

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”

DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL



Formulación y caracterización parcial de películas biobasadas de almidón de fuente no convencional reforzadas con microfibras de celulosa como posible material de envase para alimentos

POR

ALEXIA DOMÍNGUEZ VILLARREAL

T E S I S

Presentada como requisito parcial para obtener el título profesional de

INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2022

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"
DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL**

Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos

Formulación y caracterización parcial de películas biobasadas de almidón de fuente no convencional reforzadas con microfibras de celulosa como posible material de envase para alimentos

T E S I S

Presentada por

ALEXIA DOMÍNGUEZ VILLARREAL

y que somete a consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para obtener el título profesional de

INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

A P R O B A D A

Dr. Francisco Hernández Centeno
Presidente

Dra. María Hernández González
Vocal

Dr. Haydeé Yajaira López De la Peña
Vocal

Dra. Dolores Gabriela Martínez Vázquez
Vocal suplente

Dr. Ricardo Vázquez Aldape
Coordinador Interno de la División de Ciencia Animal

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2022



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”
DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL**

Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos

Formulación y caracterización parcial de películas biobasadas de almidón de fuente no convencional reforzadas con microfibras de celulosa como posible material de envase para alimentos

T E S I S

Presentada por

ALEXIA DOMÍNGUEZ VILLARREAL

y que somete a consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para obtener el título profesional de

INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Fue dirigida por el siguiente comité:

Dr. Francisco Hernández Centeno
Director

Dr. Juan Manuel Tirado Gallegos
Director Externo

Dra. María Hernández González
Co-director

Dra. Haydeé Yajaira López De la Peña
Co-director

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2022

DEDICATORIAS

No tengo palabras para explicar la alegría que me hace el poder terminar esta etapa de mi vida, que no ha sido nada fácil, pero a la vez ha sido muy fructífera y llena de muchas alegrías, sin embargo, el amor, cariño, bondad y sobre todo el apoyo de ustedes ha hecho menos complicado el poder concluir esta etapa.

A mis padres Lorena Villarreal Aragón y Heber Hiram Domínguez Lara, por siempre apoyarme y alentarme a ser mejor persona, por enseñarme los valores y principios que me caracterizan, por siempre luchar conmigo por mis sueños y por ser los mejores padres que pude pedir.

A mi hermana Lorena Alitzel Domínguez Villarreal, por ser mi mayor ejemplo a seguir, por enseñarme a luchar por todo lo que queremos, por siempre estar y acompañarme no solo en esta etapa sino en toda mi vida.

Este logro no es solo mío, es todas esas personas que siempre estuvieron principalmente mi familia, gracias por guiarme por el buen camino, por todos los sacrificios que hicieron para que esto fuera posible.

AGRADECIMIENTOS

Especialmente a **Dios** que me guía todos los días de mi vida y que me permitió concluir esta etapa de mi vida

A mis padres **Lorena Villarreal Aragón** y **Heber Hiram Domínguez Lara**, que me apoyan incondicionalmente en cada decisión profesional y personal, y que me alientan cada día ser una mejor persona.

A mi hermana **Lorena Alitzel Domínguez Villarreal**, por ser mi más grande ejemplo y uno de mis pilares de vida, te agradezco que siempre estas y todo lo que he aprendido de ti.

A mi asesor **Doc. Francisco Hernández Centeno** por guiarme en esta etapa profesional y brindarme conocimiento como maestro y como asesor de esta investigación, agradezco su paciencia, dedicación y la confianza que me mostró en todo momento durante este proyecto.

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, por abrirme sus puertas y poder desarrollarme como profesionista en sus aulas.

A la **Dra. María Hernández González** y la **Dra. Haydeé Yajaira López De la Peña** por su ayuda y su colaboración en esta investigación y por todo el conocimiento y que aportaron para mi crecimiento académico como maestras de diferentes materias durante esta etapa.

A mis amigos **Daniela Ortegón, Mónica Alvarado, Alexia Carter, Alonso Prado** por su apoyo durante toda esta etapa, por las aventuras que vivimos estos últimos 5 años y sobre todo por demostrarme una amistad sincera.

A **Silvia González** y **Mayela Nieto** por abrirme las puertas de su casa y siempre tratarme como parte de su familia haciéndome sentir que estaba en mi hogar.

CONTENIDO

DEDICATORIAS	iv
AGRADECIMIENTOS	v
CONTENIDO	vi
INDICE DE FIGURAS	ix
INDICE DE TABLAS	xi
RESÚMEN	xii
1. INTRODUCCIÓN	13
2. JUSTIFICACIÓN	14
3. HIPÓTESIS	15
4. OBJETIVOS	16
4.1. General.	16
4.2. Específicos.	16
5. REVISIÓN DE LITERATURA	17
5.1. El uso de plásticos derivados del petróleo y la problemática que han generado 17	
5.2. Los plásticos en el envasado de alimentos	20
5.2.1. Ventajas.....	20
5.2.2. Desventajas.....	21
5.3. Alternativas al uso de plásticos derivados del petróleo	21
5.3.1. Biopolímeros.....	22
5.3.1.1. Quitosano	23
5.3.1.2. Almidón	24
5.3.1.3. Proteínas	24
5.3.2. Ventajas del uso de biopolímeros como sustituto de los plásticos	25
5.3.3. Desventajas del uso de biopolímeros como sustituto de los plásticos.....	26
5.4. Propiedades físicas para considerar en la confección de películas biobasadas.....	27
5.4.1. Propiedades mecánicas	27
5.4.1.1. Módulo de elasticidad (M.E.)	27
5.4.1.2. Tensión a la fractura (T.F.)	28
5.4.1.3. % de elongación (% E)	29

5.4.2.	Propiedades estructurales	30
5.4.2.1.	% de cristalinidad aparente	30
5.4.2.2.	Estabilidad frente a la humedad (solubilidad).....	31
5.4.3.	Propiedades ópticas	31
5.4.3.1.	Color.....	31
5.4.3.2.	Transparencia u opacidad	32
5.4.4.	Propiedades de permeabilidad	32
5.4.4.1.	Permeabilidad al vapor de agua (PVA)	32
6.	MATERIALES Y MÉTODOS	35
6.1.	Formulación de películas	35
6.2.	Color e índice de amarillamiento (YI)	36
6.3.	Determinación de grosor	36
6.4.	Determinación de opacidad.....	36
6.5.	Determinación de solubilidad	37
6.6.	Determinación de la inclusión del AEO en las películas por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR/ATR).....	37
6.7.	Determinación de índice de cristalinidad aparente.....	38
6.8.	Determinación de índice de afinidad al agua	38
6.9.	Evaluación de las propiedades mecánicas y de permeabilidad al vapor de agua (PVA)38	
6.10.	Análisis estadístico.....	40
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
7.1.	Formulación de películas	41
7.2.	Caracterización morfológica.....	42
7.3.	Propiedades ópticas.....	43
7.3.1.	Color (CIE $L^*a^*b^*$).....	43
7.3.2.	Diferencia de color ($^*\Delta E$)	45
7.3.3.	Índice de amarillamiento (YI)	47
7.3.4.	Opacidad	48
7.4.	Grosor	49
7.5.	Solubilidad.....	50
7.6.	Caracterización químico-estructural por FTIR/ATR.....	51
7.6.1.	FTIR.....	52
7.6.2.	Índice de cristalinidad aparente	55

7.6.3. Índice de afinidad al agua.....	56
7.7. Propiedades mecánicas y de barrera.....	57
7.7.1. Tensión a la fractura (TF)	57
7.7.2. Porcentaje de elongación (%E)	58
7.7.3. Permeabilidad al vapor de agua (PVA).....	60
8. CONCLUSIONES	62
9. LITERATURA CITADA	63

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Película obtenida a partir de almidón de maíz y 0.05 % de microfibra de lechuguilla (<i>A. lechuguilla</i> Torr.). Imagen obtenida sobre un fondo de flaca de acero inoxidable.	41
Figura 2. Micrografías de películas en orden de % de concentración de microfibra de lechuguilla con almidón de maíz y con almidón de raíz de calabacilla loca, obtenidas mediante MOLT a 40X.	42
Figura 3. Luminosidad (L^*) de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).....	44
Figura 4. Luminosidad (a^* y b^*) de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).	45
Figura 5. Diferencia de color (ΔE) de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).	46
Figura 6. Índice de amarillamiento (YI) de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).	47
Figura 7. Opacidad de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).....	48
Figura 8. Grosor de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).....	49
Figura 9. Porcentaje de solubilidad de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).	51
Figura 11. Espectrogramas IR de los materiales obtenidos de los tratamientos donde de utilizó almidón de raíz de calabacilla loca.	54
Figura 12. Valores del índice de cristalinidad aparente de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).....	55
Figura 13. Valores del índice de afinidad al agua de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).....	56
Figura 14. Valores de tensión a la fractura (TF) de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).....	58
Figura 15. Valores de porcentaje de elongación (%E) de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).....	59

Figura 16. Valores de permeabilidad al vapor de agua (PVA) de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).....61

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tratamientos de formulación de soluciones filmogénicas.	35
--	-----------

RESÚMEN

La problemática originada por el uso indiscriminado de plásticos sintéticos y el impacto ambiental que la ha acompañado han hecho necesaria la búsqueda de materiales de origen orgánico que puedan ser útiles en las mismas aplicaciones, hecho que no se ha alcanzado debido a las mejores propiedades mecánicas y de barrera de los primeros, lo que también es parte del origen de la problemática que causan. El desarrollo de materiales plásticos de origen biológico se ha enriquecido con la formulación de dos o más materiales, con la pretensión de mejorar las características tecnológicas de los polímeros resultantes. Para el presente trabajo se llevaron a cabo una serie de combinaciones de almidón de maíz y de raíz de calabacilla loca con diferentes concentraciones de microfibras de celulosa de lechuguilla (0.01, 0.05, 0.10, 0.25, 0.50, 0.75 y 1.0%), con el propósito de que se funcionara como agente de refuerzo. Las películas se elaboraron por método de casting. Una vez secas, se acondicionaron a $55 \pm 5\%$ de HR, y se llevó a cabo su caracterización morfológica, óptica, física, químico-estructural, mecánica y de barrera al vapor de agua. Las micrografías revelaron una distribución heterogénea de las microfibras de celulosa, su luminosidad parece depender de la cantidad de fibra presente, así como su índice de amarillamiento y la opacidad que presentan. La solubilidad de las películas parece afectarse de acuerdo con el contenido de microfibras, disminuyendo al utilizar las concentraciones más bajas y aumentando en las más altas. En cuanto a la caracterización químico-estructural, se reveló la presencia de enlaces típicos para almidón y celulosa en las bandas de alrededor de 3500, 2900, 1600, 1000 y 995 cm^{-1} ; el índice de cristalinidad aparente parece no estar relacionado con la cantidad de microfibras de celulosa, pero la afinidad por el agua, sí. Las propiedades mecánicas resultaron afectadas con la concentración de microfibras de celulosa, la tensión a la fractura fue mayor para la concentración de 0.10% para las películas de ambos almidones, una concentración mayor pareció no tener un efecto positivo en el refuerzo de las películas, y el % de elasticidad fue el menor para las mismas películas que presentaron los mejores valores de tensión a la fractura. En cuanto a la permeabilidad al vapor de agua, la relación parece ser de tendencia directamente proporcional al aumento del % de microfibras en las películas.

Palabras clave: biopolímeros, cristalinidad, FTIR/ATR, mecánicas, PVA

1. INTRODUCCIÓN

El impacto ambiental generado por el uso indiscriminado de materiales plásticos derivados del petróleo es una problemática que ha alcanzado casi cada rincón de nuestro planeta, debido a su extremadamente lenta biodegradabilidad. La dependencia de estos materiales por parte de la industria en general ha llevado que una parte importante de los desechos sólidos sean precisamente residuos conformados por alguno de los tipos de plástico que se producen.

La industria alimentaria, desde luego, no es ajena a esta problemática, ya que la gran mayoría de envases utilizados para preservar las características de los alimentos producidos, desde la cosecha hasta la elaboración de los productos más refinados, son precisamente de este tipo de materiales.

No son pocos los esfuerzos que se han realizado a lo largo de las últimas décadas para intentar paliar esta problemática, y se ha recurrido a la formulación de materiales basados en materiales orgánicos que permitan obtener materiales lo más parecidos a los plásticos que se utilizan para diversas aplicaciones industriales, comerciales y domésticas, encontrándose hasta ahora que ninguno ha conseguido igualar las propiedades mecánicas y de barrera que poseen los plásticos sintéticos.

Por ello, es necesario seguir desarrollando esfuerzos dirigidos a la formulación y modificación de dichos materiales de origen natural, sin dejar de lado la combinación de ellos, por lo que en el presente trabajo se echó mano de dos materias primas naturales de las más abundantes: el almidón y la celulosa, para la formulación de biocomposito con propiedades distintas a las del polímero de almidón termoplastificado, con la esperanza de que resulte útil para diversas aplicaciones industriales y comerciales.

2. JUSTIFICACIÓN

La problemática derivada de la contaminación por plásticos se ha vuelto imperativa de atender, puesto que ha generado un importante impacto ambiental, deteriorando los hábitats de muchas especies a lo largo y ancho del planeta.

Diversos recursos naturales se han empleado en la elaboración de polímeros plásticos de origen biológico, y se han obtenido de distintas fuentes animales, vegetales y hasta micóticas y del reino monera, tales como el quitosano, la seda, proteínas, la celulosa y los almidones, siendo estos últimos los biopolímeros más abundantes en la naturaleza que son susceptibles de aprovechamiento para generar nuevos materiales plásticos que han encontrado diversas aplicaciones al ser útiles en la elaboración de materiales plásticos utilizando uno o más materiales biopoliméricos para mejorar sus características tecnológicas en general.

Dentro de ese abanico de fuentes de biopolímeros, las raíces de calabacilla loca (*Cucurbita foetidissima* Kunth) y las fibras de lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr.) son dos plantas cuya explotación pudiera adecuarse para ser sustentable, acarreando beneficios no solo en el sentido de generar un material orgánico susceptible de usarse en diversas aplicaciones industriales y comerciales, sino también como una posible fuente de ingreso para las comunidades rurales asentadas en zonas geográficas poco favorecidas para la producción agrícola convencional.

