humedad (<7%). Las PC de

AM 1 y 2%, HY 1% y AM-HY 1 y 2% no mostraron diferencia significativa en la temperatura de fusión (180 °C). Sin embargo, la formulación HY al 2% aumenta su temperatura de fusión a 200 °C debido al aumento de concentración. Esto es posible debido a la interacción de las cadenas poliméricas AM y HY y la albumina, expresando



Artículo de investigación

López-Ordaz et al., 2023

un incremento en la temperatura de transición térmica en la cual ocurre un cambio de sólido cristalino a líquido, provocando la movilidad de las moléculas. Las temperaturas de fusión obtenidas en PC elaboradas en la presente investigación, fueron similares a las reportadas por [12, 31], (180 a 220 °C).

4. Conclusiones

Las concentraciones de almidón y harina de yuca propuestas en esta investigación tuvieron efecto significativo en las propiedades fisicoquímicas, mecánicas, ópticas y microestructurales de las películas comestibles. La formulación de AM-HY 1%, en comparación de las demás formulaciones, presentó una menor permeabilidad al vapor de agua, así como, mayor esfuerzo y deformación a la punción, resistencia a la ruptura y porcentaje de elongación. Por otro lado, todas las PC propuestas muestran una buena interacción entre el almidón y la albumina. Por lo tanto, la PC AM-HY 1% podría aplicarse como recubrimiento para frutas y hortalizas. Con este trabajo se abre paso a investigaciones científicas futuras enfocadas a la conservación de alimentos.

5. Agradecimientos

Pedro López Ordaz y colaboradores agradecen a CONACyT y Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología del Instituto Politécnico Nacional (IPN) de México, así como, el apoyo económico brindado por CONACyT proyecto 2542765 en la estancia posdoctoral modalidad académica 2022. Así también, agradecemos a la Universidad Tecnológica de Tecámac y al Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec por la grata colaboración.

6. Referencias

[1] Wu, Y., Weller, C. L., Hamouz, F., Cuppett, S. L., & Schnepf, M. Development and application of multicomponent edible coatings and films: A review. *Adv. Food Nutr. Res.* 2002; 347-394.

[2] WU, Feng; Misra, Manjusri; Mohanty, Amar K. Challenges and new opportunities on barrier

performance of biodegradable polymers for sustainable packaging. *Prog. Polym. Sci.* 2021, vol. 117, p. 101395.

[3] Cui, C., Ji, N., Wang, Y., Xiong, L., & Sun, Q. Bioactive and intelligent starch-based films: A review. *Trends Food Sci Technol.* 2021; 116, 854-869.

[4] Ji, N., Ge, S., Li, M., Wang, Y., Xiong, L., Qiu, L., & Sun, Q. Effect of annealing on the structural and physicochemical properties of waxy rice starch nanoparticles: Effect of annealing on the properties of starch nanoparticles. *Food Chem.* 2019; 286, 17-21.

[5] Mali, Susana., Grossmann, E. M. Victoria., García, A. María., Martino, N. Martino y Zaritzky, E. Noemi. Microstructural characterization of yam starch films. *Carbohydr. Polym.* 2002; 50, 4, 379-386.

[6] Senturk Parreidt, T., Müller, K., & Schmid, M. Alginate-based edible films and coatings for food packaging applications. *Foods.* 2018; 7(10), 170.

[7] Pereda, Mariana., Amica, Guillermina. y Marcovich, E. Norma. Development and characterization of edible chitosan/olive oil emulsion films. *Carbohydr. Polym.* 2012; 87, 2, 1318-1325.

[8] Jangchud, A. y Chinnan, M.S. Peanut protein film as affected by drying temperature and pH of film forming solution. *J. Food Sci.* 1999; 64, 1, 53-157.

[9] G., Gornall., C. J., Bardawill., and M.M., David. Determination of serum proteins by means of the biuret reaction. *JBC.* 1949; 177, 751-766.

[10] Chen, H., Wang, J., Cheng, Y., Wang, C., Liu, H., Bian, H., ... & Han, W. Application of protein-based films and coatings for food packaging: A review. *Polymers*, 2019; 11(12), 2039.



