

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS



Evaluación de la solubilidad, absorción y migración de un biomaterial compuesto por Polisuccinimida - Microcelulosa/Nanocelulosa (PSI - MC/NC), para el envasado alimentario.

POR

ANTONIA VILLAFAN CORTÉS

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título profesional de:

INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Diciembre 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

**Evaluación de la solubilidad, absorción y migración de un biomaterial
compuesto por Polisuccinimida - Microcelulosa/Nanocelulosa (PSI - MC/NC),
para el envasado alimentario.**

POR

ANTONIA VILLAFAN CORTÉS

TESIS

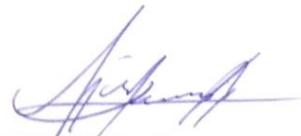
Que se somete a consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial
para obtener el título profesional de:

INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

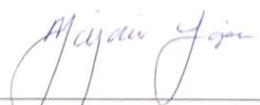
Aprobado por:



Dra. María Hernández González
Presidente



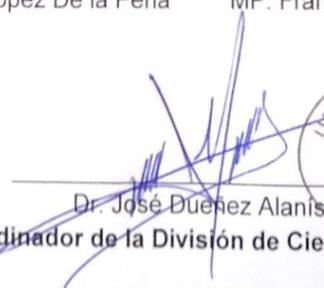
Dra. Ana Margarita Rodríguez Hernández
Vocal



MC. Haydee Yajaira López De la Peña
Vocal



MP. Francisco Hernández Centeno
Vocal Suplente



Dr. José Dueñez Alanís
Coordinador de la División de Ciencia Animal



Saltillo, Coahuila, México, Diciembre 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Evaluación de la solubilidad, absorción y migración de un biomaterial compuesto por Polisuccinimida - Microcelulosa/Nanocelulosa (PSI - MC/NC), para el envasado alimentario.

POR

ANTONIA VILLAFAN CORTÉS

TESIS

Que se 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

Dra. María Hernández González
Director

Dra. Ana Margarita Rodríguez Hernández
Co-director

MC. Haydeé Yajaira López De la Peña
Co-director

MP. Francisco Hernández Centeno
Co-director

Saltillo, Coahuila, México, Diciembre 2021

Declaración de no plagio

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta decir la verdad, que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (copiado y pegado); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia: omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin comillas; utilizar ideas razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar el autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante



Antonia Villafan Cortés

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por darme la fortaleza para no rendirme y así poder concluir esta etapa de preparación profesional, también por permitir que mi familia esté presente en mis logros.

A mi **Alma Mater** por abrirme sus puertas, y enriquecerme con los conocimientos que me ha aportado en mi estancia, por supuesto, por darme las mejores experiencias, gracias a ella conocí a grandes personas.

A la **Dra. María Hernández González** por su apoyo, paciencia, tiempo y conocimientos brindados durante el proceso de la presente investigación, también por sus palabras de aliento.

Al **Dr. Luis Samaniego Moreno** por esas pláticas motivacionales ya que su alegría y contagiosa risa siempre me reanimaban en momentos difíciles, también por brindarme su apoyo y amistad incondicional.

A **CIQA (Centro de Investigación en Química Aplicada)** por su apoyo en la realización de esta tesis al facilitar sus instalaciones, laboratorios y equipos de trabajo, en especial al Ing. Rodrigo Cedillo García por su apoyo técnico al usar el microextrusor en planta piloto, a la Dra. Yolanda Ortega Ortega igualmente por su apoyo técnico en las pruebas realizadas en el laboratorio de Agrobiotecnología, al Dr. Uriel Alejandro Sierra Gómez y al Ing. Jesús Alfonso Mercado Silva por su apoyo técnico en las pruebas realizadas en el Laboratorio Nacional de Materiales Grafénicos.

A mis **amigos y compañeros** (Ali Montserrat Díaz Gálvez, Luz Elena Rodríguez Garibay, Danery Lilian Camargo Gutiérrez, Dulce Cristina Mendoza Bravo, Jorge Rodríguez Noriega, Ignacio Antonio Hernández Pérez, Saúl Romero Juárez, José Manuel Morales Xicoténcatl) por ser parte de esta gran aventura, por convertirse en mi segunda familia y por todas las experiencias, además del apoyo incondicional.

DEDICATORIAS

A mis padres:

Antonio Villafan López, a ti padre por enseñarme a luchar por los mis sueños, a ser una persona responsable, a respetar a los demás, por guiarme y demostrarme que trabajando constantemente se pueden lograr muchas cosas y sobre todo a ser una persona honrada.

Maricela Cortez Álvarez, a ti madre por la educación que me diste, tu apoyo incondicional y por brindarme la confianza para poder reír o llorar en tus brazos, por tus palabras de aliento y por motivarme a realizar las cosas, pero sobre todo a concluir las, sobre todo por enseñarme a no ser conformista.

A mis hermanos:

Maricruz Villafan Cortez, Bernardo Antonio Villafan Cortez, Kevin Villafan Cortez, porque durante nuestro crecimiento hasta la fecha tenemos una buena comunicación y sobre todo apoyo, porque a pesar de cualquier problema estamos unidos. Su cariño y lealtad es fundamental para mí.

A mis sobrinos:

Dylan Gael Díaz Villafan e Ivanna Mikela Villafan Juárez, por la alegría que le aportan a mi vida, por sus innumerables travesuras, por su inocencia.

A mi gran amor:

Jesús Emmanuel Salazar Morales, por formar parte de mi vida y demostrarme tu apoyo incondicional, siempre me motivas a cumplir mis metas y te preocupas por mi bienestar, por eso y muchas cosas más tienes todo mi cariño.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	5
DEDICATORIAS	6
ÍNDICE GENERAL	7
ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE TABLAS	10
ÍNDICE DE ECUACIONES	11
RESUMEN	12
I. INTRODUCCIÓN	13
II. JUSTIFICACIÓN	16
III. HIPÓTESIS	17
IV. OBJETIVOS	18
4.1. Objetivo general	18
4.2. Objetivos específicos	18
V. MARCO DE REFERENCIA	19
5.1 Biomateriales y materiales biobasados	19
5.1.1 Definición y usos	19
5.1.2 Ventajas y desventajas de su uso	20
5.1.3 Fuentes	20
5.1.3.1 Péptidos	22
5.1.3.1.1 Polisuccinimida	23
5.1.3.2 Carbohidratos	23
5.1.3.2.1 Fibras de lechuguilla	25
5.1.3.2.1.1 Microcelulosa (MC) y Nanocelulosa (NC)	26
5.2 Envases biobasados	27
5.2.1 Envases inteligentes	28
5.2.2 Envases activos	29
5.2.3 Fenómenos de interacción envase-alimento	30
5.2.3.1 Fenómenos de migración	30
5.2.3.2 Fenómenos de absorción	31

5.2.3.3 Fenómenos de solubilidad.....	32
VI. MATERIALES Y MÉTODOS.....	33
6.1. Etapa 1: Obtención de materiales base.....	34
6.2. Etapa 2: Elaboración de probetas.....	36
6.3. Etapa 3: Evaluación de la solubilidad	38
6.4. Etapa 4: Pruebas de absorción.....	39
6.5. Etapa 5: Pruebas de migración.....	39
VII. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	41
7.1. Etapa 1: Obtención de materiales base.....	41
7.2. Etapa 2: Elaboración de probetas.....	45
7.3. Etapa 3: Evaluación de la solubilidad	46
7.4. Etapa 4: Pruebas de la absorción.....	49
7.5. Etapa 5: Pruebas de migración.....	52
VIII. CONCLUSIONES.....	61
IX. BIBLIOGRAFÍA.....	62
X. ANEXOS	66
<i>Anexo 1. Medias del porcentaje de solubilidad</i>	<i>66</i>
<i>Anexo 2. Medias del porcentaje de remanente</i>	<i>67</i>
<i>Anexo 3. Medias del incremento de longitud</i>	<i>67</i>
<i>Anexo 4. Medias del incremento de espesor</i>	<i>68</i>
<i>Anexo 5. Medias del incremento de peso.....</i>	<i>68</i>
<i>Anexo 6. Espectros de la migración en agua al tiempo inicial (a), 6h (b),12h (c), 24h (d), 48h (e), 168h (f), 336h (g), 504h (h) y 672h (i).....</i>	<i>69</i>
<i>Anexo 7. Espectros de la migración en etanol 93% al tiempo inicial (a), 6h (b),12h (c), 24h (d), 48h (e), 168h (f), 336h (g), 504h (h) y 672h (i).....</i>	<i>70</i>
<i>Anexo 8. Espectros de la migración en isooctano al tiempo inicial (a), 6h (b),12h (c), 24h (d), 48h (e), 168h (f), 336h (g), 504h (h) y 672h (i).....</i>	<i>71</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los polímeros biobasados y biodegradables según su origen.....	21
Figura 2. Fabricación de plásticos biobasados.....	28
Figura 3. FTIR de la PSI.....	41
Figura 4. FTIR de la MC.....	42
Figura 5. FTIR de la NC.....	43
Figura 6. FTIR del AEO.....	43
Figura 7. FTIR de los CT.....	44
Figura 8. FTIR de las 4 mezclas.....	45
Figura 9. Porcentaje medio de solubilidad de las probetas.....	47
Figura 10. Porcentaje medio de remanente de las probetas.....	48
Figura 11. Medias de la longitud de las probetas a 2h de contacto en una atmósfera saturada de humedad.....	49
Figura 12. Medias del espesor de las probetas a 2h de contacto en una atmósfera saturada de humedad.....	50
Figura 13. Medias del peso de las probetas a 2h de contacto en una atmósfera saturada de humedad.....	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Aspectos positivos y negativos de los biobasados.	14
Tabla 2. Clasificación de carbohidratos según su número de monómeros, carbonos e identidad de grupos funcionales.	24
Tabla 3. Lista de simulantes de alimentos para pruebas de migración.	31
Tabla 4. Equipos, materiales y reactivos utilizados durante el experimento.	33
Tabla 5. Formulaciones para la elaboración de las probetas.	37
Tabla 6. Condiciones del micro compounder.	37
Tabla 7. Intervalos de tiempo de agitación.	39
Tabla 8. Medias de áreas de las diferentes bandas presentes en el agua como líquido simulante a diferentes intervalos de tiempo.	53
Tabla 9. Medias de áreas de las diferentes bandas presentes en el etanol como líquido simulante a diferentes intervalos de tiempo.	56
Tabla 10. Medias de áreas de las diferentes bandas presentes en el isooctano como líquido simulante a diferentes intervalos de tiempo.	58

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación para calcular %residuo	38
Ecuación 2. Ecuación para calcular el %solubilidad	39

RESUMEN

El uso de materiales más amigables con el ambiente como los polímeros biodegradables, se ha visto como una estrategia para minimizar el impacto ambiental negativo que producen los empaques no biodegradables. Los materiales sostenibles se pueden complementar con la nanotecnología y desarrollar empaques activos.

La presente investigación tiene como objetivo determinar el índice de solubilidad, absorción y migración de un biomaterial compuesto PSI-MC/NC, para el envasado alimentario. Para analizar el desempeño de la microcelulosa y nanocelulosa se elaboraron 4 probetas: MC-TC, MC-T, NC-TC y NC-T, a las cuales se les realizaron pruebas de solubilidad), absorción de agua y, migración.

La probeta más soluble fue la de MC-T dejando un remanente de 17.544% por lo tanto se solubilizó un 82.456%, en lo referente a absorción de agua, la muestra que obtuvo la más alta capacidad fue la MC-T y la que menos agua absorbió fue la NC-TC. En cuanto a la migración se detectó que las probetas son solubles en solventes polares y medianamente polares como el agua y el etanol, encontrándose la máxima migración de los grupos OH a las 24 h de almacenamiento, a diferencia del isooctano que es un solvente apolar donde la migración de grupos OH fue de escasa a nula y la migración de los anillos aromáticos alcanzó su máximo valor a las 168 h. Mediante la aplicación de nanotecnología se abren nuevas posibilidades para mejorar las propiedades de los biomateriales, en este caso el material estudiado consiste en una matriz biopolimérica reforzada con fibra que tiene una dimensión de escala micro y nanométrica, por lo tanto, lo repercute en su notable capacidad de solubilidad, absorción de agua y migración en líquidos simulantes de naturaleza polar.