Es necesario, sin embargo, la evaluación de estos materiales plásticos de origen biológico para explorar las posibles aplicaciones de acuerdo con las propiedades mecánicas, de barrera y ópticas que posean.

3. HIPÓTESIS

H₀: La inclusión de microfibras de lechuguilla (*A. lechuguilla* Torr.) refuerza la estructura matricial de las películas biobasadas de almidón termoplástico de raíz de calabacilla loca (*C. fotidissima* Kunth), favoreciendo principalmente el mejoramiento de sus propiedades mecánicas y de barrera al vapor de agua.

H_a: La inclusión de microfibras de lechuguilla (*A. lechuguilla* Torr.) no presenta efectos en la estructura matricial de las películas biobasadas de almidón termoplástico de raíz de calabacilla loca (*C. fotidissima* Kunth).

4. OBJETIVOS

4.1. General.

Formular compositos biobasados en almidón termoplástico de raíz de calabacilla loca (*C. foetidissima* Kunth) y diferentes concentraciones de microfibras de lechuguilla (*A. lechuguilla* Torr.) con la finalidad de obtener un material con mejoras en las propiedades mecánicas y de permeabilidad, respecto a películas biobasadas de almidón termoplástico solo, que pudieran ser útiles como material de envasado de alimentos.

4.2. Específicos.

- 4.2.1. Obtener almidón termoplástico a partir de almidón aislado de la raíz de calabacilla loca (*C. foetidissima* Kunth).
- 4.2.2. Obtener microfibras de celulosa a partir de pencas de lechuguilla (*A. lechuguilla* Torr.).
- 4.2.3. Formular soluciones filmogénicas a partir de diferentes proporciones de almidón termoplástico y microfibras.
- 4.2.4. Obtener películas biobasadas y acondicionarlas según normas ASTM.
- 4.2.5. Evaluar las propiedades mecánicas de las películas biobasadas compuestas y acondicionadas (caracterización microscópica, color, opacidad, grosor, solubilidad, estructura química, % de cristalinidad aparente, afinidad al agua, tensión a la fractura, % de elongación y permeabilidad al vapor de agua).

5. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1. El uso de plásticos derivados del petróleo y la problemática que han generado

Actualmente, las cosas se hacen para durar poco y desechar fácilmente. La industrialización, la producción y distribución en masa genero más productos y más residuos. El crecimiento de los mercados para algunos productos requirió del continuo desecho de estos, por lo que, el crecimiento económico del XXI fue impulsado por la basura. El plástico se ajustó perfectamente a esta transformación cultural hacia el desecho. Gracias a su bajo costo ha sido posible el éxito de productos diseñados para desechar. Cada vez son más los productos hechos con plástico. Estos productos han cambiado hábitos, siendo posible botar los platos en vez de lavarlos. El plástico ha brindado la posibilidad de hacer menos esfuerzo, facilitando algunas actividades de la vida diaria.

El plástico contribuye a una vida más practica y eficiente, pero no significa ahorro total de material y energía. Lo que se ahorra en una unidad de producto, se termina generando en la cantidad total producida. Es claro que el plástico contribuye a mejorar la comodidad y bienestar de la sociedad actual, sin embargo, la cantidad de residuos generados plantea un reto ambiental.

Los plásticos son toda una familia de materiales con diversos usos. Sus propiedades les permiten ser moldeados en infinidad de formas, generando miles de productos. El plástico ha remplazado otros materiales, por su bajo costo, su poco peso, permeabilidad, durabilidad e higiene. En su mayoría, el plástico proviene del petróleo y se estima que entre un 5% y un 7% de la producción mundial de este recurso, es destinado a la

producción de este material. Para producir un kilo de plástico se requieren dos kilos de petróleo.

El plástico es un material inorgánico que tiene alta durabilidad. Se calcula que puede tardar entre 100 y 1000 años para degradarse dependiendo del tipo de plásticos.

Los plásticos son muy útiles y diversos, sin embargo, los residuos plásticos generan diferentes impactos ambientales. La preocupación ambiental por los residuos plásticos es creciente. Gira en torno a cuatro elementos fundamentales: la degradación lenta de los plásticos; la producción de diferentes productos plásticos es creciente, al igual que la generación de residuos; su principal materia prima es no renovable, el petróleo; y algunos de los químicos utilizados para producir los plásticos son tóxicos.

A nivel mundial el principal impacto ambiental de los residuos plásticos es la contaminación de los océanos y mares. Es un impacto acumulativo que se presenta a largo plazo y cubre gran cantidad de espacios de todo el planeta. Se han encontrados cantidades substanciales de residuos plásticos contaminando los hábitats marinos desde los polos hasta el ecuador, desde costas remotas inhabitadas hasta costas altamente pobladas y áreas profundas del océano. El bajo peso del plástico es una de las ventajas en las etapas de distribución y consumo del producto plástico, se convierte en una problemática ambiental cuando los residuos plásticos navegan por corrientes subterráneas, ríos, mares y océanos.

La presencia de los residuos plásticos representa una amenaza para la biodiversidad marina. Los animales se enredan con estos, y pueden resultar heridos, inmóviles o muertos. Los residuos plásticos se acumulan de manera que el con el movimiento de las olas golpean los corales y los fracturan. Los plásticos se terminan fragmentando en el

ambiente y como consecuencia pueden ser ingeridos por diferentes especies que los confunden con comida. Esto puede significar la muerte instantáneamente por ahogamiento o afectar internamente el organismo del animal. Además, hay una alta posibilidad que los plásticos pueden transportar y liberar contaminantes, al ambiente y a la vida animal.

Se han desarrollado a nivel mundial diferentes técnicas para reciclar los residuos plásticos, disminuyendo sus impactos negativos y la demanda de material primas vírgenes. Aunque, hay que recordar que el reciclaje de plásticos tiene restricciones, por lo que, no es la única solución para el problema ambiental.

Dentro de las ilimitaciones se encuentran que no todos los plásticos son reciclables. No solo los elastómeros y los termorígidos presentan restricción, incluso los termoplásticos pueden no ser reciclados si están tan contaminados que es más costoso limpiarlos que botarlos.

Ningún producto elaborado con plástico recuperado puede tener contacto directo con alimentos de consumo humano o medicamentos, a diferencia de los envases de vidrio y de metal pos-consumo reciclados, que pueden ser usados nuevamente para la fabricación de envases de contacto directo con alimentos. Adicionalmente, el plástico reciclado va perdiendo las propiedades iniciales, por lo que es un proceso finito y dependiendo el tipo de plástico tendrá un límite de veces que puede ser reciclado.

A nivel mundial, la industria ha desarrollado diferentes tecnologías y alternativas para que el plástico acelere su proceso de degradación y se biodegraden. La biodegradación consiste en degradar un material con hongos, bacterias y otros microorganismos, para obtener dióxido de carbono, metano, compuestos inorgánicos, agua y biomasa.

Existen otro tipo de plásticos llamados bioplásticos. Estos en vez de venir del petróleo, son obtenidos de recursos renovables, como la celulosa o almidón del maíz, del trigo o de la patata.

Y aunque a nivel mundial la industria se esfuerza por encontrar la solución para la degradación, para algunos la biodegradación no es la solución. El lograr los residuos plásticos se biodegraden en los rellenos generaría más gases efecto invernadero, lo que afectaría el cambio climático. Además, no hay certeza de cómo se liberarían las dioxinas que contienen algunos de los plásticos y son causantes de cáncer, por lo que preocupa el hecho que se creen nuevos problemas ambientales.

5.2. Los plásticos en el envasado de alimentos

5.2.1. Ventajas

La utilización de plásticos en el envasado de alimentos y bebidas ha aumentado de forma importante en las últimas décadas. El consumo mundial de plásticos en 1990 se situaba en 85 Mt y llegó a 299 Mt en el año de 2013. Las ventajas de este aumento son:

- El coste inferior al de otros materiales.
- El amplio rango de propiedades.
- La variedad de formas y figuras.
- La fácil eliminación después de su uso.
- Capacidad de amortiguación por lo que protege al alimento de posibles impactos (López-Heras, 2016).

5.2.2. Desventajas

Entre sus desventajas se incluye que tienen una alta permeabilidad a la luz y al calor, por lo que no se recomienda exponerlos a estos dos factores de manera directa. Además, a pesar de ser el material más utilizado para elaborar envases, ya que los costes productivos son escasos, no es uno de los más efectivos, pues el plástico no es biodegradable (Fusalba, 2014)

De la misma forma, la utilización del petróleo como materia prima para la producción de plásticos genera problemas ambientales, entre ellos, la emisión de gases de invernadero (metano, óxido nitroso y bióxido de carbono). Además, una cantidad importante de petróleo, recurso muy valioso y no renovable, está destinado a la producción de plásticos (Hernández-Silva y Guzmán-Martínez, 2009).

5.3. Alternativas al uso de plásticos derivados del petróleo

Al producirse un aumento en el precio del petróleo, se ha tomado mayor conciencia de que las reservas se están agotando de manera alarmante. Las estimaciones varían mucho, ya que la información que suministran los países que tienen reservas de petróleo no siempre es confiable, pero lo más probable es que comiencen a agotarse en las próximas décadas. Ante esta perspectiva, las investigaciones que involucran a los plásticos obtenidos de otras fuentes han tomado un nuevo impulso, y los polihidroxicanoatos aparecen como una alternativa altamente prometedora. Por otro lado, los residuos plásticos se acumulan en grandes cantidades y su degradación es lenta. En un estudio reciente publicado en la revista "Science" se observó que hay partículas de plástico presentes en los mares de todo el mundo. El reciclado de los plásticos aliviaría un poco la situación, pero sólo en parte. Por este motivo, el reemplazo

de los plásticos no degradables por biopolímeros totalmente degradables obtenidos a partir de fuentes de carbono renovables sería una solución mucho más completa para los diferentes aspectos de este problema (Almeida, 2004).

Se han realizado numerosos estudios para valorar algunos materiales alternativos, surgiendo el concepto de plástico biodegradable, asociado al uso de materias primas renovables que ofrecen un buen control en el medio ambiente después de varios usos, propiedades y coste similar a los plásticos convencionales y que se degradan más rápidamente en el vertedero, atenuando así los problemas de contaminación (Hernández-Silva y Guzmán-Martínez, 2009).

5.3.1. Biopolímeros

Un biopolímero es una macromolécula que es sintetizada mediante algún proceso biológico. En este sentido las proteínas, el ADN y los polisacáridos son los biopolímeros más importantes (García-Garibay, 1993).

Los biopolímeros pueden ser hidrolizados tanto por medios químicos como enzimáticos. Su biosíntesis por simple deshidratación es termodinámicamente desfavorable. La síntesis neta de todos los polímeros se realiza por lo tanto mediante una activación química preliminar del monómero. Tal activación requiere un gasto de ATP e implica la unión de monómero a una molécula transportadora. Luego tiene lugar la polimerización a la cadena del polímero en crecimiento, reacción que es termodinámicamente favorable (Roger y Stainer, 1996).

Este polímero natural genera películas de consistencia y transparencia similares a los plásticos de origen petroquímico, sin embargo, sus propiedades mecánicas y de barrera no son adecuadas para su inserción en el mercado de los empaques. Se ha propuesto

dos estrategias enfocadas a mejorar las propiedades del material; la primera consiste en el uso de mezclas de almidón con otros polímeros de origen natural, como la gelatina, el quitosano o la celulosa, así como el uso de aditivos capaces de mejorar su flexibilidad y resistencia al agua; la segunda estrategia consiste en la utilización de almidones modificados químicamente a través de procesos de hidrólisis, sustitución y reticulación. Mientras que los materiales basados en almidón nativo son frágiles, quebradizos, poco extensibles y lábiles ante agua, sus compositos y los materiales basados en almidón modificado químicamente generan productos resistentes, flexibles, y con buena resistencia ante la humedad (Granda-Rueda, 2021).

5.3.1.1. Quitosano

El quitosano (polisacárido de alto peso molecular), obtenido por desacetilación parcial de la quitina (polímero natural de N-acetil-D-glucosamina), tiene propiedades particulares muy importantes por ser el único polielectrolito catiónico. Es soluble en ácidos orgánicos diluidos, gelificando y coagulando en medio débilmente ácido o neutro.

Presenta la capacidad de preservar alimentos durante mayor tiempo, debido principalmente a su capacidad para formar filmes semipermeables al O₂ y al CO₂ y a sus propiedades biológicas ya que, a diferencia de otros materiales usados para cubrir frutas, ha demostrado ser antifúngico. Además, presenta la ventaja de ser inocuo, un recurso renovable y biodegradable (Rodríguez, s.f.)

El quitosano es un hetero polisacárido que se encuentra en casi un tercio del total de la pared celular de algunos hongos, sin embargo, su principal fuente de obtención es mediante la desacetilación alcalina de la quitina, es decir, la pérdida del grupo acetilo del

grupo amida del carbono 2. El quitosano tiene muchas propiedades específicas tales como la actividad antimicrobiana, no toxicidad y la afinidad notable a las proteínas.

El quitosano es un potente agente viscosante, soluble en medio ácido debido a la protonación de la multitud de grupos amino presentes en su estructura, lo cual produce un aumento en la polaridad y repulsiones electroestáticas. La viscosidad de las soluciones aumenta al incrementar la concentración del quitosano, mientras que disminuye al elevar la temperatura y el grado de desacetilación (Zamudio- Castellanos *et al.*, 2014).

5.3.1.2. Almidón

El almidón es una mezcla de polímeros de α -glucosa. Esta constituido esencialmente por amilosa que es un polímero de cadena lineal (no ramificada) de α -glucosa que contiene, por término medio, 200 unidades de glucosa. El almidón se despolimeriza en el aparato digestivo en una serie de etapas catalizadas por enzimas (Gillespie, 1988).

Los almidones nativos y modificados han recibido considerable atención para la formulación de películas biodegradables debido a su naturaleza completamente biodegradable, característica comestible y bajo costo, no obstante, las películas elaboradas solamente con almidón poseen poca resistencia al agua, propiedades mecánicas y actividad antimicrobiana (Oropeza-González, 2016).