Artículo de investigación

López-Ordaz et al., 2023

- [11] Salgado, R. Pablo., Fernández, B. Graciela., Drago, R. Silvina., and Mauri, N. Adriana. Addition of bovine plasma hydrolysates improves the antioxidant properties of soybean and sunflower protein-based films. *Food Hydrocoll.* 2011; 25, 6, 1433-1440.
- [12] Vieyra Ruiz, H., Martínez, E. S. M., & Méndez, M. A. A. Biodegradability of polyethylene starch blends prepared by extrusion and molded by injection: Evaluated by response surface methodology. *Starch-Stärke*, 2011; 63(1), 42-51.
- [13] Vázquez-Luna, A., Santiago, M., Rivadeneyra-Domínguez, E., & Díaz-Sobac, R. Edible films based on nanostructured starch as barrier material moisture. *CienciaUAT*, (2019). 13(2), 152-164
- [14] Turhan, K. N., & Sahbaz, F. Water vapor permeability, tensile properties and solubility of methylcellulose based edible films. *J. Food Eng.* 2004; 61(3), 459-466.
- [15] Salazar, V. M. S., Márquez, M. A. T., & Vargas, A. L. Propiedades físicas, mecánicas y de barrera de películas comestibles a base de mucílago de Nopal como alternativa para la aplicación en frutos. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*. 2015; 16(2), 193-198.
- [16] Noshirvani, N., Hong, W., Ghanbarzadeh, B., Fasihi, H., & Montazami, R. Study of cellulose nanocrystal doped starch-polyvinyl alcohol bionanocomposite films. *Int. J. Biol. Macromol.* 2018; 107, 2065–2074.
- [17] Li, J., Ye, F., Lei, L., & Zhao, G. Combined effects of octenyl succination and oregano essential oil on sweet potato starch films with an emphasis on water resistance. *Int. J. Biol. Macromol.* 2018; 115, 547–553.
- [18] Farajpour, R., Emam Djomeh, Z., Moeini, S., Tavakolipour, H., & Safayan, S. Structural and physico-mechanical properties of potato starch-olive oil edible films reinforced with zein nanoparticles. *Int. J. Biol. Macromol.* 2020; 149, 941–950.
- [19] Wang, K., Wang, W., Ye, R., Liu, A., Xiao, J., Liu, Y., & Zhao, Y. Mechanical properties and solubility in water of corn starch-collagen composite films: Effect of starch type and concentrations. *Food chem.* 2016; 216, 209-216.
- [20] Zhang, Y., & Han, J. H. Plasticization of pea starch films with monosaccharides and polyols. *J. Food Sci.* 2006; 71(6), E253-E261.
- [21] Mali, S., Grossmann, M. V. E., García, M. A., Martino, M. N., & Zaritzky, N. E. Antiplasticizing effect of glycerol and sorbitol on the properties of cassava starch films. *J. Food Technol.* 2008; 11(3): pp. 194- 200.
- [22] Aguilar-Méndez, M. A., Martín-Martínez, S., Espinoza-Herrera, N. L., Sánchez-Flores, M., Cruz-Orea, A., & Ramírez-Ortiz, M. E. Caracterización y aplicación de películas a base de gelatina-carboximetilcelulosa para la preservación de frutos de guayaba. *Superficies y vacío*. 2012; 25(1), 1-7.
- [23] Tapia-Blácido, D., Sobral, P. J., & Menegalli, F. C. Development and characterization of biofilms based on Amaranth flour (*Amaranthus caudatus*). *J. Food Eng.* 2005; 67(1-2), 215-223.
- [24] Sobral, P. D. A., Menegalli, F. C., Hubinger, M. D., & Roques, M. A. Mechanical, water vapor barrier and thermal properties of gelatin based edible films. *Food hydrocoll.* 2001; 15(4-6), 423-432.
- [25] Coughlan, K., Shaw, N. B., Kerry, J. F., & Kerry, J. P. Combined effects of proteins and polysaccharides on physical properties of whey protein concentrate-based edible films. *J. Food Sci.* 2004; 69(6), E271-E275.
- [26] Chang, Y. P., Abd Karim, A., & Seow, C. C. Interactive plasticizing-antiplasticizing effects of water and glycerol on the tensile properties of



Artículo de investigación

López-Ordaz et al., 2023

tapioca starch films. *Food Hydrocoll.* 2006; *20*(1), 1-8.

[27] Olu-Owolabi, B. I., Afolabi, T. A., & Adebowale, K. O. Pasting, thermal, hydration, and functional properties of annealed and heat-moisture treated starch of sword bean (*Canavalia gladiata*). *Int. J. Food Prop.* 2011; *14*(1), 157-174.

[28] Contreras-Pérez, R. K., De la Torre-Gutiérrez, L., González-Cortés, N., & Jiménez-Vera, R. Caracterización funcional de almidones de plátano cuadrado (*Musa balbisiana* Colla). *Eur. Sci. J.* 2018; *14*(30), 82-97.

[29] Aguilar-Méndez, M. A., Martín-Martínez, E. S., Ortega-Arroyo, L., & Cruz-Orea, A. Application of differential scanning calorimetry to evaluate thermal properties and study of microstructure of biodegradable films. *Int. J. Thermophys.* 2010; *31*, 595-600.

[30] Mendes, J. F., Paschoalin, R. T., Carmona, V. B., Neto, A. R. S., Marques, A. C. P., Marconcini, J. M., ... & Oliveira, J. E. Biodegradable polymer blends based on corn starch and thermoplastic chitosan processed by extrusion. *Carbohydr. Polym.* 2016; *137*, 452-458.

[31] Aguilar-Méndez, M. A., Martín-Martínez, E. S., Tomas, S. A., Cruz-Orea, A., & Jaime-Fonseca, M. R. Gelatine-starch films: Physicochemical properties and their application in extending the post-harvest shelf life of avocado (*Persea americana*). *J. Sci. Food Agric. J SCI FOOD AGR.* 2008; *88*(2), 185-193.