Palabras clave: polisuccinimida, nanocelulosa, migración, aceite esencial de orégano, microcelulosa.

I. INTRODUCCIÓN

El envasado de alimentos protege y preserva la calidad del producto alimenticio, favoreciendo de esta manera a las cadenas de valor alimentarias y limitando el desperdicio de alimentos. Los polímeros, es decir, los materiales plásticos, se han utilizado abundantemente como materiales de envasado durante muchas décadas, se producen a partir de recursos fósiles y el uso de ellos está relacionado con sus propiedades y costos relativamente bajos, pero tienen el inconveniente de estar hechos de recursos no renovables, no son biodegradables y, en muchos casos, no son totalmente reciclables. El consumo intensivo de dichos materiales colabora con el agotamiento de los recursos naturales, la generación de basura y por ende el calentamiento global (Nilsen *et al.*, 2021).

Las tecnologías de procesamiento de alimentos son de ayuda para preservar las cualidades de los alimentos pues prolongan la vida útil y garantizan la seguridad alimentaria. El procesamiento a alta presión, microondas, ultrasonido, campo eléctrico pulsado, luz ultravioleta, han recibido atención en respuesta a la creciente demanda de los consumidores de productos seguros, mínimamente procesados y de valor agregado porque el procesamiento térmico tradicional, representa una huella ambiental relativamente alta (alto uso de energía) y efectos indeseables en los alimentos como pérdidas nutricionales (vitaminas) y sensoriales (cambio de textura, color y sabor) (Nilsen *et al.*, 2021).

Una alternativa es utilizar recursos sostenibles y renovables para producir envases biobasados, como la biomasa, en lugar de recursos derivados de la petroquímica. Los polímeros de base biológica son también llamados polímeros renovables y están ganando cada vez más atención en el mundo académico e industrial. Además, tienen el atributo de ser materiales ecológicos, sin embargo, la demanda de polímeros de base biológica sigue siendo baja y el PET sigue siendo el más utilizado en el campo del envasado de alimentos, a pesar del gran interés en estos materiales “verdes”, la Tabla 1 muestra los aspectos positivos y negativos sobre el uso y desarrollo de los envases biobasados (Siracusa & Lotti, 2018).

Tabla 1. Aspectos positivos y negativos de los biobasados.

Aspectos positivos	Aspectos negativos
<ul style="list-style-type: none">• uso de recursos renovables• preservar los recursos fósiles y reducir las importaciones de petróleo• uso de excedentes o desperdicios de alimentos de países industrializados• uso de desechos agrícolas y forestales• biodegradación• sin toxicidad• sin peligro para la salud	<ul style="list-style-type: none">• competencia con la producción de alimentos• aumento de los costos de los alimentos• deforestación y conversión de pastizales• uso de plantas transgénicas y bacterias modificadas genéticamente• uso de biomasa excesiva.

(Siracusa & Lotti, 2018)

La demanda de los consumidores ahora incluye envases activos e inteligentes, estos sistemas de envasado interactúan y responden a su entorno donde liberan algunas sustancias o las eliminan del espacio interior del envasado y prolongan la vida útil de los productos alimenticios, otra cualidad es que este envase es innovador y además mejora la imagen y la aceptabilidad del producto en general, ya que las sustancias que se encuentren en dicho material podrían transferirse a los alimentos al entrar en contacto durante el envasado; esta transferencia de compuestos entre los alimentos y los envases se denomina migración, pero una desventaja de este fenómeno interactivo es que podría causar alteraciones en la calidad y también en la seguridad de los alimentos, y el sabor puede cambiar debido a la absorción de aroma y la transferencia de componentes indeseables del material de envasado a los alimentos. Comprender el mecanismo de migración es importante para evaluar el deterioro de los alimentos cuando se utilizan envases a base de polímeros sintéticos, pero no necesariamente la interacción entre los alimentos y el envasado es perjudicial, ya que las interacciones también pueden dar lugar a resultados deseables. Para diseñar un sistema de envasado de alimentos adecuado, se evalúa el tipo de polímero, el método de preparación y la relación entre el contenido de polímero y el alimento para ayudar a definir el nivel de

interacción del alimento y el empaque, además, se deben considerar los métodos de procesamiento, así como el tiempo y la temperatura durante el almacenamiento de alimentos (Alamri *et al.*, 2021).

Con base a la información anterior, en la presente investigación se pretende evaluar y determinar el índice de solubilidad, absorción y migración de un biomaterial compuesto por polisuccinimida reforzado con microcelulosa o nanocelulosa para el envasado alimentario.

II. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, la contaminación causada por los envases desechados por la industria alimentaria es un problema ya que estos se elaboran a partir de productos petroquímicos como el tereftalato de polietileno (PET), el cual no es biodegradable por lo que impacta de manera negativa al medio ambiente. En suma, ha crecido el interés por parte de los consumidores a exigir productos alimentarios con características más cercanas a lo natural, con menos aditivos sintéticos y que las tecnologías de conservación no afecten sus características nutricionales, fisicoquímicas y organolépticas.

En respuesta a esta problemática se ha generado el interés por desarrollar polímeros a partir de materiales biodegradables para reducir la producción de materiales sintéticos no biodegradables, también se busca añadir propiedades activas en los sistemas de envasado para alargar la vida útil de los alimentos, mejorar la inocuidad y mantener la calidad del producto. Dentro de la amplia gama de tipos de envasado activo, el de propiedades antimicrobianas reduce el riesgo de la presencia de microorganismos patógenos en los alimentos.

Por lo tanto, implementación de biomateriales biocompatibles y biodegradables en matrices poliméricas para envasado activo es una forma prometedora de materiales amigables con el medio ambiente, aunado a esto, la incorporación de agentes antimicrobianos, para obtener un envase más integral que pueda reducir la problemática antes mencionada.

III. HIPÓTESIS

El biocompósito PSI-MC-NC presentará propiedades de migración, solubilidad y absorción que lo hacen apropiados para el envasado alimentario.

El biocompósito PSI-MC-NC no presentará propiedades de migración, solubilidad y absorción que lo hacen apropiados para el envasado alimentario.

IV. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Determinar el índice de solubilidad, absorción y migración de un biomaterial compuesto PSI-MC/NC, para el envasado alimentario.

4.2. Objetivos específicos

- Elaborar el biomaterial PSI-MC/NC.
- Determinar el índice de solubilidad de un biomaterial PSI-MC/NC.
- Determinar el índice de absorción de un biomaterial PSI-MC/NC.
- Determinar el índice de migración de un biomaterial PSI-MC/NC.

V. MARCO DE REFERENCIA

5.1 Biomateriales y materiales biobasados

No cualquier material puede ser empleado como biomaterial: debe ser biocompatible, y esa es la característica común de todos los biomateriales. Hasta hace relativamente poco tiempo, los biomateriales eran esencialmente materiales industriales seleccionados con el criterio de que fueran capaces de cumplir requisitos de biocompatibilidad, pero actualmente muchos de ellos son diseñados, sintetizados y procesados con el único fin de tener una aplicación en el campo deseado, por ello la ciencia de los biomateriales ha sufrido un gran impulso, potenciándose su investigación, esto condujo a la aparición de una nueva disciplina científico-tecnológica, denominada Ciencia de los Biomateriales (Duffó, 2012).

5.1.1 Definición y usos

Biomaterial es cualquier sustancia o combinación de sustancias de origen natural o artificial, que puede ser usada durante cierto tiempo como un todo o como parte de un sistema que permite tratar, aumentar o reemplazar algún tejido, órgano o función del cuerpo humano. Los biomateriales son empleados en distintos contextos y cada uno de ellos asociado a algún tipo de aplicación particular, y los avances en la ciencia y tecnología han permitido emplear a todos los materiales disponibles (metales, cerámicos, polímeros artificiales, materiales compuestos, etc.) bajo todas las formas concebibles y se han desarrollado enormes cantidades de materiales sintéticos que tienen la virtud de poder ser sintetizados a bajo costo (Duffó, 2012).

Se han desarrollado biomateriales que se utilizan en la medicina cardiovascular como válvulas sustitutas para el corazón, stents endovasculares, implantes vasculares y marcapasos, en cuestiones ortopédicas se utilizan como reemplazos de articulaciones y platos óseos, cementos para huesos, ligamentos y tendones artificiales; en aplicaciones dentales como implantes, amalgamas y resinas; en suturas y adhesivos tisulares; en aplicaciones oftalmológicas como lentes de contacto y lentes intraoculares; en prótesis cocleares; en órganos artificiales extra-corporales; como sustitutos de piel; en bio-electrodos. En aplicaciones diagnósticas in vitro e in vivo; en sistemas de liberación controlada de fármacos; para la ingeniería

funcional de tejidos y la medicina regenerativa, entre muchas otras aplicaciones (Wong, 2019).

Los materiales basados en recursos renovables están siendo desarrollados para el envasado de alimentos, aunque se utilizan a gran escala los basan en la celulosa, pero los materiales a base de proteínas, almidón, polilactato y otros recursos renovables pueden ser los materiales de envasado de alimentos del mañana, algunos ejemplos son la aplicación en frutas y verduras de alta respiración, quesos, jugos, etc (Weber *et al.*, 2010).

5.1.2 Ventajas y desventajas de su uso

Las ventajas de utilizar material de base biológica están relacionadas con la gestión de residuos, por ejemplo, el ahorro de recursos no renovables, los estudios de materiales base biológica muestran el potencial de futuros materiales sostenibles, además de que reducen el uso de recursos fósiles (Geigrich, 2003).

Los materiales de base biológica y biodegradables tienen propiedades de barrera al vapor de agua, propiedades mecánicas, estabilidad térmica y propiedades de procesamiento pobres en comparación con sus contrapartes (origen fósil), es por ello que es un desafío lograr que obtengan propiedades mecánicas y de barrera adecuadas sin comprometer su biodegradabilidad para no limitar su aceptación y uso generalizados, para ello el método de reticulación se utiliza para mejorar las propiedades de los biomateriales, esto implica la formación de enlaces químicos entre diferentes cadenas de polímeros, ya sea intra o intermolecularmente, produciendo redes tridimensionales más fuertes y unidas más estrechamente. El tipo de reticulación a menudo se clasifica según el tipo de enlace, tipo de interacción (covalente, iónico, van der Waals o enlaces H) o según el modo de acción: químico, físico o enzimático. (Nilsen *et al.*, 2021).

5.1.3 Fuentes

En general, los materiales de base biológica se pueden dividir en tres categorías principales según su origen y producción (Weber *et al.*, 2010).

Categoría 1: Polímeros extraídos / eliminados directamente de la biomasa. Algunos ejemplos son los polisacáridos como el almidón y la celulosa y las proteínas como la caseína y el gluten.

Categoría 2: Polímeros producidos por síntesis química clásica utilizando monómeros de base biológica renovables. Un buen ejemplo es el ácido poliláctico, un biopoliéster polimerizado a partir de monómeros de ácido láctico.

Categoría 3: Polímeros producidos por microorganismos o bacterias modificadas genéticamente. Hasta la fecha, este grupo de polímeros de base biológica se compone principalmente de polihidroxiácido, pero se están desarrollando otros biopolímeros, como la celulosa bacteriana.

En la Figura 1 se muestra un esquema de la clasificación de polímeros biobasados y biodegradables.