5.3.1.3. Proteínas

Las proteínas y los ácidos nucleicos son biopolímeros compuestos por subunidades (monómeros) unidas entre sí por enlaces que son característicos de cada clase de macromolécula. Las subunidades de todos los biopolímeros pueden quedar en una forma

libre mediante hidrólisis. Por esto, la biosíntesis de biopolímeros implica la unión de subunidades a través de reacciones que, en sentido químico formal, son lo contrario de una hidrólisis: es decir, una deshidratación (Roger y Stainer, 1996).

5.3.2. Ventajas del uso de biopolímeros como sustituto de los plásticos

Los polímeros sintéticos están siendo gradualmente reemplazados por materiales biodegradables específicamente de fuentes naturales en algunas aplicaciones a nivel agrícola e industrial. El uso de tales biopolímeros abre un gran potencial económico y benéfico en el área de los empaques, dada la similitud de los materiales naturales con los sintéticos por sus excelentes propiedades mecánicas, de barrera y transmisión de luz (Villada *et al.*, 2007).

Todas las evidencias, una cuenta de la necesidad de investigar y anticiparse al futuro reemplazo del plástico, además de poder proteger un sector industrial. Los biopolímeros representan una solución desde el origen del problema. Los biopolímeros basados en almidón constituyen una clasificación sobre la cual se ha realizado bastante investigación y mezcla con poliésteres alifáticos mejoran su procesabilidad y biodegradabilidad. En estudios posteriores se evaluó el grado y velocidad de biodegradación de sistemas de poliuretano/almidón, en función de su densidad de entrecruzamiento, utilizando como medios degradativos suelo enriquecido y cultivos de microorganismos extraídos del mismo. Se encontró que los poliuretanos sintetizados de polioles, resultado de la incorporación física del almidón, fueron más susceptibles al ataque microbiano, debido a que los gránulos de almidón de la estructura se degradan más fácilmente a causa de los microorganismos. El almidón es un polímero con gran potencial de utilización en la

síntesis de materiales biodegradables con lo cual representa una excelente alternativa de sustitución y/o incorporación al material plástico convencional utilizado en el rubro.

La celulosa es una opción que también se ha estado explorando y los polímeros basados en ella se producen mediante modificación química de celulosa natural (Moises, s.f.).

A su vez disminuyen los desechos de envasado. Un alimento al cual se aplican un recubrimiento comestible requiere de embalajes más simples. Pueden ser ingeridos por los consumidores. Regulan el intercambio de O₂, CO₂, y de vapor de agua, mejoran las propiedades mecánicas y preservan la textura. Prolongan la vida útil de alimentos mínimamente procesados a través del control sobre el desarrollo de microorganismos y de los cambios fisicoquímicos y fisiológicos, pueden mejorar las características nutricionales y organolépticas. Pueden regular condiciones de interfase o superficiales del alimento a través del agregado de aditivos como antioxidantes, agentes antimicrobianos, nutrientes (Zamudio- Castellanos *et al.*, 2014).

5.3.3. Desventajas del uso de biopolímeros como sustituto de los plásticos

Los desafíos para los investigadores y la industria del empaque en términos de producir mezclas a base de almidón y que a su vez se presentan como desventajas son: superar los problemas de miscibilidad con altos contenidos de almidón, Evitar el deterioro de las propiedades mecánicas con altos contenidos de almidón, incluso en mezclas compatibilizadas, Reducción de costos, especialmente para mezclas biodegradables de almidón y poliéster con bajo contenido de almidón ($\leq 30\%$ en peso) (Gadhav *et al.*, 2018).

5.4. Propiedades físicas para considerar en la confección de películas biobasadas

5.4.1. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de los RC dependen del tipo de material empleado en su elaboración y especialmente de su grado de cohesión, es decir, la habilidad del polímero para formar puentes moleculares numerosos y estables entre cadenas poliméricas, los cuales impiden su separación. Es útil conocer las propiedades mecánicas, tales como la resistencia a la tracción, la elongación, y la elasticidad, que pueden ser medidas por el estiramiento de una película a su punto de ruptura por punción o por medición de la deformación utilizando un texturómetro (Zamudio- Castellanos *et al.*, 2014).

5.4.1.1. Módulo de elasticidad (M.E.)

Para un material determinado el cociente tensión / deformación es constante y se denomina módulo de elasticidad. Existen tres módulos de elasticidad correspondientes a los tres tipos de deformación.

Módulo de Young, que se utiliza para deformaciones lineales, se designa con la letra *E* y viene definido por

$$E = \frac{\textit{tensión normal}}{\textit{deformación lineal}}$$

Módulo de cizallamiento (o módulo de rigidez) es el módulo que corresponde a la deformación de cizallamiento o corte, viene designado por *G* y se define como

$$G = \frac{\textit{tensión tangencial}}{\textit{deformación de corte}}$$

Módulo de volumen, que corresponde a la deformación volumétrica; se designa por K y viene dado por

$$K = \frac{\textit{tensión normal}}{\textit{deformación volumetrica}}$$

Las tres unidades de los tres módulos son las mismas que la de la tensión, puesto que la deformación carece de unidades (es decir, N m^{-2}) (Mcb Collieu, 1977).

5.4.1.2. Tensión a la fractura (T.F.)

La fractura está definida como una desintegración parcial del material por esfuerzo de la formación de una nueva superficie dentro de un cuerpo. La fractura es sinónima de rotura o de la acción de quebrar, pero no de falla. Para que ocurra la fractura, generalmente es necesario que una muestra este sujeta a cargas mecánicas, que se deforme (visco elásticamente), y que el desarrollo de algún daño conduzca a la desintegración del material.

La tensión a fractura mide la deformación (alargamiento) entre dos puntos fijos de la misma a medida que se incrementa la carga aplicada, y se representa gráficamente en función a la tensión.

La unidad es el Pascal ($\text{Pa} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$), los plásticos sin plastificar ni llevar fibras muestran desde 14 a 140 MPa.

El proceso de fractura consiste como mínimo en dos etapas. La primera, iniciación o activación de defectos, no existe un crecimiento de grieta visible. La segunda etapa, una zona deformada o una grieta inician su crecimiento y la velocidad de este crecimiento de grieta muy a menudo se incrementa considerablemente. La rotura final de la muestra de

una manera inestable por una propagación rápida de la grieta (Acosta-Sullcahuamán, 2001).

5.4.1.3. % de elongación (% E)

La elongación es un tipo de deformación. La deformación es simplemente el cambio en la forma que experimenta cualquier material bajo tensión, cuando se habla de tensión, la muestra se deforma ya sea por estiramiento, a esto le llamamos elongación.

Hablamos de porcentaje de elongación, a lo largo de la muestra después del estiramiento (L), dividido por el largo original (L₀) y multiplicado por 100.

$$\frac{L}{L_0} \times 100 = \% \text{ elongación}$$

Existen muchas cosas relacionadas con la elongación, que dependen del tipo de material que se está estudiando. Dos mediciones importantes son la *elongación final* y la *elongación elástica*.

La elongación final es crucial para todo tipo de material, ya que representa cuanto puede ser estirada una muestra antes de que se rompa. La elongación elástica es el porcentaje de elongación al que se puede llegar, sin una deformación permanente en la muestra. Es decir, cuanto puede ser estirada logrando que ésta vuelva a su longitud original luego de suspender la tensión (Jang, 1994).

5.4.2. Propiedades estructurales

5.4.2.1. % de cristalinidad aparente

La cristalinidad se refiere al grado de orden estructural de un sólido. Las propiedades de los plásticos están influenciadas significativamente por su grado de cristalización, cuanto mayor sea el grado de cristalización, más rígida y resistente.

El porcentaje de cristalización está influenciado por la estructura y el historial térmico, como las condiciones de enfriamiento durante el procesado o el post tratamiento térmico.

El porcentaje de cristalinidad tiene una influencia significativa en la dureza, densidad, transparencia y difusión.

Sin embargo, las propiedades no están determinadas solo por el porcentaje de cristalinidad, sino también por el tamaño de las unidades estructurales o la orientación molecular.

El grado de cristalinidad de un determinado influye decisivamente en sus propiedades mecánicas, ya que el grado de cristalinidad influye en la cantidad de enlaces secundarios intermoleculares presentes. En las regiones cristalinas, donde las cadenas moleculares están empaquetadas y dispuestas ordenadas y paralelamente, suele haber enlaces secundarios entre segmentos de cadenas adyacentes. Estos enlaces secundarios son mucho menos numerosos en las regiones amorfas, donde las cadenas están desalineadas. Así, el aumento de la cristalinidad de un determinado polímero mejora generalmente las propiedades mecánicas (Callister, 1996).

5.4.2.2. Estabilidad frente a la humedad (solubilidad)

Las películas comestibles permiten el control de la transferencia de masa en el alimento, esta depende de un parámetro extrínseco, el diferencial de actividad de agua, y en dos parámetros intrínsecos, coeficiente de solubilidad (S), que se representa la afinidad de productos para el agua y el coeficiente de difusividad (D), que se ocupa de la movilidad del agua (cinética) en el sistema (Zamudio- Castellanos *et al.*, 2014).

5.4.3. Propiedades ópticas

Las propiedades ópticas se relacionan con la interrelación entre un material y las radiaciones electromagnéticas en forma de ondas o partículas de energía, como fotones. Estas radiaciones pueden tener características que entren en nuestro espectro de luz visible, o ser invisibles para el ojo humano.

Los componentes reflejados son las que determinan el color de que percibimos. Si refleja todos es blanco y si las absorbe todas es negro.

5.4.3.1. Color

El primero de los aspectos para considerar en relación con el color es aquel según el cual sin luz no existe la posibilidad de percibir el color (Lozano, 207).

La percepción del color de un objeto no depende solo de la luz que nos llega al ojo procedente del propio objeto (producto de la reflectancia por el iluminante), sino que, en general, depende de la luz que recibimos del objeto y de su entorno (Artigas, 2002).

El color con que percibimos un objeto depende del tipo de luz que le enviamos y de los colores que este sea capaz de reflejar.

5.4.3.2. Transparencia u opacidad

La transparencia es la cualidad de transparente de un objeto. Puede decirse que un cuerpo presenta transparencia cuando deja pasar la luz.

La transparencia, por lo tanto, es una propiedad óptica de la materia con diversos grados. Suele considerarse que un material es transparente cuando cumple con las propiedades a la luz visible, ya que con diversas aplicaciones técnicas (como la luz ultravioleta, la radiación infrarroja o los rayos X) la mayoría de los materiales exhibe transparencia.

5.4.4. Propiedades de permeabilidad

5.4.4.1. Permeabilidad al vapor de agua (PVA)

La permeabilidad es el mecanismo por el cual un gas migra a través de una barrera continua, por ejemplo, la piel de un globo, una burbuja o una bolsa de plástico sellada. El término permeabilidad se utiliza a menudo cuando la película es heterogénea y el espesor no es conocido. La permeabilidad al vapor de agua se mide normalmente usando un gradiente de humedad relativa de 100% a 0%. Todo esto se puede hacer a diversas temperaturas.

La permeabilidad al vapor de agua (PVA) y permeabilidad al oxígeno (PO) son las propiedades de barrera que normalmente determinan la capacidad de la película comestible para proteger el producto alimenticio desde el medio ambiente. Tanto las propiedades de barrera como las propiedades mecánicas dependen de la composición de la película y la estructura (Zamudio- Castellanos *et al.*, 2014).

La permeabilidad se expresa generalmente como el producto de la difusividad por la solubilidad. Los medios principales para reducir el flujo de masa descansan en el control de estos dos parámetros.

La composición y estructura de las películas comestibles afectan el mecanismo de transferencia de agua y el oxígeno principalmente y por lo tanto su rendimiento de barrera, tanto como las propiedades fisicoquímicas de la sustancia que se mueve a través de la barrera (por ejemplo, concentraciones o afinidad de humedad (Zamudio- Castellanos *et al.*, 2014).

Este proceso consiste en disolver el gas en un lado de la barrera, que difunde a través de la barrera por el movimiento al azar, y escapar por el otro lado de la barrera. La fuerza impulsora de la diferencia en la presión parcial del gas en las dos superficies de la barrera.

Las ecuaciones para este modelo son bien conocidas y se utilizan regularmente para describir y predecir las propiedades de barrera.

La *efusividad* (E) que tiene como unidades $kg * m^{-2} * s^{-1}$ es el flujo de difusión de las moléculas de gas a través de pequeños agujeros en una barrera. Las siguientes ecuaciones permiten calcular (E) sobre la base de la teoría cinética de los gases para el caso en el que el flujo de gas no es turbulento ya que las moléculas del gas pasan sin obstáculos a través de la barrera, según la ecuación

$$(E) = \sqrt{\frac{p(\rho)}{2\pi}}$$

Donde p es la presión parcial del gas de difusión (Pa), y la densidad ρ es la contribución de ese gas a densidad total.

El espesor de la película puede modificar sus propiedades tales como el rendimiento de la barrera. De acuerdo con la siguiente ecuación, la velocidad de transferencia de vapor de agua corresponde a la cantidad de vapor de agua transferido a través de un área de la película, durante un tiempo definido (Zamudio- Castellanos *et al.*, 2014).

$$WVTR = \frac{\Delta m}{A\Delta t} \left(\frac{g}{m^2s} \right)$$

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Formulación de películas

Se elaboraron las películas siguiendo la metodología reportada por Se utilizó microfibras de lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr.) y dos diferentes tipos de almidón: almidón comercial de maíz y almidón no convencional extraído de raíces de calabacilla loca (*Cucurbita foetidissima* Kunth), formulando soluciones filmogénicas según lo indicado en la Tabla 1, resultando 16 tratamientos, con 3 repeticiones cada uno.

Tabla 1. Tratamientos de formulación de soluciones filmogénicas.

Microfibra de lechuguilla (%)	Almidón de maíz (%)	Almidón de raíz de calabacilla loca (%)	Agua (%)	Glicerol (%)
0.00	4.00	4.00	96.00	2.00
0.01	4.00	4.00	95.99	2.00
0.05	4.00	4.00	95.95	2.00
0.10	4.00	4.00	95.90	2.00
0.25	4.00	4.00	95.75	2.00
0.50	4.00	4.00	95.50	2.00
0.75	4.00	4.00	95.25	2.00
1.00	4.00	4.00	95.00	2.00

*Elaboración propia

Los materiales, excepto el glicerol, se colocaron en un vaso de precipitado y se llevó a agitación hasta obtener una mezcla homogénea, la cual se sometió a calentamiento a 85°C por 15 minutos, con la finalidad de gelatinizar los almidones y se integraran las fibras en la mezcla. Después, la mezcla se enfrió a 70°C, se añadió el glicerol y se mantuvo en agitación por 15 minutos. Posteriormente, la solución filmogénica se dejó

enfriar a 45°C y se vertió a los moldes de acrílico de 15cm x 15cm, utilizando 45 g del producto, mismo que se distribuyó por todo el molde. Las películas se llevaron a secado por 48 horas a 35°C en una estufa de convección forzada. Una vez secas, las películas se despegaron de los moldes, se etiquetaron y guardaron en bolsas estilo Ziploc® en un lugar fresco y seco a temperatura ambiente para su posterior caracterización.

6.2. Color e índice de amarillamiento (YI)

Se determinó según lo reportado por Kaushik *et al.* (2014), se utilizó un colorímetro CR - 400 Konica Minolta para establecer los datos de L*, a*, b*, chroma, °Hue y *ΔE, tomando tres lecturas por repetición de la película cortada 6 x 6 cm. Y se calculó YI con la ecuación $YI = 142,86(b^*/L^*)$.

6.3. Determinación de grosor

El grosor se midió a las películas recién procesadas en mm, siguiendo un patrón en espiral, con un micrómetro digital Mitutoyo™ modelo H-2780 (Mitutoyo Co., Kanagawa, Japan), según el protocolo referido por Tirado-Gallegos *et al.* (2018).

6.4. Determinación de opacidad

La opacidad se determinó en las películas por lectura directa de la absorbancia a 600 nm en un espectrofotómetro UV/Vis Labomed modelo UVS-2700 (Labomed Inc., California, USA), utilizando la ecuación (1) reportada por Anchundia *et al.* (2016).

$$\text{opacidad} = \text{ABS}_{600\text{nm}}/\text{grosor}(\text{mm}) \quad \text{Ec. (1)}$$

6.5. Determinación de solubilidad

El porcentaje de solubilidad se determinó según lo reportado por Hernández-Centeno *et al.* (2021) con modificaciones. Se utilizó 1 g de muestra, la cual se colocó en un vaso de precipitado con 50 mL de agua destilada a temperatura ambiente, posteriormente se llevó a agitación constante por 6 h. De forma paralela se secó papel filtro hasta peso constante en una estufa de convección forzada a 110 °C. Se filtró la muestra utilizando el papel filtro previamente preparado y se llevó a secado en estufa de convección forzada a 110 °C por 2 h, posteriormente se determinó el peso del residuo de película y se utilizó la información para el cálculo de % de solubilidad por diferencia de peso. Esta determinación se llevó a cabo por triplicado.

6.6. Determinación de la inclusión del AEO en las películas por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR/ATR)

Para la obtención de los espectrogramas IR de AEO se utilizó un equipo FTIR/ATR Perkin Elmer™ modelo Spectrum Two (Perkin Elmer Inc., Bucks, U.K.), según el protocolo descrito por Kwon *et al.* (2017), y para las películas con AEO y sin éste se utilizaron las condiciones reportadas por Yao *et al.* (2021). Se realizó además la deconvolución de espectrogramas de todas las películas con el software SPECTRUM™ 10 versión 10.6.2 (Perkin Elmer, Inc., Bucks, U.K.) con la finalidad de analizar las regiones de interés.

Aunado a lo anterior, se analizaron espectrogramas de películas elaboradas con concentraciones elevadas de AEO (5 y 10%) cuya finalidad fue el facilitar la evaluación de la funcionalización del material.

6.7. Determinación de índice de cristalinidad aparente

Se determinó el índice de cristalinidad aparente de las películas a partir del cociente de las bandas $1044/1016\text{ cm}^{-1}$, pues se ha demostrado que estas bandas están relacionadas con las proporciones cristalina y amorfa de los almidones (Warren *et al.*, 2016), por lo que pueden dar una idea del cambio en la estructura cristalina de las películas formuladas en este estudio.

6.8. Determinación de índice de afinidad al agua

Este parámetro se realizó siguiendo la metodología reportada por de Dios-Ávila *et al.* (2022), como cociente de la altura de las bandas de $995/1022\text{ cm}^{-1}$ del espectrograma IR. Se realizaron 3 repeticiones por cada tratamiento.

6.9. Evaluación de las propiedades mecánicas y de permeabilidad al vapor de agua (PVA)

En cuanto a las propiedades mecánicas, se obtuvieron los parámetros de tensión a la fractura (TF) y % de elongación a la fractura (% E) según lo descrito por Zamudio-Flores *et al.* (2015), basado en la norma ASTM D882-10 con algunas modificaciones: se

utilizaron probetas de 1 × 6 cm, previamente acondicionadas a 55 ± 5% HR durante 24 h a temperatura ambiente (25 ± 2 °C), se realizaron 5 ensayos por tratamiento en un texturómetro Brookfield™ modelo CT3 (Brookfield Engineering Laboratories Inc., Massachusetts, USA), utilizando una celda de carga de 4 Kg, y el software TexturePro CT versión 1.9.35 (Brookfield Engineering Laboratories Inc., Massachusetts, USA), y para los cálculos correspondientes se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$TF = W/Ac \quad \text{Ec. (2)}$$

$$\% E = (\Delta L/L0) \times 100 \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde **W** es la fuerza a la ruptura (N), **Ac** es el área de contacto original de la probeta de la película (m²), **ΔL** es la longitud alcanzada al final de la prueba (mm) y **L0** es la longitud original de la probeta (mm).

La PVA se obtuvo utilizando el protocolo descrito por Yao *et al.* (2021), basado en la norma ASTM E96-00, con algunas modificaciones: se utilizaron probetas de películas de 6 × 6 cm, para la cámara de humedad se utilizó NaCl y agua destilada, manteniendo una humedad relativa de 75 ± 5 % a temperatura ambiente (25 ± 2 °C) y se utilizaron celdas de permeabilidad de acrílico con diámetro de exposición de película de 50 mm. El valor de la PVA se calculó según la ecuación (4) referida por los mismos autores.

$$PVA = \frac{W \times x}{t \times A \times \Delta P} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde W es el incremento de peso de la sílica gel (g), x es el grosor de la película (m), t se refiere al tiempo transcurrido (s), A es el área de permeación de la película (m²), y ΔP .

6.10. Análisis estadístico

Se diseñó un experimento completamente al azar, contrastando películas elaboradas con almidón de maíz y almidón de raíz de calabacilla loca mezcladas con las diferentes concentraciones de microfibra de celulosa de lechuguilla ya indicadas. Todos los análisis fueron sometidos a un ANDEVA de una sola vía, utilizando una prueba LSD de Fisher ($p \leq 0.05$) para discriminar entre medias. Para la evaluación estadística se utilizó el software Statgraphics™ Centurion versión XVI (Statgraphics Technologies, Inc., Virginia, USA).

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Formulación de películas

Del proceso de formulación de soluciones filmogénicas, se obtuvo un total de 40 películas, de acuerdo con lo indicado en la Tabla 1. En la Figura XX se muestra un ejemplo de las películas obtenidas.

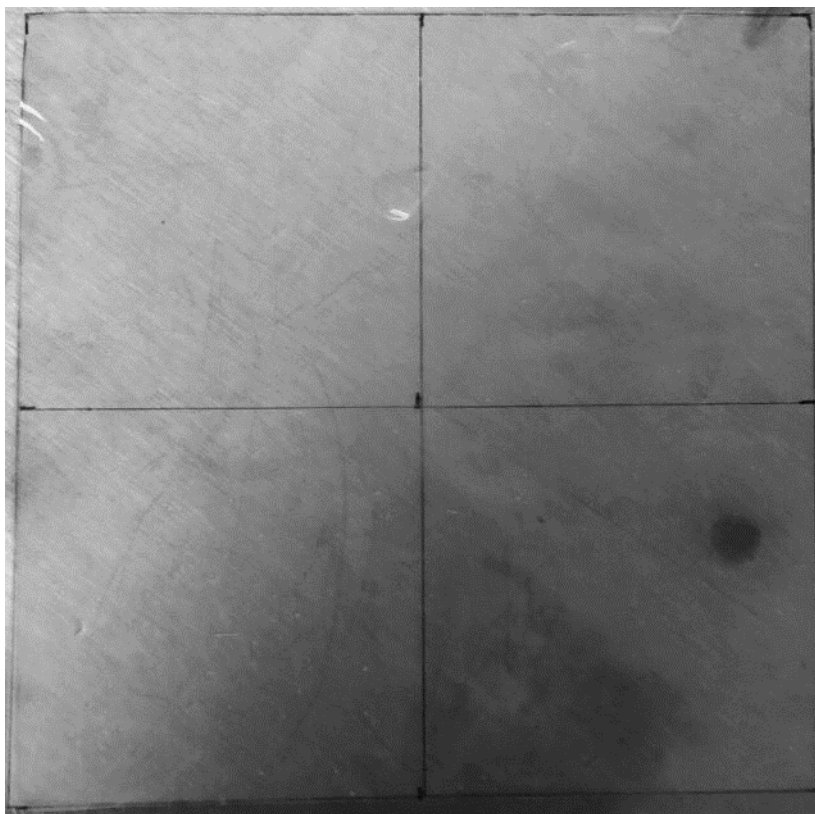


Figura 1. Película obtenida a partir de almidón de maíz y 0.05 % de microfibras de lechuguilla (*A. lechuguilla* Torr.). Imagen obtenida sobre un fondo de flaca de acero inoxidable.

A simple vista, las películas resultaron cada vez más opacas a medida que se fue incrementando la concentración de microfibras de lechuguilla en la matriz polimérica; así como la sensación de “acartonamiento” que pudo sentirse al tacto.

7.2. Caracterización morfológica

De la caracterización morfológica por microscopía óptica de luz transmitida (MOLT) se obtuvieron las micrografías de la Figura 2.

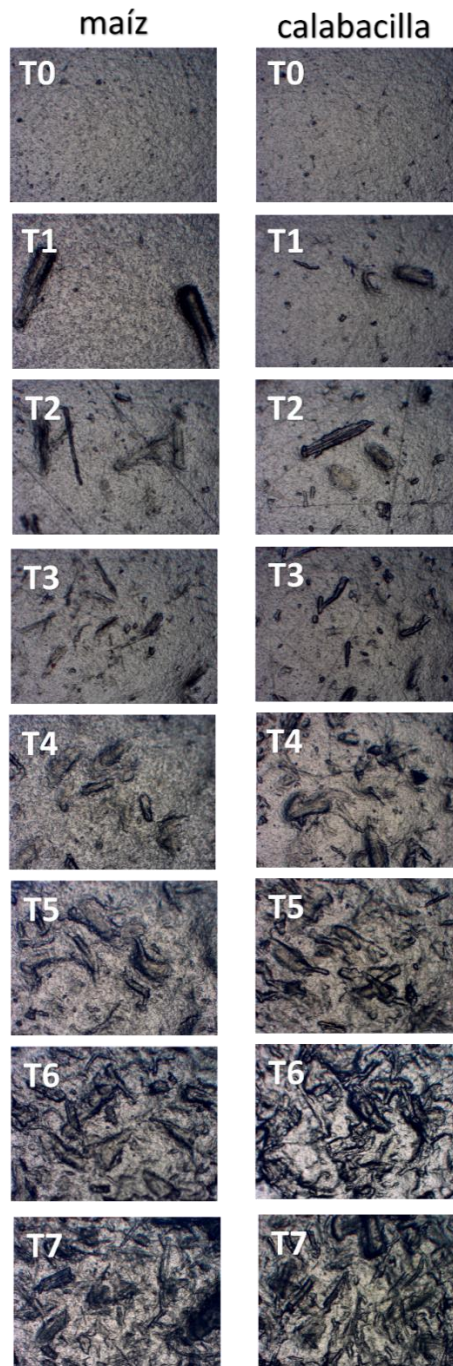


Figura 2. Micrografías de películas en orden de % de concentración de microfibras de lechuguilla con almidón de maíz y con almidón de raíz de calabacilla loca, obtenidas mediante MOLT a 40X.

A la observación directa, parece haber integración de microcelulosa y almidón termoplastificado, pues se pueden ver fibras tanto en la superficie de los materiales generados como en la parte interna de los mismos, cubiertos por el almidón termoplastificado. La presencia de fibra pudo observarse de manera gradual en cada tratamiento desde T1 hasta T7, esta evidencia pudiera soportar el hecho de que aumenta el “acartonamiento” que se sintió al tacto en las películas. Se esperaría con ello la modificación positiva en las propiedades de los materiales generados.

Los resultados de este estudio coinciden con los reportados por El Halal *et al.* (2017) y Santana *et al.* (2018), quienes también obtuvieron una distribución heterogénea de las fibras de celulosa en las películas que formularon, presentando una estructura discontinua, interrumpida por las fibras que se utilizaron como agente de refuerzo estructural.

7.3. Propiedades ópticas

En cuanto a estas propiedades, se realizaron diferentes determinaciones para conocer los cambios inducidos por el incremento de la presencia de la microfibrilla de lechuguilla en la matriz polimérica de cada película formulada, de acuerdo con cada tratamiento.

7.3.1. Color (CIE $L^*a^*b^*$)

En cuanto a la determinación de color, se evaluó primero la luminosidad L^* de las películas (Fig. 3), misma que resultó afectada por la adición de microfibrilla para ambos almidones. Se pudo observar que la mayor luminosidad se obtuvo para las películas sin microfibrilla, disminuyendo significativamente para los tratamientos de 0.01 a 0.50% de

microfibra, entre los cuales no se detectó diferencia, y sólo hasta las concentraciones de 0.75 y 1.00% de microcelulosa la luminosidad volvió a recuperarse, sin llegar a los valores de las películas testigo.