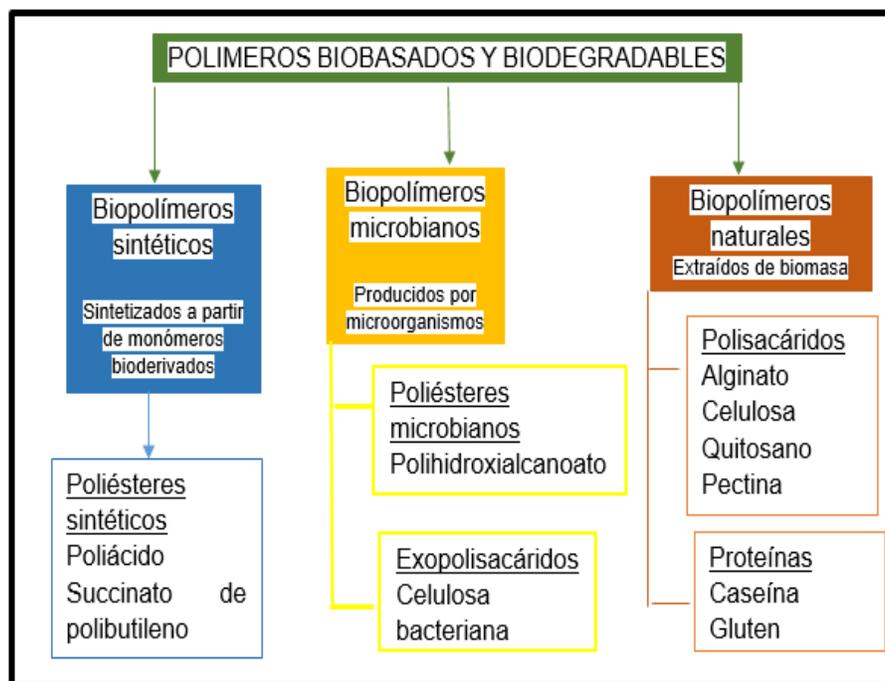


Figura 1. Clasificación de los polímeros biobasados y biodegradables según su origen.

(Nilsen *et al.*, 2021)

5.1.3.1 Péptidos

Los péptidos se pueden definir como pequeños fragmentos aislados de proteínas, que regularmente constan de 2 a 20 aminoácidos unidos entre sí por enlaces peptídicos y generalmente se pueden dividir en péptidos endógenos y péptidos exógenos según sus diferentes fuentes. Los péptidos bioactivos son derivados directa o indirectamente de las proteínas alimentarias, son muy seguros y fáciles de producir industrialmente, por lo que actualmente reciben una atención especial. El desarrollo de péptidos con ingredientes funcionales es una estrategia innovadora para alimentos funcionales, nutracéuticos y farmacéuticos. Las complejas estructuras biológicas y las diversas funciones de los péptidos residen principalmente en su composición de aminoácidos, número, orden de disposición y estructura espacial de la cadena peptídica (YANG *et al.*, 2021).

Los péptidos pueden ser liberados de la proteína nativa por acción de enzimas proteolíticas durante el procesamiento de alimentos, o por acción de enzimas gastrointestinales una vez ingeridas. Los péptidos pueden ser activos en los alimentos y su bioactividad se basa en su composición y secuencia de aminoácidos ya que muchos péptidos se encuentran en fuentes animales, vegetales y productos de desechos agroindustriales, este último representa una fuente relativamente económica para obtener o producir péptidos (Domínguez *et al.*, 2020).

Los péptidos bioactivos, que son secuencias biológicamente activas de residuos de aminoácidos de proteínas que están unidas por enlaces peptídicos, exhiben actividades antiproliferativas, antimutagénicas, antiinflamatorias, anticoagulantes, de unión a minerales, antioxidantes, antihipertensivas y antimicrobianas, que pueden ayudar en muchas enfermedades y también se consideran reguladores que pueden prevenir la oxidación y la degradación microbiana en los alimentos. En los últimos años se ha informado de varios péptidos bioactivos presentes de forma natural, o producidos, a partir de proteínas alimentarias de diferentes orígenes (de organismos animales, vegetales o marinos), los recursos vegetales han mostrado un interés creciente en comparación con los recursos animales, esto se explica por su producción más sostenible y ecológica, y también por su buena imagen para el consumidor (Durand *et al.*, 2021). De entre los péptidos que a últimas fechas ha

captado la atención por sus características de biocompatibilidad y biodegradabilidad está la polisuccinimida.

5.1.3.1.1 Polisuccinimida

La polisuccinimida es un nuevo tipo de biopolímero biodegradable, inocuo y amigable con el medio ambiente, reconocido como un material verde y es aplicado ampliamente en algunas áreas como la agrícola, médica, petrolera y de tratamiento de agua. El poliácido aspártico es un poliaminoácido compuesto por unidades de aminoácidos unidos por un enlace amida, además es un polímero lineal y flexible que contiene grupos carboxílicos hidrofóbicos, y estos le otorgan la característica de ser hidrosoluble. Los grupos carboxílicos de este polímero están cargados negativamente, esto le permite actuar como agente quelante con diferentes iones metálicos y también interactúa por gelación ionotrópica con polímeros cargados positivamente. El ácido L-aspártico es un aminoácido no esencial y se puede producir por síntesis química o biológica. La polisuccinimida permite hacer el entrecruzamiento con otros biomateriales con los cuales es altamente compatible gracias a su origen biológico (Ángel, 2019).

La polisuccinimida es un polímero de desarrollo relativamente reciente, su biocompatibilidad es altamente sugerida, es insoluble en agua susceptible a la degradación enzimática en condiciones fisiológicas, además este polímero se puede funcionalizar fácilmente debido al grupo imida del monómero, que se ha demostrado que reacciona con moléculas nucleofílicas incluso en condiciones suaves (Voniatis *et al.*, 2020).

En otro orden de biomoléculas ampliamente estudiadas como biomateriales se encuentran diversos tipos de carbohidratos.

5.1.3.2 Carbohidratos

Los carbohidratos son moléculas con tres o más átomos de carbono que se componen únicamente de carbono (C), oxígeno (O) e hidrógeno (H), con una fórmula general de $(CH_2O)_n$. De acuerdo con sus propiedades, los carbohidratos también se utilizan como materias primas para la producción de alimentos, aditivos alimentarios, productos farmacéuticos, biocombustibles, papel, materiales de

construcción, textiles y diversos productos químicos. Los carbohidratos se clasifican según sus estructuras químicas (Tabla 2). Muchos carbohidratos son polímeros o polisacáridos, compuestos de monómeros llamados monosacárido, un disacárido es un dímero de dos monosacáridos y un oligosacárido es un polímero de varios monosacáridos. Los monosacáridos y disacáridos también se conocen comúnmente como azúcares (Weselake *et al.*, 2018).

Tabla 2. Clasificación de carbohidratos según su número de monómeros, carbonos e identidad de grupos funcionales.

Clasificación	Número de monómeros	Ejemplo
Monosacáridos	1	Glucosa, Fructuosa
Disacáridos	2	Maltosa, Lactosa
Oligosacáridos	3-20	Rafinosa
Polisacáridos	>20	Almidón, Celulosa
Clasificación	Grupo funcional	Ejemplo
Aldosa	Aldehído	Glucosa, Manosa
Cetosa	Cetona	Fructuosa, Ribulosa
Clasificación	Número de carbonos	Ejemplo
Pentosa	5	Arabinosa, Xilosa
Hexosa	6	Glucosa, Fructuosa

(Weselake *et al.*, 2018)

Los carbohidratos obtenidos de plantas han generado interés como fuente de productos industriales debido al agotamiento de los recursos basados en combustibles fósiles y la amenaza del calentamiento global. Los carbohidratos vegetales tienen el potencial de proporcionar sustitutos renovables para las materias primas de origen fósil y, como ventaja adicional, su biosíntesis consume grandes cantidades de dióxido de carbono (Weselake *et al.*, 2018).

Los carbohidratos son biomoléculas ampliamente disponibles en todas las formas de vida y cumplen una gran cantidad de funciones. Por sus características estructurales, los carbohidratos se pueden organizar en polímeros largos y, a

diferencia de los nucleótidos y los aminoácidos, pueden formar ramas fácilmente. Dicha flexibilidad estructural se debe a los diferentes modos de unión posibles entre carbohidratos, que pueden formar enlaces glicosídicos entre varias posiciones después de una reacción de deshidratación. Para síntesis, modificación o degradación, existen muchas enzimas que tienen carbohidratos como sustratos naturales. Una vez que exista una catálisis enzimática, los carbohidratos pueden transferirse a aceptores, modificarse en su estructura, polimerizarse o hidrolizarse (Savino & Fraaije, 2020).

5.1.3.2.1 Fibras de lechuguilla

La lechuguilla *Agave lechuguilla* Torr. es una planta nativa de las zonas áridas y semiáridas de México y sur de los Estados Unidos, su área de distribución abarca los estados de Coahuila, Chihuahua, Nuevo León, Durango, San Luis Potosí, Tamaulipas y Zacatecas. La fibra de lechuguilla tradicionalmente se obtiene del cogollo, el cual lo integran las hojas más tiernas de la planta, que están agrupadas al centro de ésta y de ahí se obtiene la fibra de mejor calidad y de mayor valor comercial, para ello existen dos métodos para la extracción de la fibra: el tallado a mano y el tallado a máquina. El tallado consiste en separar la fibra de la parte carnosa o parénquima de la hoja, se separa el tejido o “guishe” de la fibra y esta actividad se conoce comúnmente como “despunte”, esta operación se realiza hoja por hoja a unas ocho pencas para juntar las fibras y enredarlas en un bolillo de menor diámetro para proceder a tallar una por una todas las partes troncales del cogollo, es decir la base de la hoja; este último proceso se conoce como “destronque”. Finalmente, la fibra se extiende en capas delgadas y se deja secar al sol por un período de 2 a 3 horas. En la extracción mecánica de la fibra de lechuguilla, para lograr el desfibrado de las hojas, los cogollos se introducen a través de un hueco de una caja donde se encuentra girando un rodillo, en este proceso los clavos van separando los tejidos de la fibra. Los cogollos se meten en la máquina en el siguiente sentido: primero las puntas y luego la base del cogollo (Castillo *et al.*, 2005).

La lechuguilla es una fuente excelente de fibra dura, de alta resistencia y durabilidad, es altamente resistente a solventes químicos, calor, ácidos y productos abrasivos como ácidos diluidos y concentrados, alcoholes, destilados de petróleo, es resistente en agua a altas temperaturas (en una exposición continua de hasta 150°C); tiene una alta retención de líquidos. Dado que absorbe 65% más de agua que las fibras sintéticas, posee una única aspereza de su superficie debido a los cristales de oxalato de calcio incrustados en la misma; por lo tanto, por sus características no existe en la actualidad un sustituto sintético para la fibra de lechuguilla y dada su versatilidad de uso y bajo costo, se puede emplear tanto en la industria, comercio y uso doméstico. A nivel industrial la fibra se emplea para la elaboración de brochas para maquillaje; y como sustituto de las cerdas para la fabricación de cepillos industriales y para albañilería, entre otros; estos productos se elaboran tanto por empresas nacionales como internacionales (Castillo *et al.*, 2005).

5.1.3.2.1.1 Microcelulosa (MC) y Nanocelulosa (NC)

La microcelulosa o celulosa microcristalina (MCC) es un derivado de la α -celulosa despolimerizada la cual tiene un tamaño micrométrico, se produce a partir de celulosa mediante una combinación de procesos: químico y mecánico. Se caracteriza por ser un polvo blanco y fino, inodoro, inerte, insoluble en agua, en solventes orgánicos y ácidos diluidos, pero parcialmente soluble en álcalis diluidos (Romero *et al.*, 2014).

La nanocelulosa es un material celulósico con una dimensión nanométrica, como material abundante, comparte la estructura química inherente de la celulosa con abundantes grupos hidroxilo y una cierta cantidad de grupos aldehídos y grupos carboxi para una mayor funcionalización. Debido a la nanoestructura del material este presenta un amplio espectro de aplicaciones en diferentes áreas. Debido a las características como no toxicidad, la biocompatibilidad, la alta capacidad de absorción y retención del agua y excelentes propiedades mecánicas, la nanocelulosa tiene un enorme potencial para ser utilizada ampliamente en biomedicina, alimentos, cosméticos, envases (Yu *et al.*, 2021).

En virtud de las diversas opciones de biomateriales, se presenta la panorámica adecuada para el desarrollo de diversos productos demandados por la sociedad actual para satisfacer las necesidades en diversas áreas como lo son la médica, cosmética, alimentaria, entre otras, a fin de contribuir a mitigar los problemas medioambientales generados por el excesivo consumo de productos empleados en la vida cotidiana.

5.2 Envases biobasados

Los envases de base biológica o biobasados se obtienen a partir de biomasa vegetal o de madera (almidón, celulosa, hemicelulosa, lignina) o aceite vegetal. Los plásticos de base biológica se derivan de materiales de base biológica y pueden (o no) ser biodegradables porque la biodegradabilidad no depende del origen de las materias primas sino de su composición química. Los plásticos se pueden clasificar en cuatro tipos con respecto a si son o no biodegradables y la fuente de la materia prima utilizada para fabricarlos. Estos cuatro tipos son 1) plásticos convencionales derivados de la petroquímica y no biodegradables, 2) derivados de la petroquímica y biodegradables, 3) biobasados pero no biodegradables y 4) biobasados y biodegradables, en este sentido en la tercera categoría se incluyen polímeros obtenidos a partir de recursos renovables pero que no son biodegradables debido a su estructura química, entre ellos se encuentran los derivados polisacáridos, como el acetato de celulosa utilizado como película, no biodegradable en el medio ambiente pero obtenido a partir de la celulosa, que es un polisacárido natural. Recientemente, los polímeros obtenidos a partir de monómeros procedentes de recursos renovables están ganando mucha más atención. La cuarta categoría incluye polímeros de base biológica y biodegradables como el PLA que se obtiene de la polimerización del ácido láctico, obtenido de la fermentación de la glucosa, extraído del almidón de maíz o de la caña de azúcar, esos polímeros han ganado el atributo de polímeros de base biológica ecológicos. En estas dos últimas categorías, son en realidad las que están bajo mayor consideración, con el fin de crear una sociedad sostenible y mejorar los problemas medioambientales y de gestión de residuos (Siracusa & Lotti, 2018).

Los envases biobasados necesitan de etapas previas de procesamiento químico antes de su utilización. Esto puede ocurrir a partir de 2 procesos: El procesamiento químico de algún componente extraído de plantas para después transformarlo y obtener los monómeros que darán origen al plástico. La extracción de precursores y monómeros que se generan como forma de almacenamiento de energía en el interior de las células de algunas plantas y microorganismos (Vazquez & Perez, 2016). Lo anterior es representado en la Figura 2.

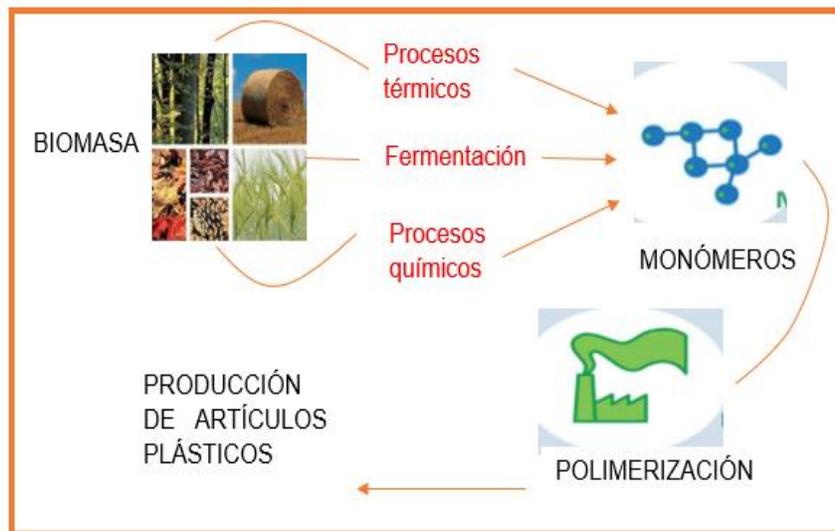


Figura 2. Fabricación de plásticos biobasados

(Vazquez & Perez, 2016)

5.2.1 Envases inteligentes

El envasado inteligente se basa en la asociación intencional del alimento con su envase para mejorar la calidad y la seguridad de los alimentos, este envasado está vinculado con el avance de los reguladores de tiempo y temperatura, monitores de madurez, biosensores e indicadores, es por ello que el empaque inteligente da una señal para que se pueda percibir y evaluar la frescura de los alimentos y así proporcionar una idea sobre el estado de las propiedades del alimento. Las funciones que lleva a cabo el envase inteligente es monitorear las condiciones internas y externas (cambios dentro y fuera del empaque) y evaluar la calidad del alimento que contiene mediante el uso de indicadores para la seguridad y calidad del alimento (Majid *et al.*, 2018).

El envasado inteligente es un sistema que le entrega al consumidor información útil de las propiedades y/o estado del alimento envasado, su procesamiento, calidad, manejo, transporte y/o almacenamiento. En otras palabras, un envase inteligente se comunica con el consumidor por su habilidad de detectar o grabar cambios en el producto o su ambiente. Una gran variedad de sensores han sido desarrollados para informar la condición del alimento, estos sensores se basan en reacciones químicas, enzimáticas o mecánicas y se pueden colocar dentro o fuera del envase para detectar y comunicar condiciones e historia de temperatura y tiempo, niveles de CO₂ y O₂, deterioro o filtración del envase, frescura y madurez, crecimiento microbiano (Tapia, 2017).

5.2.2 Envases activos

Los envases activos tienen el fin de prolongar la vida de almacenamiento y mejorar la seguridad alimentaria, además se utiliza como sustituto de las técnicas convencionales de procesamiento en alimentos. El principio de estos envases depende del componente incorporado dentro de la matriz polimérica y de las características del propio polímero como vehículo de envasado, las matrices tienen el potencial de liberar agentes activos de manera controlada (antimicrobianos y antioxidantes) y retener compuestos (etileno, oxígeno y agua) durante periodos prolongados de almacenamiento. En el sistema del envasado la elección del agente activo requiere ser compatible con el material de envasado y capaz de distribuirse homogéneamente en el envase. El envasado activo también incluye agentes de control de humedad, el más común es el gel de sílice que se utiliza como desecante en el caso de alimentos secos, mientras que, en el caso de alimentos con alto contenido de humedad, se utilizan reguladores de humedad internos. Estos agentes absorbentes de humedad se pueden agregar como paquetes porosos interiores, los reguladores de humedad dentro del paquete actúan disminuyendo la pérdida de humedad, retienen la humedad relativa deseable y disminuyen el contenido de humedad adicional (Majid *et al.*, 2018).

5.2.3 Fenómenos de interacción envase-alimento

La interacción que se da entre el empaque y los alimentos necesita de una especial atención cuando los alimentos entran en contacto con el material de empaque, porque es durante este contacto cuando se produce intromisión de gases, humedad, microorganismos y otros compuestos que puedan afectar la calidad, seguridad y/o integridad del alimento (Alamri *et al.*, 2021).

Estas interacciones que se dan entre el empaque y el alimento se pueden clasificar de la siguiente manera: migración, permeación de gases y vapor de agua, sorción y/o permeación de vapores orgánicos, transparencia de los empaques alimentarios a la luz (Navia *et al.*, 2014)

5.2.3.1 Fenómenos de migración

La migración es la transferencia de compuestos químicos desde o hacia el empaque y ocurre al entrar en contacto con el alimento. El fenómeno de migración en alimentos envasados puede ocurrir en dos direcciones a la vez, una es del material de envasado al alimento y la otra del alimento al empaque. En el primer proceso, las sustancias de bajo peso molecular del envase se transfieren al alimento, en el segundo proceso la transferencia de color, aroma, sabor y nutrientes del alimento migra hasta el empaque y esto da como resultado un importante impacto en las propiedades organolépticas del alimento (Alamri *et al.*, 2021).

Para mantener la calidad y seguridad de los alimentos se considera los siguientes factores, que determinan el grado de migración: el polímero del empaque, las propiedades físico-químicas del migrante, el tipo del alimento y la duración y temperatura de almacenamiento (Alamri *et al.*, 2021).

Se considera a la migración como un proceso en el que los polímeros pueden difundirse a través de la matriz polimérica hacia la superficie. La difusión es considerada uno de los principales mecanismos de migración de los compuestos químicos de los materiales del envasado alimentario (Arvanitoyannis & Bosnea, 2004).

El producto que imita el comportamiento de un alimento o grupo de alimentos es llamado simulante alimentario. Ya que los alimentos tienen una alta complejidad y

tienen una gran variedad de condiciones de contacto con los envases se han establecido ciertas sustancias que se pueden utilizar con el fin de determinar la migración. Cuando no es posible usar ninguno de los simulantes grasos, se permite el uso de isoocetano, etanol al 95 % u óxido de polifenileno (Navia *et al.*, 2014).

La Directiva 85/572/CEE define las condiciones de prueba relevantes para las condiciones de uso previstas y enumera los simulantes alimentarios para su uso con las pruebas de migración (Tabla 3).

Tabla 3. Lista de simulantes de alimentos para pruebas de migración.

Simulante A	Agua destilada
Simulante B	Ácido acético al 3% p/v en solución acuosa
Simulante C	15% etanol (v/v) en solución acuosa
Simulante D	Aceite de oliva rectificado, aceite de girasol o HB307

(Navia *et al.*, 2014)

La naturaleza de la sustancia migratoria tiene un impacto significativo en el alcance y la tasa de migración. La transferencia de una sustancia altamente volátil ocurre a un ritmo mayor a diferencia de las sustancias con pesos moleculares relativamente más altos que presentan tasas de migración más bajas. Otro factor que afecta el nivel de migración es a microestructura de la sustancia, es decir, la configuración de las moléculas migratorias (las esféricas frente a ramificadas y con o sin cadenas laterales) afecta la migración de manera diferente; por ejemplo, las moléculas ramificadas exhiben tasas de migración más bajas (Alamri *et al.*, 2021).

5.2.3.2 Fenómenos de absorción

La absorción de agua por los materiales compuestos es un proceso de difusión controlada, esta se produce principalmente en la matriz. El agua absorbida puede provocar la desunión de la matriz polimérica o incluso la degradación hidrolítica. La absorción de agua también da como resultado un aumento del peso total.

Cuando las muestras se sumergen en agua, algunos de los componentes, como los monómeros, se disuelven y se filtran fuera de la muestra. La liberación de estos

componentes puede influir en los cambios dimensionales iniciales del composito, el aspecto estético o la biocompatibilidad del material (Mota & Subramani, 2018).

La absorción de humedad o el agua absorbida podría dañar el material de muchas formas: Hinchazón (cambios dimensionales); Disminución de las propiedades mecánicas y físicas (es decir, rigidez, resistencia y dureza). Normalmente, el agua reacciona con la matriz y provoca cambios químicos irreversibles en el material. Las fibras podrían absorber una cantidad significativa de humedad (acción capilar) (Muhamad *et al.*, 2018).

La mayoría de los materiales compuestos y polímeros absorben la humedad. La humedad absorbida afecta en principio a las propiedades mecánicas y muchas otras propiedades importantes de los polímeros y los compuestos a base de polímeros (Aniskevich & Glaskova, 2019).

5.2.3.3 Fenómenos de solubilidad

La solubilidad es la capacidad que tiene un soluto para disolverse, a una temperatura y presión determinada, en una cantidad establecida de disolvente. Además, depende de factores como: la naturaleza del soluto, para un disolvente determinado hay sustancias muy solubles y otras muy poco solubles o insolubles, la naturaleza del disolvente, la temperatura, la presencia de un ion común. La solubilidad de los biomateriales depende de factores como: la composición, el medio y la velocidad de la relación entre estos dos factores, otros materiales como los polímeros, pueden absorber agua de las soluciones y liberar componentes solubles (Espinel, 2014).

La solubilidad es una prueba que predice el tiempo que tardara en desintegrarse un material al entrar en contacto con un medio líquido, así como la capacidad de absorción de agua que está relacionada directamente con la hidrofobicidad de los materiales o la capacidad que tiene para repeler el agua de su superficie, además de absorber o enlazar moléculas de agua a nivel molecular, una mayor solubilidad indica menor resistencia al agua y viceversa y puede expresarse en unidades de concentración: molaridad, fracción molar y como porcentaje (Román *et al.*, 2020).