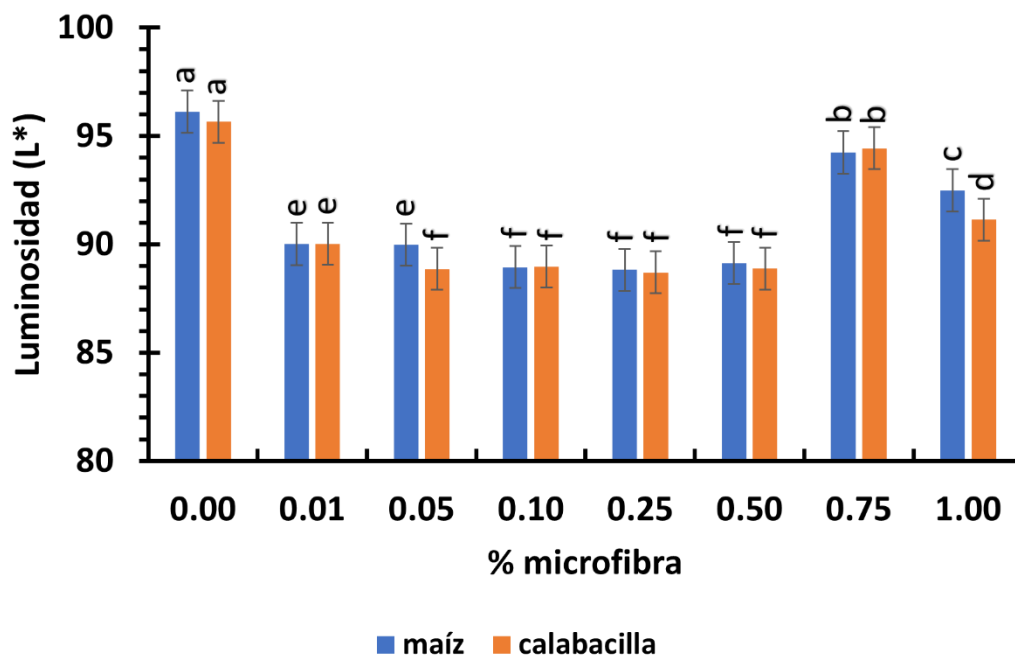


Figura 3. Luminosidad (L^*) de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).

La disminución de la luminosidad para los tratamientos de 0.01 a 0.50 % de microfibril pudiera ser ocasionado por la absorción de la luz debido a la opacidad generada por la presencia de estas microfibril, y el aumento en los valores de luminosidad pudiera ser provocada por una mayor presencia de microfibril en la superficie de las películas, lo que favorecería una mayor reflectancia de la luz. En contraste, Ghanbarzadeh *et al.* (2010) obtuvieron en su estudio un resultado contrario, pues la luminosidad en sus películas de almidón con carboximetilcelulosa presentó un incremento en este parámetro en proporción directa con la concentración del agente de refuerzo.

Enseguida se evaluaron las coordenadas de color a^* y b^* del espacio CIE $L^*a^*b^*$ (Fig. 4), donde se pudo observar diferencia para los tratamientos respecto al testigo, la tendencia fue predominante hacia el color amarillo en proporción directa al aumento de presencia de microfibras en la película, aunque para los tratamientos de 0.01 a 0.50 % de microfibras se obtuvieron valores menores respecto al testigo, lo que pudiera indicar un color más tendiente al blanco, y para los tratamientos de 0.75 y 1.00% de microfibras resultaron más amarillentas, lo que pudo ser resultado del color que aporta la mayor cantidad de microfibras presente en la superficie de estos materiales.

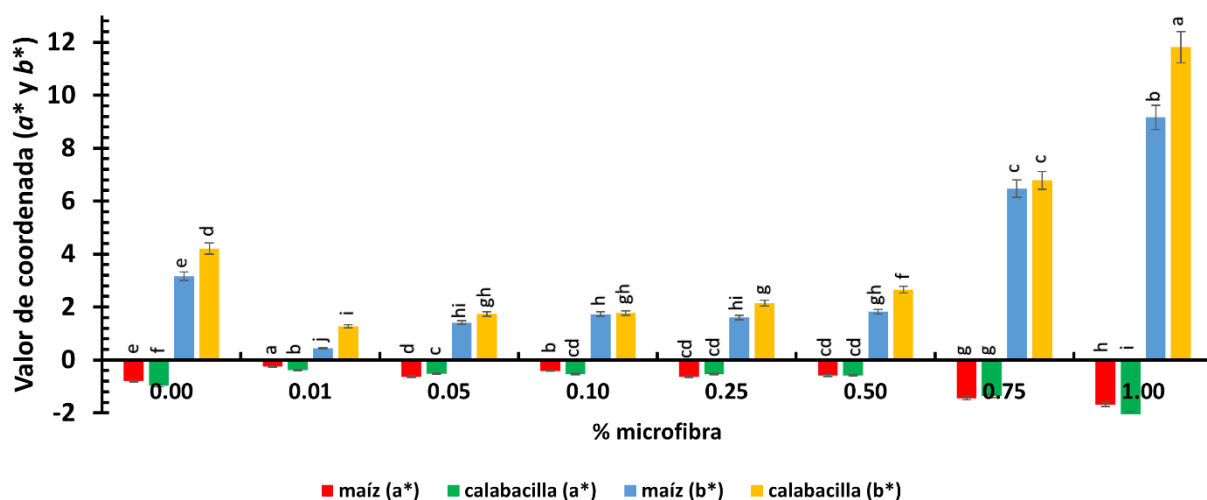


Figura 4. Luminosidad (a^* y b^*) de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).

En su estudio, Ghanbarzadeh *et al.* (2010) también reportaron un decremento en los valores de las coordenadas a^* y b^* en las películas de almidón de papa con las concentraciones de carboximetilcelulosa que emplearon.

7.3.2. Diferencia de color (ΔE)

Con la finalidad de conocer la diferencia de color entre las películas, se determinó este parámetro (Fig. 5), de donde resultó que la mayor diferencia resultó para las películas de

almidón de maíz y de raíz de calabacilla con 0.01 % de microfibras de lechuguilla, junto con la concentración de 0.05 % de microfibras para la película de almidón de maíz. Después, las concentraciones de 0.05 a 0.50 % de microfibras resultaron con poca diferencia entre ellos, pero diferencia más perceptible contra el testigo y contra los tratamientos de 0.75 y 1.00 % de microfibras, entre los cuales pudo observarse poca diferencia, aunque detectable estadísticamente.

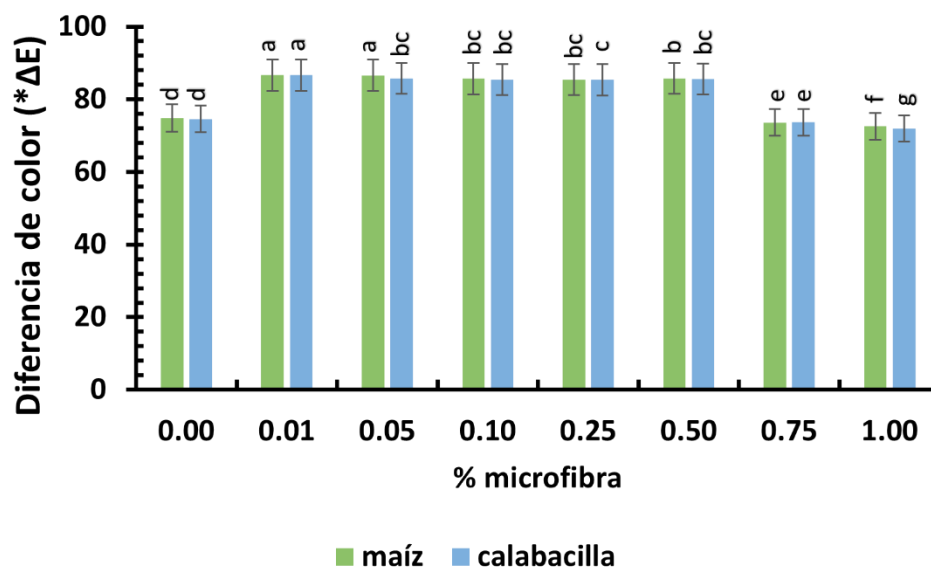


Figura 5. Diferencia de color (*ΔE) de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).

La diferencia de color entre los materiales evaluados coincide con la diferencia en la luminosidad de estos, aunque no del todo con los valores de las coordenadas de color a^* y b^* , por lo que tendría que ver más bien con la cantidad de luz que los materiales reflejan en su superficie.

Ghanbarzadeh *et al.* (2010) obtuvieron un resultado semejante, pues reportaron un decremento del valor de diferencia de color en proporción inversa al aumento de la

concentración de carboximetilcelulosa empleada en las películas de almidón de papa que formularon.

7.3.3. Índice de amarillamiento (YI)

El índice de amarillamiento (Fig. 6) pudo dar una idea del impacto de la presencia de la microfibrilla en la película en la percepción del usuario acerca de estos materiales. Los resultados indicaron que el desarrollo de este parámetro evoluciona de manera positiva con la presencia creciente de microfibrilla de lechuguilla en los materiales formulados.

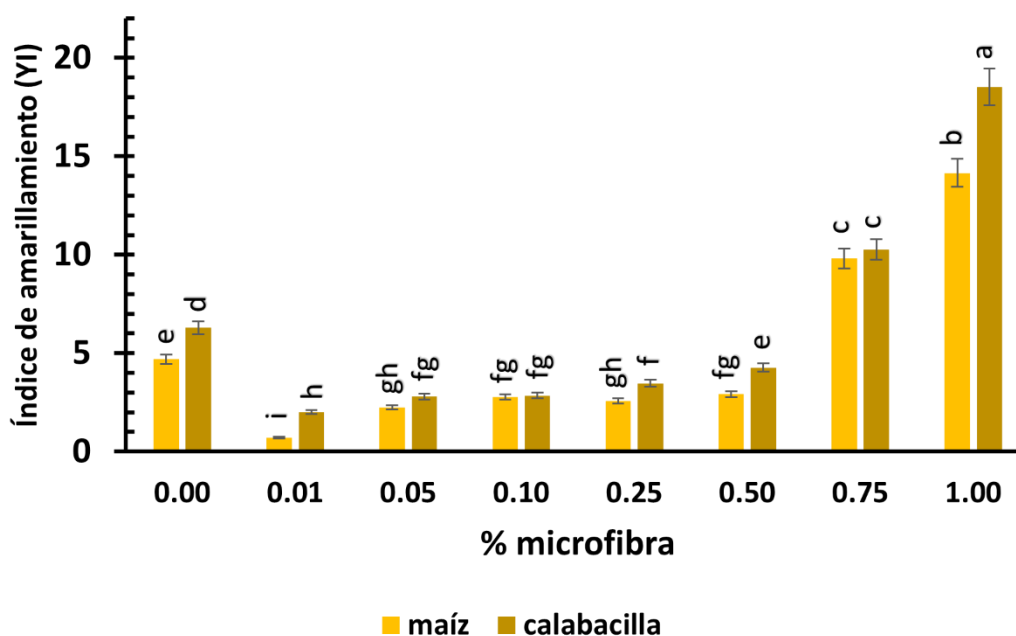


Figura 6. Índice de amarillamiento (YI) de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).

La tendencia del índice de amarillamiento parece estar directamente relacionada con las coordenadas de color a^* y b^* (Fig. 5), los cuales también evidenciaron una tendencia hacia el color amarillo en el espacio de color CIE Lab, aunque Ghanbarzadeh *et al.* (2010) reportaron un resultado contrario, al observar una disminución del YI en proporción inversa al % de carboximetilcelulosa empleado en las películas que formularon.

7.3.4. Opacidad

La opacidad es una propiedad de las películas que también puede brindar una idea acerca de cómo podría percibirse este tipo de materiales por el usuario final y, en parte, también pudiera brindar alguna base de decisión sobre el uso final de este tipo de productos. En la Figura 7 se muestran los resultados de esta determinación, calculados según la ecuación que se indicó en la metodología.

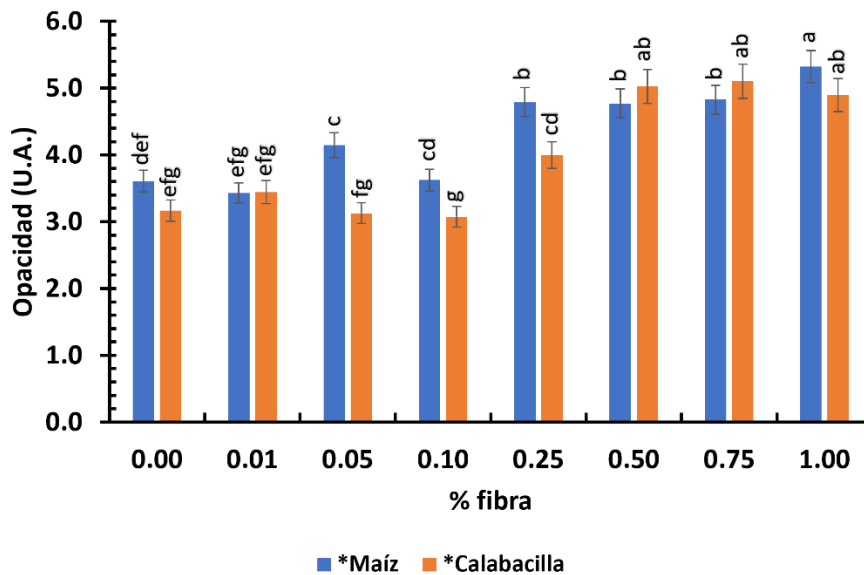


Figura 7. Opacidad de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).

Se pudo apreciar que las películas fueron opacándose en proporción directa con el aumento de la presencia de microfibras de lechuguilla en la matriz polimérica de los materiales formulados, pero también podría deberse al agua que quedó atrapada entre el material, debido a la higroscopicidad del glicerol y de la celulosa, principal constituyente de la microfibras de lechuguilla.

Balakrishnan *et al.* (2017) en su estudio con películas de almidón de papa y celulosa también detectaron un incremento en la opacidad de los materiales que formularon, atribuyendo este efecto al bloqueo de la luz por parte de las fibras de celulosa empleadas.

7.4. Grosor

Este parámetro es de interés, si bien como elemento que debe integrarse en el cálculo de las propiedades mecánicas de este tipo de material, pero también como un indicador de integración de humedad y del acomodo de las fibras dentro de la matriz polimérica de cada una de las películas formuladas. Los resultados obtenidos para esta determinación se muestran en la Figura 8.

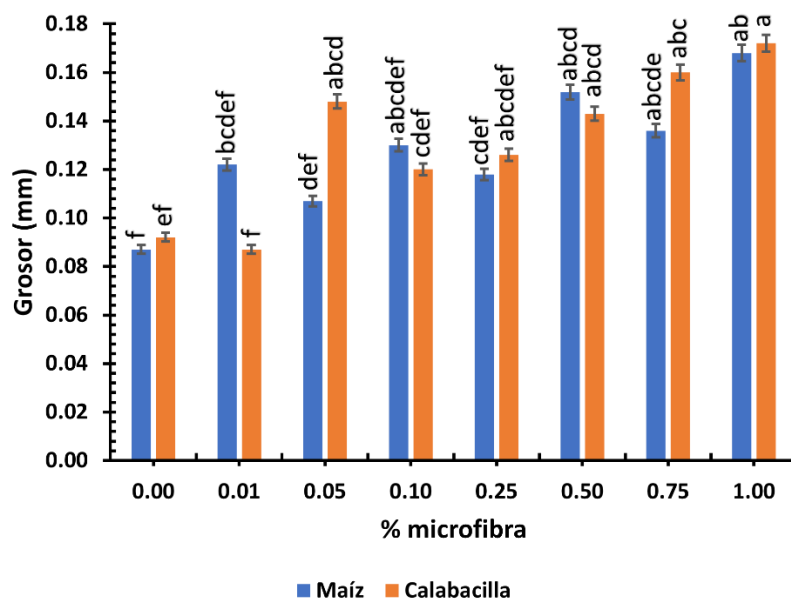


Figura 8. Grosor de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede inferir que la presencia de microfibras está directamente relacionada con el aumento en el grosor de las películas obtenidas,

por el engrosamiento que aportan a las películas, a manera de abultamiento por la poca solubilidad de las fibras y su estructura molecular mucho más estable que la de los almidones.

El Hahal *et al.* (2017), reportaron en su estudio también un incremento en el grosor de las películas de almidón de papa y yuca al emplear celulosa para reforzarlas, y sus resultados igualmente parecen no estar vinculados al origen botánico de los almidones que emplearon, tan solo a la adición del agente de refuerzo. Un resultado similar de incremento en el grosor fue reportado en el estudio de Santana *et al.* (2018).

7.5. Solubilidad

En cuanto a este parámetro, su importancia radica en que puede sugerir qué tan degradable pudiera resultar el material formulado, así como también pudiera plantear en cuáles aplicaciones no sería conveniente su uso. Los resultados que se muestran en la Figura 9 para este parámetro resultaron heterogéneos, con menores valores de solubilidad para las películas de almidón de maíz con concentraciones de microfibras de lechuguilla de 0.01 y 0.01 %, así como para la película de almidón de raíz de calabacilla con 0.05 % de microfibras de lechuguilla. El resto de los tratamientos, tanto de almidón de maíz, como de almidón de raíz de calabacilla local, resultaron con pocas diferencias, aunque perceptibles, entre ellos y el testigo.

Una menor solubilidad podría ser indicativo de una integración más estable a nivel molecular entre los componentes de las películas, lo que podría resultar en una degradación más tardía del material en condiciones ambientales, así como también podría indicar un mayor abanico de aplicaciones del material.

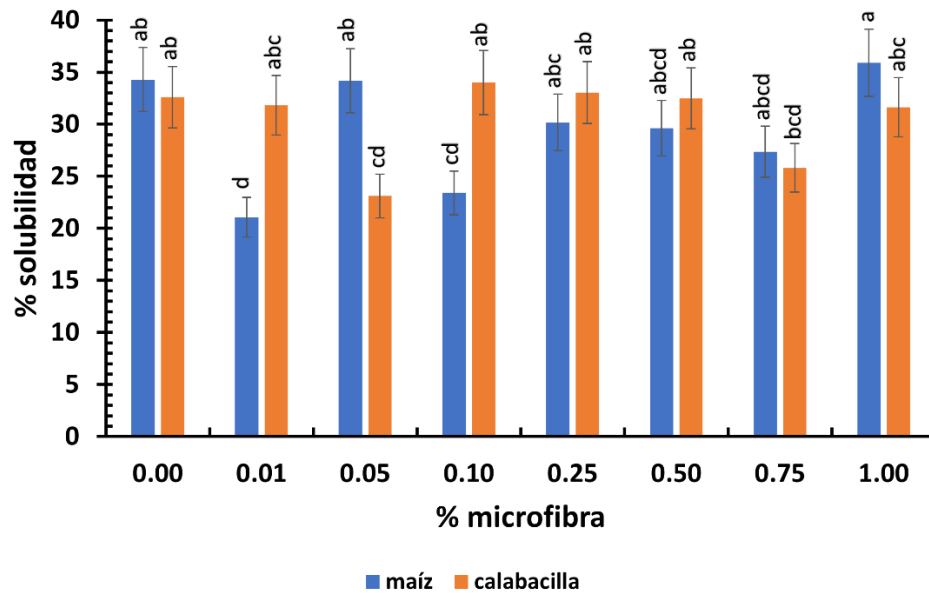


Figura 9. Porcentaje de solubilidad de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).

Estos resultados contrastan con lo reportado por Tongdeesoontorn *et al.* (2011), quienes utilizaron carboximetilcelulosa (CMC) en la formulación de las películas de almidón de yuca que evaluaron, obteniendo valores de solubilidad inversamente proporcionales al incremento en la concentración de CMC. Por otro lado, El Halal *et al.* (2017) reportaron también un aumento en la solubilidad en su estudio, donde utilizaron películas de almidón de papa reforzadas con celulosa, respecto al testigo utilizado.

7.6. Caracterización químico-estructural por FTIR/ATR

La determinación de la estructura química molecular de una sustancia puede evidenciar la presencia de otros compuestos en la muestra, o bien la presencia o formación de nuevos enlaces por la interacción de los componentes durante el procesamiento que da origen a un nuevo material. Para este caso, se echó mano de la espectroscopía en el

infrarrojo medio (FTIR) para obtener los espectros IR de las muestras de cada tratamiento.

7.6.1. FTIR

En la Figura 10 se pueden observar los espectros IR de los tratamientos en los que se utilizó almidón de maíz, y en la Figura 11 aquellos correspondientes a los tratamientos donde se utilizó almidón de raíz de calabacilla loca.

Para todas las películas se pudieron observar las bandas típicas del polisacárido predominante, es decir, el almidón. Se observó una banda amplia alrededor de los 3500 cm^{-1} correspondiente a los grupos -OH, bandas agudas y estrechas alrededor de los 2900 cm^{-1} , correspondientes a grupos -CH₂ y -CH₃, así como a los 1600 cm^{-1} se pudo observar la presencia de agua ligada, lo cual concuerda con lo reportado por Tongdeesoontorn *et al.* (2011) y Balakrishnan *et al.* (2017).

Posteriormente, se pudieron observar hacia a los 1050 cm^{-1} las bandas relacionadas con el enlace -O- de los anillos de glucosa, la cual presentó variaciones en su intensidad atribuido al % de microfibra adicionado (Echeverri *et al.*, 2011; Balakrishnan *et al.*, 2017).

Posterior a ello, entre los 900 y 450 cm^{-1} , se identificó la región de la “huella dactilar” correspondiente al anillo piranósico de la glucosa, componente molecular de almidón y celulosa.

A los 995 cm^{-1} se identificó la banda relacionada con la interacción almidón-agua, cuya disminución en su intensidad se atribuye a la presencia de microfibras de celulosa, según lo reportado por Echeverri *et al.* (2011).

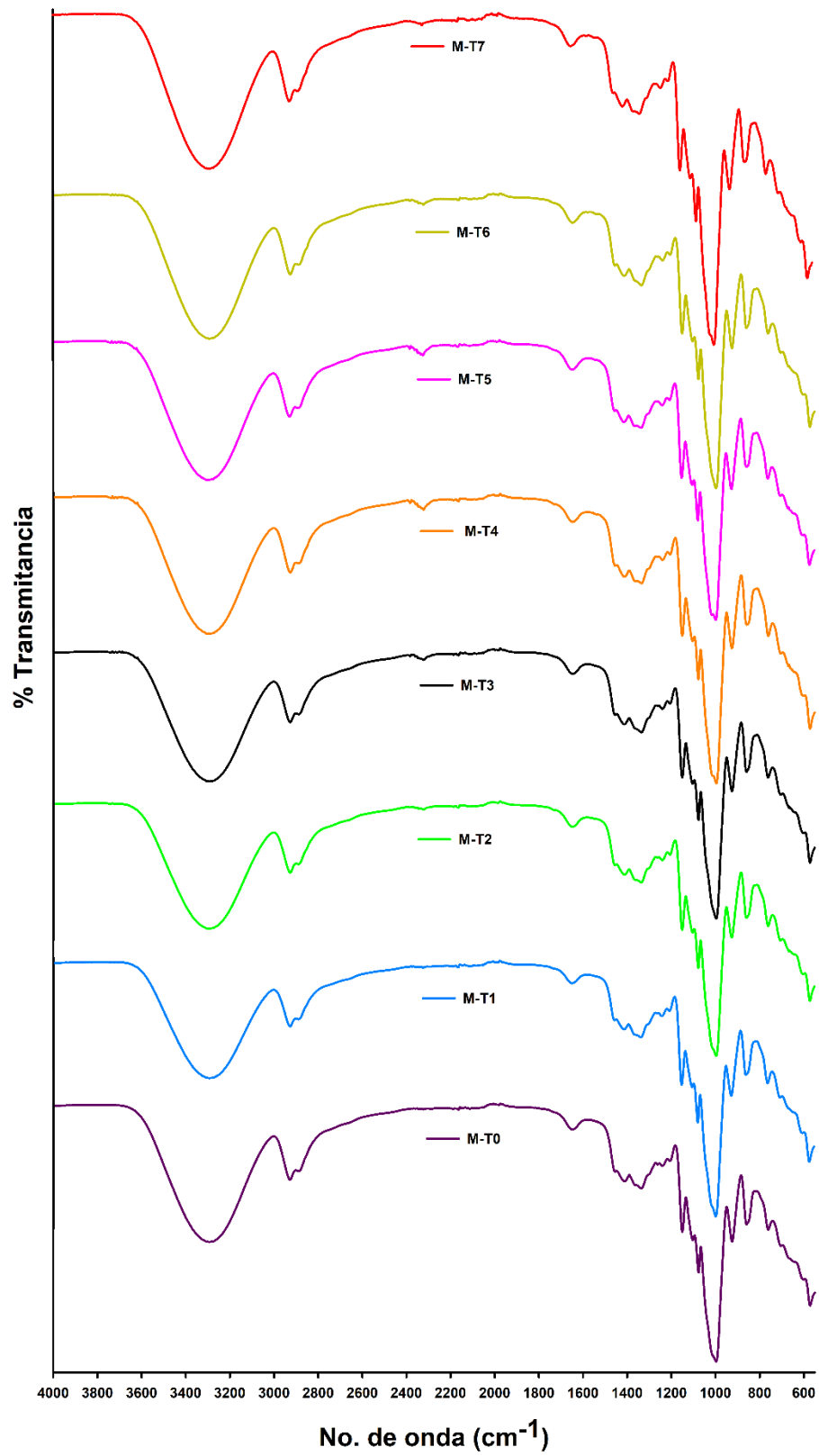


Figura 10. Espectrogramas IR de los materiales obtenidos de los tratamientos donde se utilizó almidón de maíz.

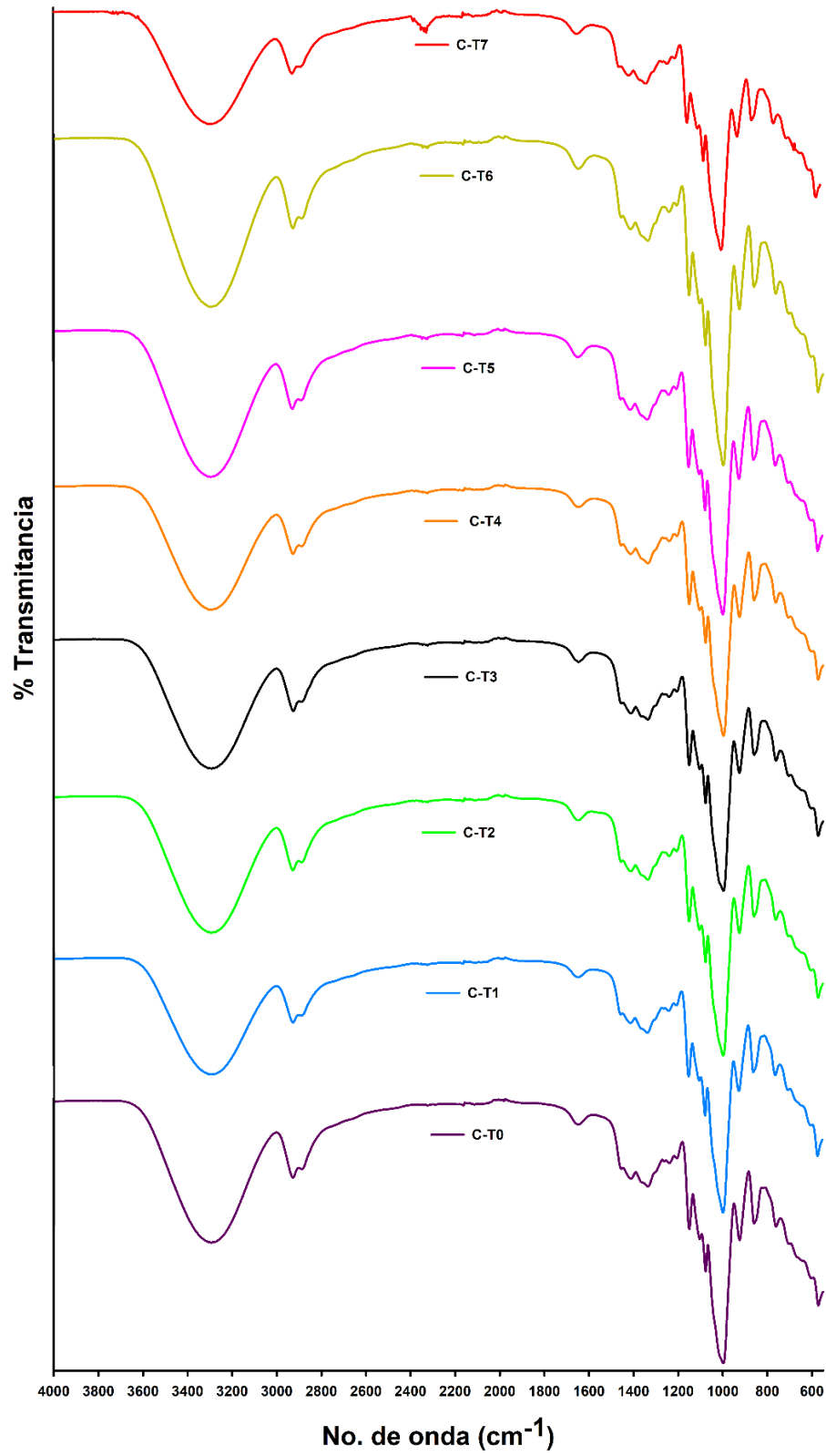


Figura 11. Espectrogramas IR de los materiales obtenidos de los tratamientos donde se utilizó almidón de raíz de calabacilla loca.