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se llevó a cabo en los laboratorios de caracterización químico mecánica e inocuidad y empaques del Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro y en el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), ambas instituciones ubicadas en la ciudad de Saltillo, Coahuila.

En la Tabla 4 se hace mención de los equipos, materiales y reactivos que se utilizaron.

Tabla 4. Equipos, materiales y reactivos utilizados durante el experimento.

Equipos	materiales	Reactivos
<ul style="list-style-type: none"> • Balanza analítica (Biobase) • Molino de alta potencia marca El crisol. • Nutribullet • Horno de secado • Potenciómetro (pH) • Parrilla de calentamiento y agitación Thermo Scientific Cimarec • Baño ultrasónico DADI DA-968 • Centrífuga CAPP • Espectrofotómetro FTIR SPECTRUM TWO • Extruder microcompunder • Termoconformadora 	<ul style="list-style-type: none"> • Embudos de vidrio • Espátulas • Matraz Erlen Meyer • Agitadores magnéticos • Vasos de precipitado diferentes tamaños • Papel filtro • Papel pH • Termómetro de mercurio • Frascos de vidrio ámbar 	<ul style="list-style-type: none"> • H₂SO₄ (Ácido sulfúrico) al 98% J. T: Baker • NaOH (Hidróxido de sodio) Jalmex. • NaClO (Hipoclorito de sodio) Analytyca • Agua destilada • Ácido L-Aspártico, SIGMA • HCl (ácido clorhídrico) Fermont • NaHCO₃ (Bicarbonato de sodio) Fermont • Agua desionizada (H₂O) Jalmex • 2,2,4-trimetilpentano (iso-octano) J.T. BAKER • Alcohol etílico absoluto, Jalmex • Almidón soluble, Jalmex • Glicerina

6.1. Etapa 1: Obtención de materiales base

Los materiales base son polisuccinimida, microcelulosa, nanocelulosa, aceite esencial de orégano y cristales de timol. Para la obtención de cada uno de ellos se siguió el procedimiento que se muestra a continuación y al final cada producto fue caracterizado mediante espectroscopía infrarroja por transformadas de Fourier.

Polisuccinimida (PSI)

Se pesa 100 g de ácido L-aspártico y se coloca en un vaso de precipitado. El vaso de precipitado se pone en una parrilla de calentamiento a una temperatura de 250-300°C, se mantiene a esa temperatura hasta que todo el sólido haya cambiado de color a tostado/bronceado o durante dos horas, lo que ocurra primero. Durante el período de calentamiento, se debe usar una varilla de vidrio o una espátula para agitar el contenido del vaso constantemente para evitar que se queme. Cuando se completa el calentamiento, se deja enfriar a temperatura ambiente (Bennett, 2005). Una vez que se ha enfriado, se pesan 3 g del sólido y se colocan en un papel filtro en un embudo sobre un matraz, enseguida es lavado con 5 mL de HCl acuoso al 1%, 5 mL de agua destilada, 15 mL de NaHCO₃ saturado y 5 mL de agua destilada. Se retira el papel filtro y se seca en un horno de secado durante al menos 24 h a 40°C (Bennett, 2005).

Microcelulosa

Para la obtención de microcelulosa las fibras de lechuguilla se acondicionaron poniéndolas a secar a 60°C durante de 6 h para eliminar la humedad residual, el siguiente paso fue reducir el tamaño de las fibras cortándolas con tijeras. Una vez que se acondicionaron las fibras se pusieron en contacto con una solución al 0.45 de ácido sulfúrico al 98%, adicionando 20 mL de esta solución por cada gramo de fibra a procesar para obtener una hidrólisis ligeramente ácida con el fin de eliminar las impurezas en las fibras de lechuguilla, se mantuvieron en agitación constante durante 1 h a una temperatura de 20-23°C. Enseguida se realizaron lavados con agua destilada a través de un embudo de vidrio con papel filtro. Posteriormente se llevó a cabo un proceso de cloración, empleando NaClO al 3.5 %, adicionando 20

mL de esta solución por cada gramo de fibra. La muestra se deja en contacto durante una hora a una temperatura de 30°C. Al terminar este proceso se realiza un nuevo lavado con agua destilada hasta obtener un estado de neutralidad (Isidro, 2019).

En seguida, se hace una extracción alcalina con NaOH al 5%. Se colocó una proporción de 20 mL de solución por cada gramo de fibra, manteniendo en agitación constante por 2 h, a temperatura de entre 60-70°C seguido por un proceso de lavado (4 lavados con agua destilada). Una vez concluida esta extracción se procede al blanqueo mediante el tratamiento con NaClO al 0.5%, para 10 g de fibras se agregó 1 mL de NaClO en 200 mL de agua destilada. Se mantuvo en agitación por 1 h. Para concluir este tratamiento se sometieron las fibras a lavados hasta alcanzar un pH neutro. Las dos etapas finales consisten en el secado y la molienda de los productos obtenidos. Las fibras se disgregan en un recipiente de vidrio y se lleva a una estufa de secado a una temperatura de $70\pm 2^\circ\text{C}$ durante 16 h para eliminar la humedad (Isidro, 2019).

La molienda se realizó en un molino de aspas “El Crisol”, para finalmente tamizar a través de una criba de malla número 150 con abertura de 140 micrones (0.012446 cm).

Nanocelulosa

Una vez que se obtuvo la microcelulosa se comienza preparando dos soluciones. La primera solución de HCl al 4N y la segunda solución de H₂SO₄ al 23%. Posteriormente se procede a pesar 10 g de microcelulosa que se ponen en contacto con la primera solución en un vaso de precipitado. El vaso de precipitado se coloca en una parrilla de calentamiento por 3 h a una temperatura de 70-80°C con un agitador magnético para una agitación constante. Al término de las 3 h se deja sedimentar la solución para poder decantar el sobrenadante. Realizados estos pasos se hacen lavados con agua destilada hasta llegar a un pH neutro.

Una vez que se llega a la neutralidad se deja sedimentar la solución para poder decantar todo el sobrenadante posible, el sedimento resultante se coloca en un baño de hielo, ahí se le agrega la segunda solución poco a poco para evitar que se

queme, se mantendrá en agitación constante durante 1 h y se va a monitorear la temperatura que no debe excederse de los 50°C.

Al término de este proceso la solución se divide en dos vasos de precipitado para ponerlos en el baño ultrasónico durante 15 min, cuidando las condiciones de la temperatura. Posteriormente se decanta el sobrenadante y se hacen lavados hasta llegar a un pH neutro.

Después se decanta el excedente del sobrenadante y se divide la solución en 8 tubos de ensaye, se continúa poniendo los tubos en una centrifuga a 2,500 r.p.m. durante 10 min, por último, se vacía el contenido de los tubos de ensaye en un vaso de precipitado para ponerlo en una estufa de secado a 40°C durante 24 h.

Aceite esencial de orégano (AEO)

Fue obtenido mediante arrastre de vapores, fue caracterizado como muestra alta en timol, mediante una cromatografía de gases. Proporcionado por el CIRENA (Centro de Investigación en Recursos Naturales, Saláíces, Jiménez, Chihuahua)

Cristales de Timol (CT)

El timol es uno de los componentes principales del AEO, de igual forma fue proporcionado por el CIRENA.

6.2. Etapa 2: Elaboración de probetas

Se pesaron por separado los materiales líquidos (glicerol y AEO) de los sólidos (almidón, PSI, MC, NC, CT), posteriormente se combinaron hasta obtener una mezcla homogénea, que se guardó en frascos identificados respectivamente como MC-TC, MC-T, NC-TC y NC-T.

Para realizar la investigación se utilizaron cuatro diferentes formulaciones, las cuales se describen en la Tabla 5.

Tabla 5. Formulaciones para la elaboración de las probetas.

%	Mezclas				
	Materiales	MC-TC	MC-T	NC-TC	NC-T
PSI		22	22	22	22
MC		22	22	0	0
NC		0	0	22	22
Almidón		22	22	22	22
AEO		3.5	0	3.5	0
CT		0	3.5	0	3.5
Glicerol		30.5	30.5	30.5	30.5

PSI= polisuccinimida, MC= microcelulosa, AEO=aceite esencial de orégano, CT= cristales de timol, NC= nanocelulosa

La extrusión de las mezclas se llevó a cabo en la planta piloto 1 del CIQA en el equipo extruder micro compounder Xplore IM 15, Serial 15-14-20, 204-245 V 50-60 Hz; 3100 watts, 14 Amp. Bajo las condiciones que se presentan en la Tabla 6, establecidas previamente por Ángel (2019).

Tabla 6. Condiciones del micro compounder.

Parámetro	Unidades	Condición probada
Temperatura	° C	125
Velocidad de husillo	r.p.m.	60
Tiempo de residencia	Min	3

r.p.m.= revoluciones por minuto.

Ángel (2019).

Para iniciar con la extrusión, las mezclas se introducen a la tolva del equipo Xplore. Una vez concluido el proceso de extrusión, el material es descargado por el pistón del equipo, y almacenado en frascos de vidrio para posteriormente ser moldeado. El moldeo del material se llevó a cabo mediante compresión en una prensa de placa

caliente, a una temperatura de 80°C a 25 ton de presión durante 3 min utilizando una termoconformadora marca PHI. Posteriormente se pasan a una placa de enfriamiento con circulación de agua a 25 ton de presión por 3 min (Cruz, 2019). Finalmente se obtuvieron probetas con aproximadamente 1 mm de grosor, las cuales se caracterizaron mediante FTIR.

6.3. Etapa 3: Evaluación de la solubilidad

El porcentaje de solubilidad de las probetas se determinó de acuerdo a la metodología propuesta por Zamudio *et al.*, (2007). Se pesó aproximadamente un g de muestra (5 repeticiones por tratamiento) y se pusieron a secar a 60°C por 24 h en una estufa de secado, posteriormente se ponen a peso constante los vasos de precipitado de 250 mL (uno por cada repetición de cada tratamiento). Para esto se colocan los vasos de precipitado en una estufa de secado a 110°C durante 2 h como mínimo, se sacan y se enfrían en el desecador por 30 min, se pesan y se registra el peso de cada vaso, este será el peso inicial. Ya que ha pasado el tiempo de secado de las muestras, se sacan y se enfrían en un desecador de 20-30 min, se pesan las muestras y se registra su peso, este será el peso inicial de la muestra. Después se colocan 80 mL de agua destilada en cada uno a peso constante, se añade la muestra y se mantienen en agitación constante a diferentes intervalos de tiempo a temperatura ambiente, como se muestra en la Tabla 7. Trascurrido el tiempo de agitación, se decanta el líquido cuidando que el residuo no se pierda al retirar el agua y se pone a secar el vaso de precipitado con la muestra por 24 horas a 60°C, posteriormente se enfrían los vasos en un desecador por 30 minutos y se pesa el vaso de precipitado con el residuo seco.

Para obtener los datos resultantes de esta prueba se utilizaron las siguientes las formulas presentadas en la ecuación 1 y 2:

$$\%residuo = \frac{\textit{peso del vaso con residuo} - \textit{peso inicial del vaso}}{\textit{peso inicial de la muestra}} \times 100$$

Ecuación 1. Ecuación para calcular %residuo

$$\%solubilidad = 100 - \%residuo$$

Ecuación 2. Ecuación para calcular el %solubilidad

Tabla 7. Intervalos de tiempo de agitación.

Muestras	Tiempo de agitación (min)		
MC-TC	60	120	180
MC-T	60	120	180
NC-TC	60	120	180
NC-T	60	120	180

6.4. Etapa 4: Pruebas de absorción

Se acondicionaron tres repeticiones de cada muestra de la siguiente manera: se secaron en un horno de secado durante 24 h a 50 ± 3 °C, se enfriaron en un desecador y se pesó inmediatamente con una precisión de 0.001 g en una balanza analítica. Después se procedió a la inmersión de 2 h, las muestras acondicionadas se colocaron en un recipiente con agua destilada mantenida a una temperatura de 23 ± 1 °C, estas deben descansar sobre el borde y sumergirse por completo. Al final de 2 , las muestras se sacaron del agua una a una, se limpió toda el agua de la superficie con un paño seco y se pesó inmediatamente con una precisión de 0.001 g en una balanza analítica (ASTM D570, 2014).