7.6.2. Índice de cristalinidad aparente

Este índice, obtenido a partir del cociente del valor de la intensidad de las bandas del espectrograma IR de $1047/1022\text{ cm}^{-1}$, una vez convertido a unidades de absorbancia y deconvulvado, puede brindar una idea de las variaciones en la integridad estructural de un material de base almidonosa, por lo que brindaría información acerca de cambios en el orden del acomodo molecular de los materiales formulados con los materiales utilizados para este estudio. En la Figura 12 se pueden observar los resultados obtenidos para esta determinación.

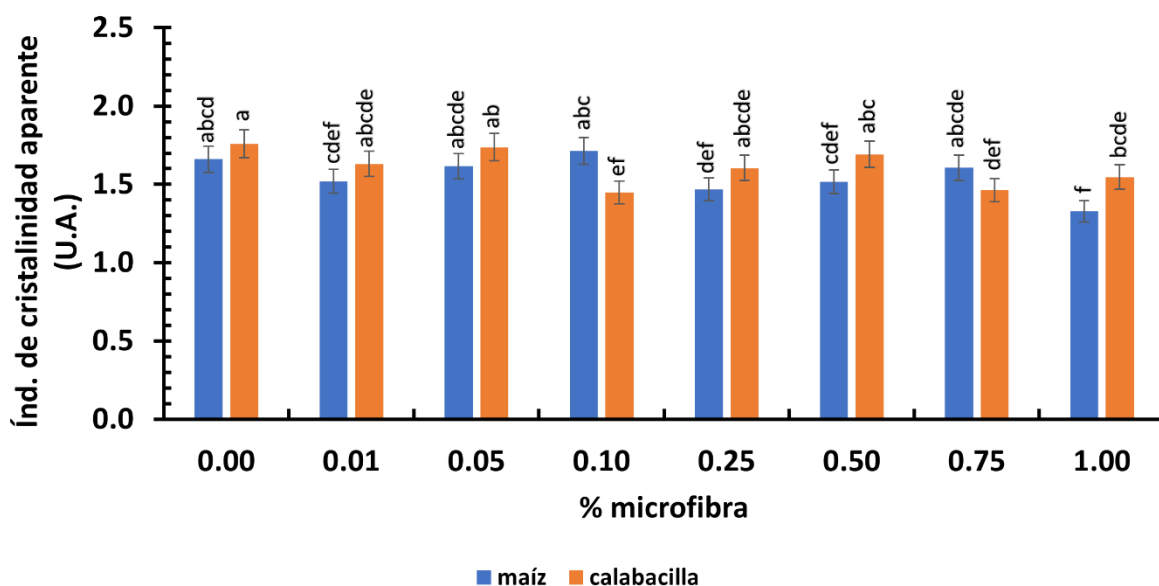


Figura 12. Valores del índice de cristalinidad aparente de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).

Se pudo observar que la mayor modificación de orden molecular resultó para la película de almidón de maíz y 1.00 % de microfibras de lechuguilla, seguida de la película de almidón de raíz de calabacilla loca con 0.10 % de microfibras, respecto al testigo. La modificación estructural pudo ser producto de la interacción molecular entre los materiales de origen, y parece no tener impacto en los valores de grosor, pero sí en la

solubilidad de estos, ya que el material producto con el mayor valor para este último parámetro es también la película de almidón de maíz con 1.00% de microfibras, seguida de la película de almidón de raíz de calabacilla loca con 0.01 % de microfibras.

7.6.3. Índice de afinidad al agua

Este índice brinda información acerca de la intensidad higroscópica de un material basado en polisacáridos, y se obtuvo a partir del espectrograma IR procesado en las mismas condiciones que para el índice de cristalinidad aparente, como resultado del cociente del valor de la altura de las bandas $1022/995\text{ cm}^{-1}$. Los resultados para este parámetro se pueden observar en la Figura 13.

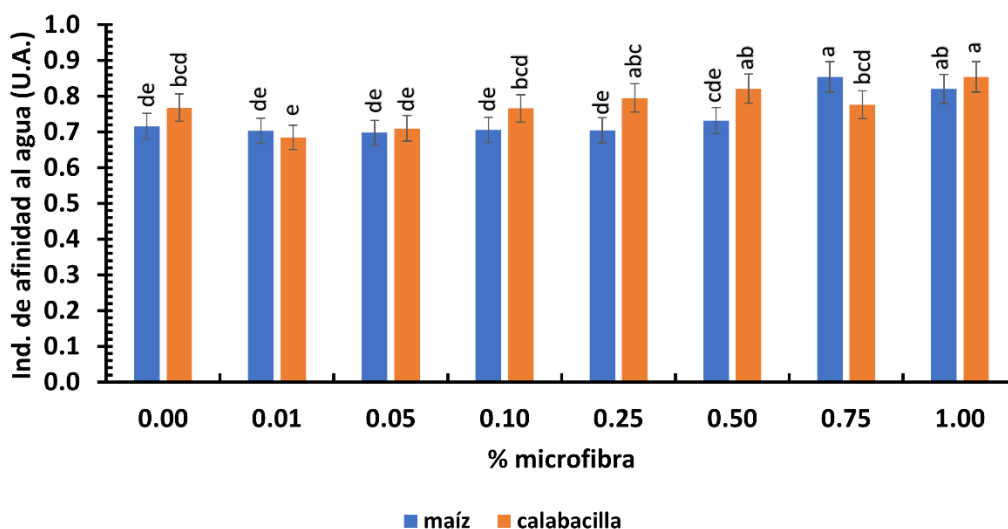


Figura 13. Valores del índice de afinidad al agua de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).

Se observó una tendencia positiva de este parámetro respecto al % de microfibras a partir de la concentración de 0.75%, sin observarse diferencia entre los tratamientos previos a este en comparación con el testigo.

De acuerdo con estos resultados, se puede inferir que la afinidad al agua está relacionada con la combinación y el reacomodo del orden molecular de los materiales formulados, así como con el incremento de la presencia de microfibras de lechuguilla en los mismos, dada la higroscopicidad de este material.

7.7. Propiedades mecánicas y de barrera

De entre todas las determinaciones necesarias para la evaluación de materiales poliméricos, las propiedades mecánicas y de barrera, junto con las propiedades térmicas, son las que dan la pauta final para determinar la utilidad final y posibles usos y aplicaciones de los materiales desarrollados. Para este estudio, se determinó sólo una parte de los parámetros evaluables, cuyos resultados se describen a continuación:

7.7.1. Tensión a la fractura (TF)

Este parámetro indica la fuerza total de resistencia a la tensión de la película antes de su ruptura. Los resultados pueden visualizarse en la Figura 14.

La hipótesis planteada sugiere que el incremento en el contenido de microfibras en las películas tendría un impacto en esta propiedad de dicho material. De los resultados obtenidos, se pudo observar como mejor tratamiento la combinación tanto de almidón de maíz como de raíz de calabacilla loca con 0.10% de microfibras de lechuguilla. Un incremento en la cantidad de microfibras no resultó en mayores valores de fuerza de tensión a la fractura, respecto al testigo, sino hasta el uso de concentración de 1.00 %, e incluso los tratamientos de 0.25 y 0.50 % resultaron menos resistentes que el testigo.

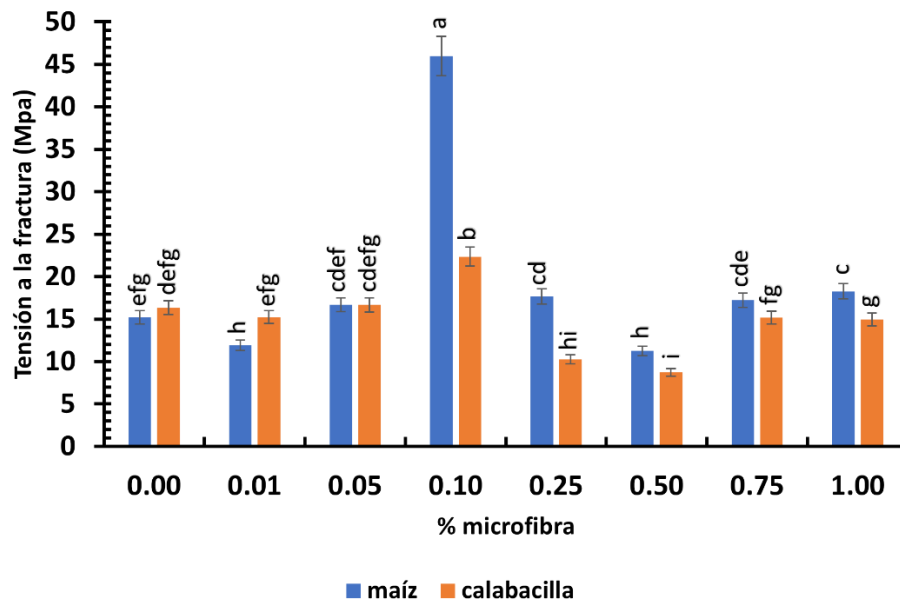


Figura 14. Valores de tensión a la fractura (TF) de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).

Müller *et al.* (2009) también encontraron en su estudio de películas de almidón de yuca y fibras de celulosa que los valores de TF se comportaron de manera heterogénea en relación con el % de fibra de celulosa empleada, y encontraron también que esta propiedad es fuertemente dependiente del % de humedad relativa. El Halal *et al.* (2017), reportaron un incremento en los valores de TF al utilizar celulosa como agente de refuerzo en películas de almidón de papa y yuca. En contraste, Tongdeesoontorn *et al.* (2011) reportaron en su estudio una relación directamente proporcional entre los valores de TF y la concentración de CMC que utilizaron en su estudio con películas de almidón de yuca.

7.7.2. Porcentaje de elongación (%E)

El valor obtenido en esta determinación indica el porcentaje de estiramiento que un material puede sufrir hasta antes de romperse, partiendo de sus dimensiones originales. Los resultados para los materiales evaluados se muestran en la Figura 15.

La elasticidad de los materiales obtenidos presentó una tendencia negativa en relación con el % de microfibras utilizado en las películas de almidón de calabacilla loca, pero para las películas de almidón de maíz se observó un comportamiento distinto, muy heterogéneo, con una marcada disminución de la elasticidad para la concentración de 0.10 % de microfibras. Este resultado contrasta con los valores de tensión a la fractura, donde este mismo tratamiento resultó ser el que opuso mayor resistencia a la ruptura.

Lo anterior podría explicarse como resultado de la mejor interacción entre los materiales que conforman la película para este tratamiento.

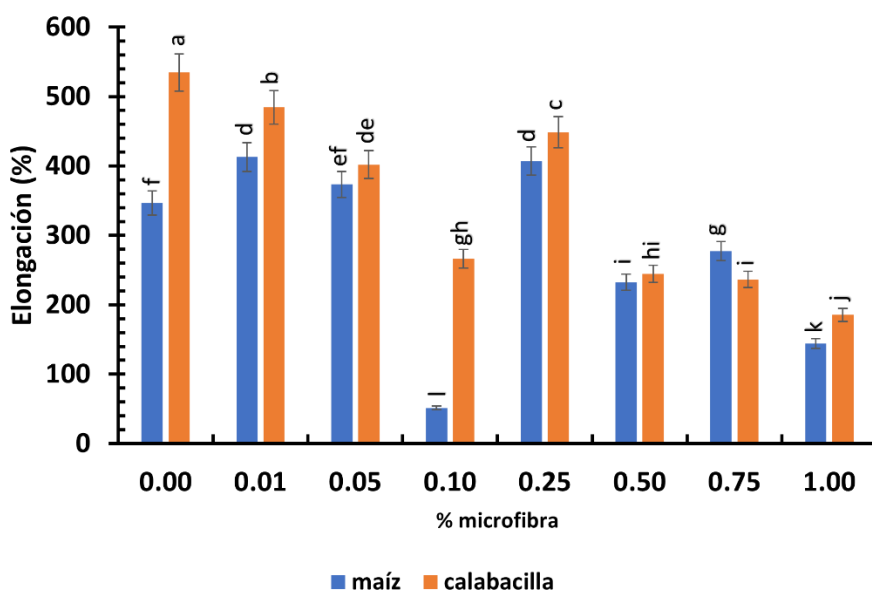


Figura 15. Valores de porcentaje de elongación (%E) de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).

En su estudio, Müller *et al.* (2009) encontraron también un comportamiento heterogéneo para este parámetro, coincidiendo con el comportamiento de los datos obtenidos en el presente estudio en el sentido de que la adición de fibras de celulosa mostró tendencia a disminuir los valores de % E respecto al testigo.

Por otro lado, El Halal *et al.* (2017) también reportaron una disminución marcada en % de elongación de sus películas de almidón de papa y yuca reforzadas con celulosa y Tongdeesoontorn *et al.* (2011) encontraron también una disminución en los valores de %E respecto al % de CMC empleado en sus materiales, hasta un punto mínimo que luego pareció aumentar nuevamente con el incremento del % de CMC empleado.