Adicionalmente se tomaron las siguientes dimensiones: longitud y espesor, al inicio y al final de la prueba.

6.5. Etapa 5: Pruebas de migración

Se realizaron pruebas de migración almacenando a temperatura ambiente, bajo el uso de tres líquidos simulantes referidos como A, E, I (agua desionizada, etanol 93% e isooctano respectivamente); de acuerdo con lo indicado por la directiva Europea 82/711/CEE.

Las muestras del material fueron colocadas en frascos de vidrio ámbar con tapa en relación 1:10 con cada uno de los líquidos simulantes, almacenándose a la temperatura de estudio propuesta; para tomar una alícuota de 2 mL a los siguientes intervalos de tiempo: 6 h, 12 h, 24 h, 48 h, 168 h, 336 h, 504 h y 672 h.

Las muestras se analizaron en un espectrofotómetro FTIR SPECTRUM TWO Perkin Elmer del Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos de esta institución, para la identificación de la posible migración de los compuestos del AEO y CT incorporados.

VII. RESULTADOS Y DISCUSIONES

7.1. Etapa 1: Obtención de materiales base

El análisis FTIR permite evaluar en función a las vibraciones de los átomos en una molécula para que pueda ser observada, permitiendo que los enlaces químicos se puedan estirar, contraer o doblar con la radiación infrarroja aplicada.

Cada uno de los materiales base fueron caracterizados para garantizar su adecuada síntesis o proceso de obtención, los espectros infra rojos de cada uno de ellos se presentan a continuación.

Polisuccinimida (PSI)

En la figura 3 se presenta el espectro infrarrojo de la PSI

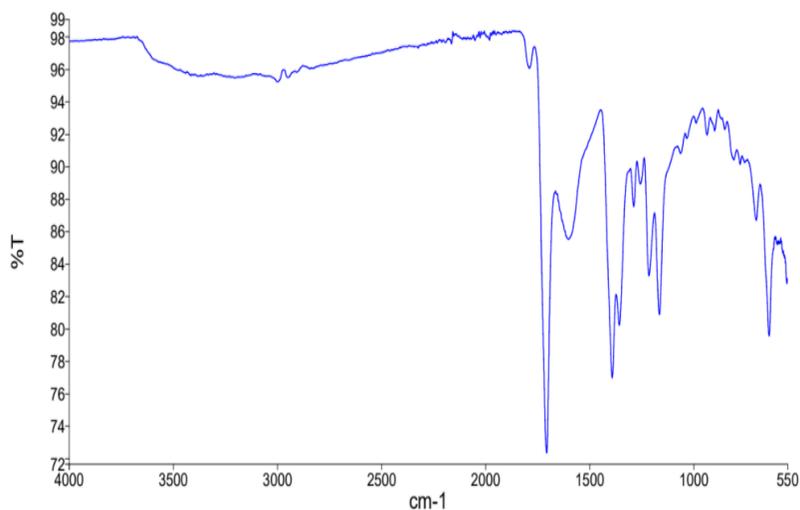


Figura 3. FTIR de la PSI

Diversos autores han descrito el análisis de los espectros infrarrojos de la polisuccinimida. En la figura anterior se observa una banda en 2954.72 cm^{-1} que representa el estiramiento de CH_2 , otra en 1708.36 cm^{-1} que corresponde a la vibración $\text{C}=\text{O}$ de las amidas cíclicas, seguida de otra banda a 1390.94 cm^{-1} que designa el $\text{C}-\text{H}$ en tijera del CH_2 , por último la banda situada en 1164.51 cm^{-1} que corresponde a la flexión de $\text{C}-\text{H}$ del CH_2 como lo refiere Jalalvandi & Shavandi (2018) en su revisión de polímeros degradables y solubles en agua, y Hernández *et al* (2017).

Microcelulosa (MC)

En la figura 4 se presenta el espectro infrarrojo de la MC

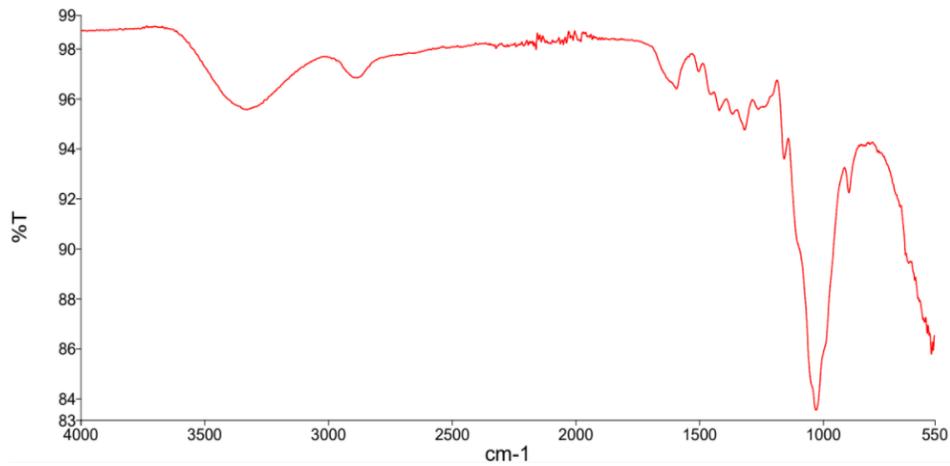


Figura 4. FTIR de la MC

Este espectro muestra la localización de una banda a 3330.64 cm^{-1} la cual corresponde a los grupos -OH presentes en la celulosa, otra en 1317.66 cm^{-1} y se debe a la vibración del CH_2 y al final una en 1028.25 cm^{-1} que se le atribuye al estiramiento de C-O . Ollier *et al.*, (2013) obtuvieron bandas similares a las obtenidas en este trabajo de investigación, para el polvo de celulosa microcristalina de Sigma-Aldrich.

Nanocelulosa (NC)

En la figura 5 se presenta el espectro infrarrojo de la NC

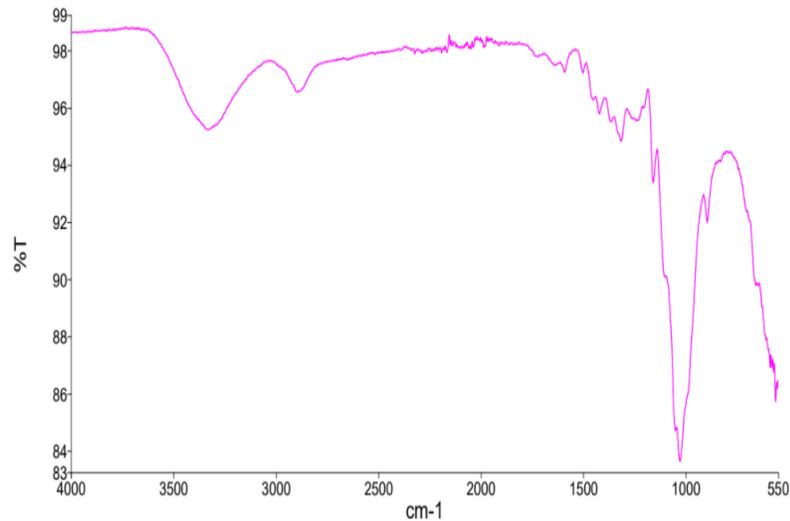


Figura 5. FTIR de la NC

De acuerdo con Seoane *et al.*, (2016) en su estudio sobre la caracterización de la NC reportan las bandas características para dicho material y comparando con las obtenidas en el presente trabajo de investigación, se tiene que la banda situada en 3340.08 cm⁻¹ es característico de la vibración del estiramiento O-H y el estiramiento C-O es representado por la banda a 1027.94 cm⁻¹.

Aceite esencial de orégano (AEO)

En la figura 6 se presenta el espectro infrarrojo del AEO.

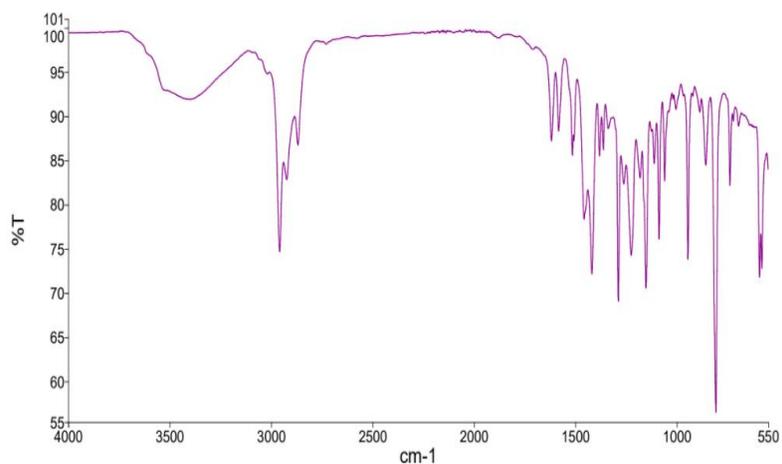


Figura 6. FTIR del AEO

En el espectro resultante de la caracterización del AEO se observa que en 3400.20 cm^{-1} se obtiene una banda ancha y ésta se relaciona con el grupo O-H de compuestos fenólicos. La banda en 1618.6 cm^{-1} se asigna al éster de vinilo C=C que se estira a partir de derivados terpénicos como el beta-farneseno en AEO. Las bandas en 1583.85 cm^{-1} y 1515.82 cm^{-1} se atribuyen al anillo de benceno de los principales compuestos fenólicos (carvacrol y timol), además la banda en 1419.30 cm^{-1} también se relaciona con la flexión O-H de los compuestos fenólicos, como sugieren (Ketkaew *et al.*, 2018) al obtener resultados similares en su estudio sobre el efecto del contenido de aceite esencial de orégano en biocompuestos verdes.

Cristales de Timol

En la figura 7 se presenta el espectro infrarrojo de los CT.

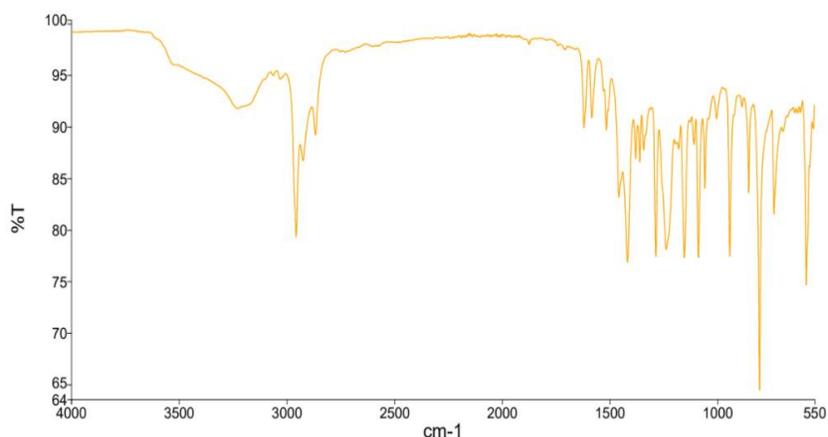


Figura 7. FTIR de los CT

De acuerdo con Liu *et al.*, (2021) para el timol, la banda a 3321.20 cm^{-1} se debe a la vibración de estiramiento del grupo –OH, la banda a 2958.37 cm^{-1} se atribuye a la vibración de estiramiento del grupo –CH₃ del anillo de benceno, y las bandas que oscilan entre $1418.40 - 1620.78\text{ cm}^{-1}$ se puede asignar como vibración de estiramiento de C = C del anillo de benceno.

7.2. Etapa 2: Elaboración de probetas

En la figura 8 se muestran los infrarrojos de las mezclas MC-TC, MC-T, NC-TC, NC-T respectivamente, las bandas son muy similares entre las mezclas, mostrando la similitud de los componentes que conforman a cada una de ellas.

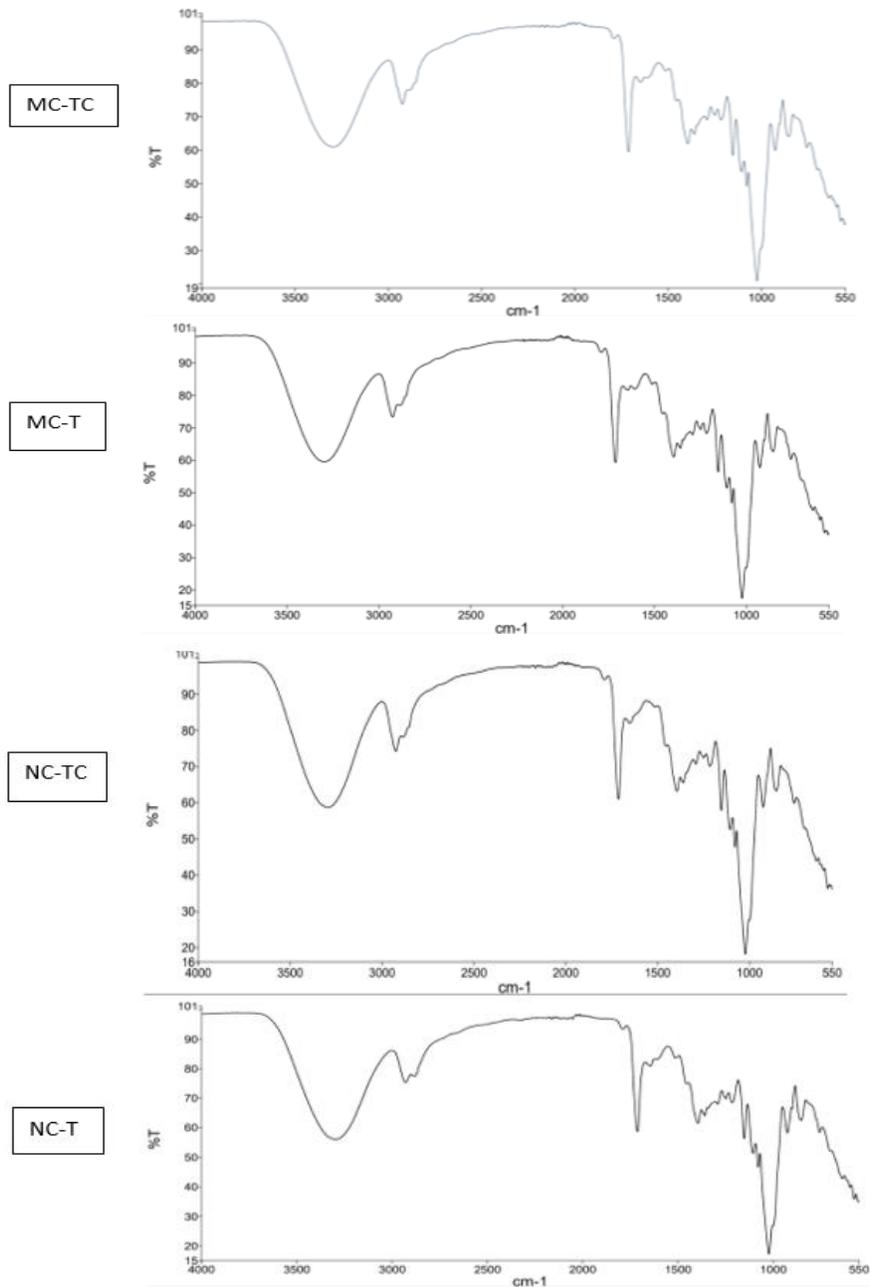


Figura 8. FTIR de las 4 mezclas.

Los infrarrojos de las mezclas, registraron poco movimiento en cuanto a las bandas representativas de cada grupo químico lo cual comprueba el contenido de los agentes complementarios del material. Comparando estos infrarrojos con los agentes utilizados para la formulación de las mezclas, se observa que la primera banda se encuentra entre los 3316 y 3248 cm^{-1} y ésta representa el estiramiento de los grupos $-\text{OH}$ presentes en la MC y NC. Además, el glicerol tiene una banda muy pronunciada en 3248.50 cm^{-1} (Ángel, 2019) lo cual hace posible observar su incorporación a las mezclas pues las bandas se ven más pronunciadas a esta altura. La banda situada entre 2938 y 29140 cm^{-1} es más pronunciada en MC-T y NC-T debido a que en estas mezclas se incorporó T, es la banda característica de este material, y se le atribuye a la vibración del estiramiento del grupo $-\text{CH}_3$ del anillo de benceno. También se observa una banda entre 1411 y 1416 cm^{-1} que se puede asignar como vibración de estiramiento de $\text{C} = \text{C}$ del anillo de benceno. Por último la banda situada entre 1708 y 1714 cm^{-1} se debe a la presencia del AEO y de la PSI pues las bandas características de estos materiales se sitúan en 1701 cm^{-1} , la cual pertenece a λ - terpinene (Ángel, 2019) y en 1705 cm^{-1} , que corresponde a la vibración $\text{C}=\text{O}$ de las midas cíclicas, respectivamente.

7.3. Etapa 3: Evaluación de la solubilidad

La Figura 9 y el Anexo 1 presentan el análisis de medias de las cinco repeticiones realizadas a las probetas de cada mezcla, a las cuales se les realizó una prueba de solubilidad, donde se puede apreciar, que conforme el tiempo de tratamiento para la solubilización fue creciendo, las muestras se fueron solubilizando de manera constante y homogénea, se destaca el comportamiento de la muestra que se mantuvo más estable que fue la de MC-TC ya que tuvo un porcentaje de solubilidad a la primera hora del 63.017%, en la segunda hora de 68.159% y en la tercer hora de 74.518%, en contraste con la muestra MC-T que fue la que presentó un mayor porcentaje de solubilidad; teniendo en la primera hora un 60.162%, en la segunda hora un 75.043% y en la tercer hora un 82.456%, presentándose diferencias estadísticamente significativas para los tratamientos mencionados.

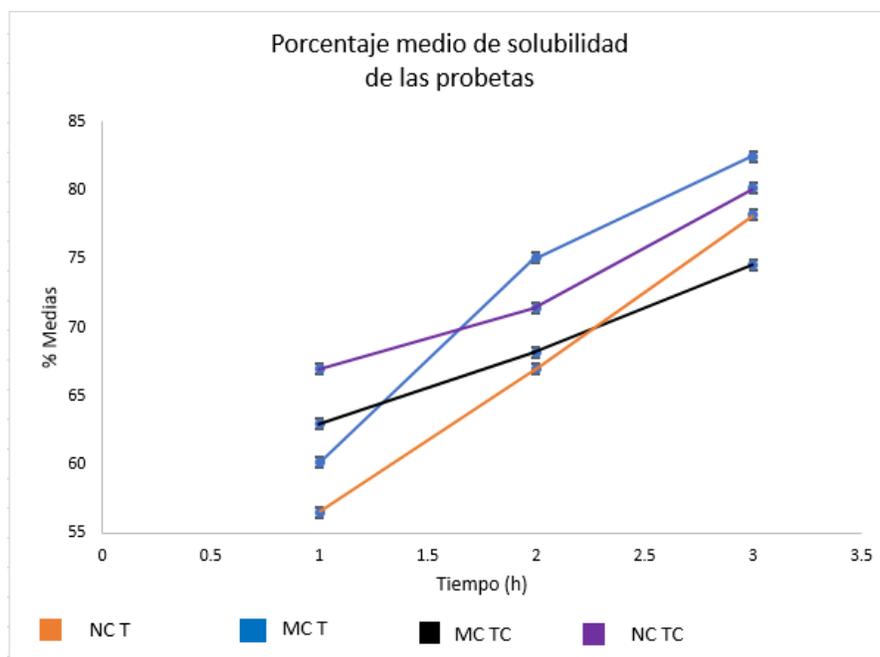


Figura 9. Porcentaje medio de solubilidad de las probetas.

La solubilidad en agua de las probetas que contienen TC es mayor que las que contienen T a la primera hora, pero al final de las tres horas de prueba la que se solubilizó más fue la MC-T y NC-TC. Según Salarbashi *et al.*, (2013) se esperaría que los compuestos hidrófilos aumentarían la solubilidad de una película, mientras que los compuestos hidrófobos la disminuirían, lo que está de acuerdo con la expectativa de que el aumento de la concentración de aceites esenciales disminuye la hidrofiliidad de las películas. La menor solubilidad de las probetas puede deberse por un aumento en la interacción entre los grupos hidroxilo de la MC y los componentes de TC, lo que lleva a una disminución en la disponibilidad de grupos hidroxilo y, por lo tanto, reduce las interacciones polisacárido-agua.

Desde el punto de vista de Tajik *et al.*, (2013) los resultados obtenidos son directamente atribuibles al comportamiento hidrófilo del glicerol en las probetas. Generalmente, una alta solubilidad indicaría una menor resistencia al agua; sin embargo, para algunas aplicaciones, como la envoltura de envases, la alta solubilidad es un indicador de biodegradabilidad, lo que podría ser una ventaja. Este

es el caso cuando la película o el recubrimiento se consumirán simultáneamente con los alimentos.

Martins *et al.*, (2021) mencionan que el envasado con alta solubilidad en agua puede ser deseable en algunos casos, como el envasado utilizado para rellenar alimentos preparados previamente, de modo que durante la preparación el envasado se pueda solubilizar junto con el alimento. Sin en cambio, para aplicaciones en alimentos con alto contenido de humedad, están indicados envases con baja solubilidad en agua, por lo que el envase protege el alimento y no se degrada por contacto con el agua. En la Figura 10 y Anexo 2 se muestra el análisis de medias del remanente de la prueba de solubilidad, se puede observar que como se dijo anteriormente, la mezcla MC TC fue más estable por lo tanto transcurridas las 3 horas tuvo un mayor porcentaje de residuo siendo el 25.482%, es decir, se solubilizó menos, mientras que la mezcla que menor residuo presentó en el mismo tiempo fue la MC-T por lo tanto fue la que tuvo un mayor porcentaje de solubilización.

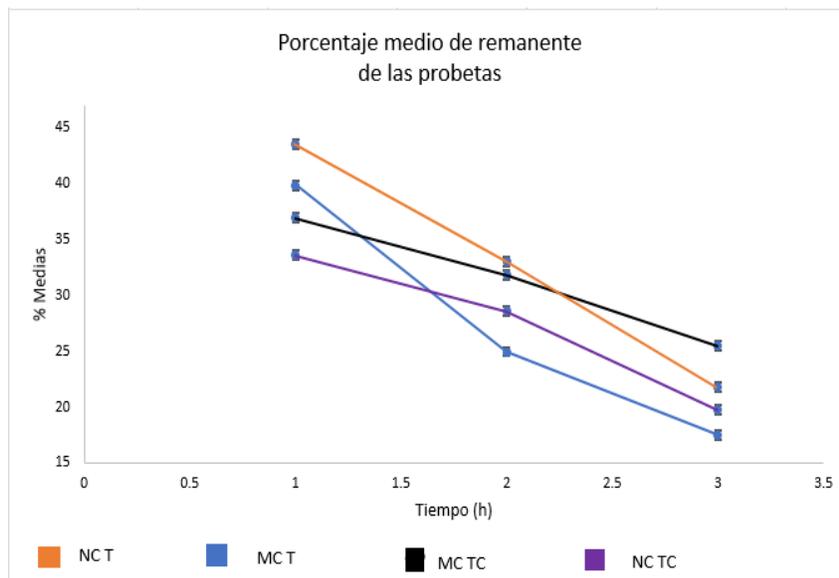


Figura 10. Porcentaje medio de remanente de las probetas.

En este estudio, todas las probetas demostraron ser solubles en agua, la matriz del compuesto es hidrofílico lo que hace que las probetas se disuelvan fácilmente, por lo que no podrían aplicarse en alimentos con alto contenido de humedad. Sin embargo, la solubilidad alta las hace candidatas a funcionar en alimentos de baja

humedad como vehículos de compuestos bioactivos, por ejemplo, en recubrimientos con antioxidantes o antimicrobianos en donde es deseable que éstos difundan fácilmente del empaque al alimento (Escobar, 2020).