7.7.3. Permeabilidad al vapor de agua (PVA)

La difusión de moléculas de agua a través de los materiales se debe tomar en cuenta para las posibles aplicaciones de estos, sobre todo si se pretende usarlos como material de envasado, ya que una de las funciones principales del envase es, además de contener, proteger al producto de la humedad excesiva que pueda acelerar su deterioro. En la Figura 16 se muestran los resultados de la PVA para los materiales evaluados en este estudio.

A partir de los valores de PVA obtenidos, se pudo observar una tendencia positiva a la difusión del agua para las películas de ambos almidones, respecto al testigo. Esto pudiera explicarse por la higroscopicidad de la microfibrilla de lechuguilla, pero también por el acomodo entre el almidón termoplastificado y la microfibrilla, que pudiera actuar con un efecto “transportador” de humedad entre ambas caras de las películas, aumentando el flujo de humedad junto con el incremento de la presencia de microfibrilla en los materiales obtenidos.

Aun así, las películas elaboradas con almidón de maíz parecen haberse integrado mejor con la microfibrilla de lechuguilla en concentraciones de 0.10 y 0.25 %, impidiendo el flujo de humedad en mayor proporción que el testigo. Para las películas elaboradas con

almidón de raíz de calabacilla loca, la menor PVA resultó para la concentración de 0.1 % de microfibras y no hubo diferencia con el testigo para la concentración de 0.01 %.

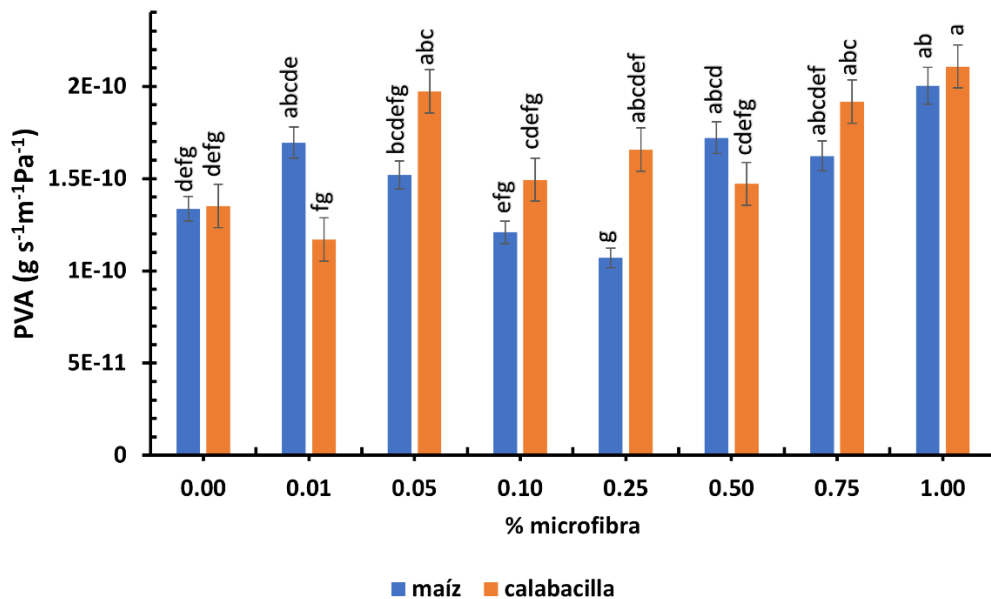


Figura 16. Valores de permeabilidad al vapor de agua (PVA) de las películas obtenidas. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según prueba LSD de Fisher ($P \leq 0.05$).

Los resultados parecieran indicar que tanto para las películas de almidón de maíz, como para las de almidón de raíz de calabacilla loca, el uso de una concentración de 0.10 % resultó como la mejor opción, si se observa junto a los resultados de tensión a la fractura y % de elongación, como un material más resistente y menos elástico y permeable que sus respectivos testigos.

El Halal *et al.* (2017) reportaron también un aumento en la PVA utilizando almidón de papa y celulosa, respecto al testigo sin celulosa, aunque su estudio, donde también utilizaron almidón de yuca, sugiere que este parámetro es dependiente también de la estructura cristalina propia de cada tipo de almidón.

8. CONCLUSIONES

Se obtuvieron películas manejables en todos los tratamientos, lo que permitió realizar las pruebas de caracterización programadas. La distribución de la microcelulosa en las películas fue heterogénea, y se pudo visualizar la incrustación de las fibras entre la matriz polimérica de las películas elaboradas con ambos almidones.

La luminosidad, el color (coordenadas a^* y b^*) el índice de amarillamiento y la opacidad fueron afectadas de manera proporcional por la concentración de microfibras de celulosa empleada en cada caso. Se esperaba que los usuarios comunes puedan diferenciar estos materiales a simple vista dada la contrastante diferencia de estos parámetros de los tratamientos con mayor contenido de microcelulosa.

La solubilidad de las películas disminuyó hasta la concentración de 0.10% de microcelulosa para las películas de ambos almidones. Esto provocó también que se obtuvieran valores de TF mayores para estos tratamientos y el menor valor de % E también para la película de almidón de maíz, aunque en general el % E presentó una correlación negativa al aumento del % de microcelulosa en películas de ambos almidones.

En cuanto a la caracterización químico-estructural, se pudieron apreciar las bandas características para carbohidratos, confirmando la integración de los materiales en uno solo. Para el índice de cristalinidad aparente se apreció una ligera disminución respecto al testigo, y el índice de afinidad por el agua presentó una ligera correlación positiva respecto al aumento de la presencia de microcelulosa en las películas elaboradas.

La PVA parece variar para las películas elaboradas con cada almidón. A concentraciones bajas de fibra este valor disminuyó con respecto al testigo en películas de ambos almidones, aumentando la PVA al utilizar mayores concentraciones de microcelulosa.

En general, la hipótesis nula se acepta parcialmente, pues las películas de almidón de raíz de calabacilla y de almidón de maíz con 0.10% de microcelulosa parecen tener las mejores características tecnológicas para emplearse en algunas aplicaciones comerciales e industriales como posibles envases para contención y transporte de alimentos que no sean tan susceptibles al deterioro por humedad.

9. LITERATURA CITADA

- Acosta Sullcahuamán, J. A. (2001). *Fractura de materiales poliméricos a altas velocidades de sollicitación*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Almeida, A. y. (2004). "Bioplásticos: una alternativa ecológica". *Química Viva*, 3, 112-133.
- Anchundia, K., Santacruz, S., & Coloma, J. (2016). Caracterización física de películas comestibles a base de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*). *Revista chilena de nutrición*. 43, 394-399.
- Artigas, J. M., P. C. (2002). *Tecnología del color*. Universitat de València.
- Balakrishnan, P., Gopi, S., M S, S., & Thomas, S. (2017). UV resistant transparent bionanocomposite films based on potato starch/cellulose for sustainable packaging. *Starch - Stärke*, 70(1-2), 1700139. doi:10.1002/star.201700139
- Callister, W. D. (1996). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. II*. Reverte.
- de Dios-Avila, N., Tirado-Gallegos, J. M., Estrada-Virgen, M. O., Rios-Velasco, C., Luna-Esquivel, G., Zamudio-Flores, P. B., ... & Campos, O. C. (2022). Caracterización estructural y fisicoquímica de almidones de semilla de aguacate modificados mediante hidrólisis ácida a alta temperatura. *Revista Bio Ciencias*, 9, 21.
- Echeverri N., Montoya U., Zuluaga R., Castro C. y Gañán P. (2011) Películas de almidón de papa reforzadas con celulosa bacteriana. *ReCiTeIA* 11(1b):81 – 91.
- El Halal, S. L. M., Bruni, G. P., do Evangelho, J. A., Biduski, B., Silva, F. T., Dias, A. R. G., ... de Mello Luvielmo, M. (2017). The properties of potato and cassava starch films combined with cellulose fibers and/or nanoclay. *Starch - Stärke*, 70(1-2), 1700115. doi:10.1002/star.201700115
- Fusalba, C. T. (2014). *UF0818 Conservación en pastelería: Envasado, almacenamiento y regeneración*. Ideaspropias Editorial.
- Gadhavre, R. , Das, A. , Mahanwar, P. and Gaddekar, P. (2018) Starch Based Bio-Plastics: The Future of Sustainable Packaging. *Open Journal of Polymer Chemistry*, 8, 21-33
- García Garibay, M., R. Q.-M. (1993). *Biotecnología Alimentaria* . Editorial Limusa.
- Ghanbarzadeh, B., Almasi, H., & Entezami, A. A. (2010). Physical properties of edible modified starch/carboxymethyl cellulose films. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(4), 697–702. doi:10.1016/j.ifset.2010.06.001
- Gillespie, R. J. (1988). *Química* . Reverte .
- Granda Rueda, M. (2021). *Polímeros a base de almidón como sustitutos de los plásticos de un solo uso* . Obtenido de Trabajo de titulación, modalidad proyecto de investigación presentado como requisito previo a la obtención del título de química : UCE

- Hernández-Centeno, F., López-De la Peña, H. Y., Hernández-González, M., Rodríguez-González, C. A., Tirado-Gallegos, J. M., Rios-Velasco, C., & Zamudio-Flores, P. B. (2020). Physicochemical, thermal, rheological and morphological characteristics of flour and starch from a non-conventional source: *Cucurbita foetidissima* Kunth roots. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00444-x>
- Jang, B. Z.; *Advanced Polymer Composites: Principles and Applications*, ASM International, Materials Park, OH, 1994.
- Kaushik, N., Kaur, B. P., Rao, P. S., & Mishra, H. N. (2014). Effect of high pressure processing on color, biochemical and microbiological characteristics of mango pulp (*Mangifera indica* cv. Amrapali). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 22, 40-50.
- Kwon, S.-J., Chang, Y., & Han, J. (2017). Oregano essential oil-based natural antimicrobial packaging film to inactivate *Salmonella enterica* and yeasts/molds in the atmosphere surrounding cherry tomatoes. *Food Microbiology*, 65, 114-121. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.02.004>
- López-Heras, C. R. (2016). *Regeneración Óptima de los Alimentos*. Ediciones Paraninfo, S.A.
- Lozano, U. J. (2007). *Color: reflexiones*.
- Mc Collieu A., D. J. (1977). *Propiedades mecánicas y térmicas de los materiales*. Reverte.
- Moises, E. A. (s.f.). La industria del plástico y su escenario al 2030 en el Perú .
- Müller, C. M. O., Laurindo, J. B., & Yamashita, F. (2009). Effect of cellulose fibers on the crystallinity and mechanical properties of starch-based films at different relative humidity values. *Carbohydrate Polymers*, 77(2), 293–299. doi:10.1016/j.carbpol.2008.12.030
- Oropeza González, A. I. (2016). Películas biodegradables a base de almidón: propiedades mecánicas funcionales y biodegradación. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*
- Ramos-García, M. L., Bautista-Baños, S., & González-Soto, R. (2018). Propiedades Físicas de Películas de Quitosano Adicionadas con Aceite Esencial de Limón y su Impacto en la Vida. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 17(1), 1-11.
- Rodríguez M.S., V. R. (s.f.). Preservación de tomates con aplicación de capas de quitosano . *Información Tecnológica*, 11(2), 25-31.
- Rodríguez, M. S., V. R. (2000). Preservación de tomates con aplicación de capas de quitosano. *Información Tecnológica*, 25-31.
- Roger Y. Stanier, J. R. (1996). *Microbiología*. Reverte.

- Romero-Bastida, C.A., Zamudio-Flores, P.B., & Bello-Pérez, L.A.. (2011). Antimicrobianos en películas de almidón oxidado de plátano: Efecto sobre la actividad antibacteriana, microestructura, propiedades mecánicas y de barrera. *Revista mexicana de ingeniería química*, 10(3), 445-453.
- Santana, J. S., de Carvalho Costa, É. K., Rodrigues, P. R., Correia, P. R. C., Cruz, R. S., & Druzian, J. I. (2018). Morphological, barrier, and mechanical properties of cassava starch films reinforced with cellulose and starch nanoparticles. *Journal of Applied Polymer Science*, 47001. doi:10.1002/app.47001
- Silva, M. L. H., & Martínez, B. G. (2009). Biopolímeros empleados en la fabricación de envases para alimentos. *Publicaciones e investigación*, 3, 103-129.
- Tirado-Gallegos, J. M., Zamudio-Flores, P. B., Ornelas-Paz, J. d. J., Rios-Velasco, C., Olivas Orozco, G. I., Espino-Díaz, M., . . . Lardizábal-Gutiérrez, D. J. C. (2018). Elaboration and characterization of active apple starch films incorporated with ellagic acid. 8(11), 384.
- Tongdeesoontorn, W., Mauer, L.J., Wongruong, S. *et al.* Effect of carboxymethyl cellulose concentration on physical properties of biodegradable cassava starch-based films. *Chemistry Central Journal* 5, 6 (2011). <https://doi.org/10.1186/1752-153X-5-6>
- Villada, H. S., Acosta, H., & Velasco, R. (2007). Biopolímeros naturales usados en empaques biodegradables. *Temas agrarios*, 12(2), 5-13.
- Warren, F. J., Gidley, M. J., & Flanagan, B. M. (2016). Infrared spectroscopy as a tool to characterise starch ordered structure—a joint FTIR–ATR, NMR, XRD and DSC study. *Carbohydrate Polymers*, 139, 35-42. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.11.066>
- Yao, X., Qin, Y., Zhang, M., Zhang, J., Qian, C., & Liu, J. (2021). Development of active and smart packaging films based on starch, polyvinyl alcohol and betacyanins from different plant sources. *International Journal of Biological Macromolecules*, 183, 358-368. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.04.152>
- Zamudio-Castellanos, G. A. (2014). Aplicaciones de las biopelículas comestibles en la industria alimenticia.
- Zamudio-Flores, P. B., Ochoa-Reyes, E., Ornelas-Paz, J. d. J., Tirado-Gallegos, J. M., Bello-Pérez, L. A., Rubio-Ríos, A., & Cárdenas-Felix, R. G. J. A. (2015). Physicochemical, mechanical, and structural features of oxidized oat and banana starch films enriched with betalains. 49(5), 483-498