La adición de TC provocó una disminución de la solubilidad, esto debido a la interacción con la matriz polimérica que disminuye los grupos OH disponibles, evitando el libre flujo de moléculas de agua. Por otro lado, los nanomateriales tienen superficies de contacto más grandes, lo que favorece las interacciones con la matriz del polímero, el comportamiento del agua en espacios a nanoescala difiere del comportamiento a nivel macroscópico (Escobar, 2020).

7.4. Etapa 4: Pruebas de la absorción

La Figura 11 y el Anexo 3 presentan el análisis de medias de tres repeticiones por cada mezcla, a las cuales se les realizó una prueba de absorción de humedad después de dos horas de contacto con el agua, donde se puede apreciar que en el parámetro de longitud no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los cuatro tratamientos.

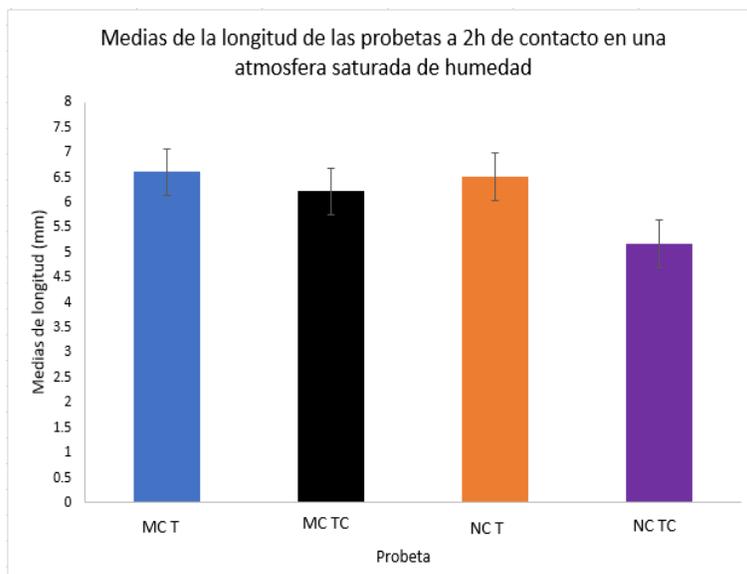


Figura 11. Medias de la longitud de las probetas a 2h de contacto en una atmósfera saturada de humedad.

En la celulosa, hay muchos grupos hidroxilo disponibles para interactuar con el agua mediante enlaces de hidrógeno. La cantidad de agua absorbida depende de la humedad relativa de la atmósfera con la que la fibra está en contacto. Todos los grupos –OH en la fase amorfa son accesibles al agua, mientras que sólo una pequeña cantidad de agua interactúa con los grupos –OH de la superficie de la fase cristalina (Kalia *et al.*, 2011).

Las probetas muestran un incremento de longitud similar, pero en las pequeñas diferencias se muestra que a las que se les incorporó T fue mayor la longitud que las que solo se les añadió TC.

Para el parámetro de espesor la Figura 12 y el Anexo 4 presentan el análisis de medias de tres probetas de cada mezcla, a las cuales se les realizó una prueba de absorción de humedad después de dos horas de contacto con el agua, donde se puede apreciar que entre los tratamientos NC-T y MC-TC no hubo diferencias estadísticamente significativas, mientras que MC-T y NC-TC tienen diferencias estadísticamente en comparación con las otras mezclas.

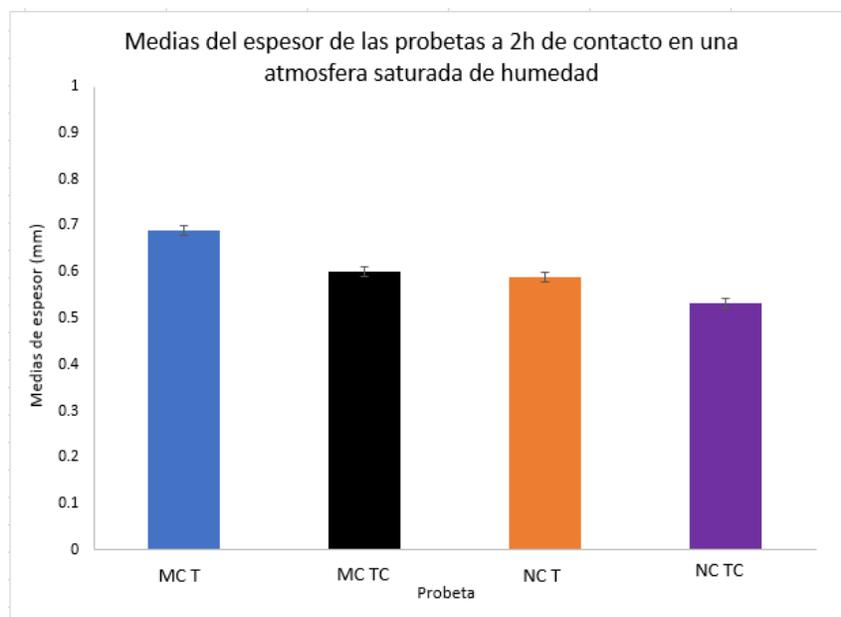


Figura 12. Medias del espesor de las probetas a 2h de contacto en una atmósfera saturada de humedad.

La absorción de agua de la probeta MC-T mostró el mayor incremento en grosor en función de absorción de humedad, seguida de las probetas MC-TC y NC-T no

existiendo diferencias estadísticamente significativas entre esos tratamientos y finalmente la probeta NC-TC que presentó el menor incremento en cuanto a grosor. Esto puede deberse a que la celulosa, tiene muchos grupos hidroxilo disponibles para interactuar con el agua mediante enlaces de hidrógeno. Por lo tanto, los grupos hidroxilo del sitio activo contribuyeron a la absorción de agua.

Tajik *et al.*, (2013) resaltan que la presencia de agua en las probetas depende en gran medida de la concentración de glicerol. El glicerol, debido a su naturaleza hidrófila, retiene agua en la matriz de la polimérica. Mayores concentraciones de plastificante favorecen la absorción de moléculas de agua, lo que se atribuye principalmente a la predisposición de los plastificantes a formar enlaces de hidrógeno (O-H).

En la Figura 13 y Anexo 5 se muestra el análisis de medias de tres probetas de cada mezcla, a las cuales se les realizó una prueba de absorción de humedad después de dos horas de contacto con el agua, donde se puede apreciar que en el parámetro de peso entre los tratamientos MC-T y NC-T fue el más elevado no existiendo diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, seguido de los tratamientos MC-TC y NC-TC encontrándose estos en el mismo nivel de significancia.

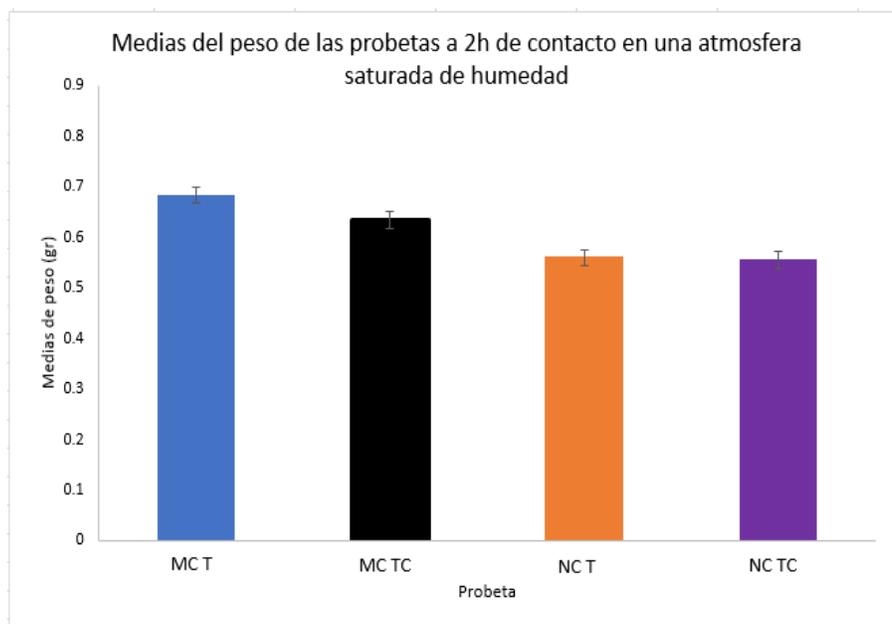


Figura 13. Medias del peso de las probetas a 2h de contacto en una atmósfera saturada de humedad.

En éste parámetro las probetas con T tuvieron un aumento de peso similar a comparación de las probetas que contenían TC.

De acuerdo con Quino *et al.*, (2020) los datos muestran que la difusión de agua en los compuestos depende del material, de la forma de las muestras y de los detalles de la inmersión en agua. Además, los compuestos pueden saturarse con agua y muestran un aumento de peso continuo o incluso una pérdida de peso debido a la lixiviación de moléculas de bajo peso. En compuestos con fibras las moléculas de agua pueden ocupar huecos, interfaces matriz-fibra, volúmenes libres en la matriz o unirse químicamente a la matriz. Los cambios causados por el agua en el material compuesto provienen principalmente de cambios en la matriz y daños en la interfaz fibra-matriz. Pueden aparecer microgrietas debido al hinchamiento.

7.5. Etapa 5: Pruebas de migración

Es de importancia identificar los compuestos que migran de la matriz polimérica hacia el alimento o líquido simulante para garantizar la seguridad alimentaria, en esta etapa se obtuvieron las áreas de las bandas presentes en cada uno de los líquidos simulantes ya que este atributo es proporcional a la concentración de la presencia del grupo asociado a esas bandas, en los diferentes tiempos de almacenamiento para poder apreciar si hubo o no migración de compuestos y su comportamiento.

Los resultados se detallan a continuación:

En la Tabla 8 se muestra la comparación de medias de los resultados de migración de las 3 repeticiones de las 4 probetas en los diferentes tiempos de almacenamiento con el agua como líquido simulante.

En el Anexo 6 se muestra el espectro infrarrojo del agua desionizada, utilizada como líquido simulante y es posible apreciar la banda situada en 3300 cm^{-1} que representa a los grupos OH y una más a 1636 cm^{-1} asociada al enlace H-O-H. Después de 6 horas de contacto con las cuatro probetas objeto de estudio, sobresale la presencia de una banda a los 3325 cm^{-1} , misma que es asociada al enlace OH, como se describió anteriormente, cabe resaltar que se presentó un ligero desplazamiento de dicha banda que indica la interacción (Iturbe, 2004) con

otras moléculas disueltas en el líquido estudiado. Sobresalen además dos bandas una a los 2970 cm^{-1} asociada al estiramiento CH_2 proveniente de los materiales base empleados en la elaboración de las probetas (almidón y la microcelulosa). La siguiente banda de importancia es una de baja intensidad ubicada a los 1044 cm^{-1} representativa de los de aril alquil esterés, atribuible a la migración de bajas cantidades de compuestos aromáticos presentes en las probetas debido a la incorporación del AEO y de los CT.

En lo referente a la cinética de liberación de los constituyentes de la matriz al líquido simulante se puede apreciar que para la banda de 2970 cm^{-1} el máximo valor del área bajo la curva se presentó a las 12 horas de contacto con las probetas MC-TC y MC-T, encontrándose estas a un mismo nivel de significancia y diferente con respecto al resto de los tratamientos, seguido por las muestras NC-TC y NC-T, lo que puede sugerir que estas presentan un mejor nivel de entrecruzamiento de los materiales asociado a la mayor disponibilidad de las nanopartículas (Seoane *et al.*, 2016) incluidas en la probeta al encontrarse en un mayor nivel de disponibilidad para formar estos enlaces.

Por otro lado, la banda a los 1044 cm^{-1} , alcanza de igual manera los máximos a las 12 y 24 horas de contacto para las cuatro probetas objeto de estudio, con diferencias estadísticamente significativas con respecto al resto de los tratamientos.

Tabla 8. Medias de áreas de las diferentes bandas presentes en el agua como líquido simulante a diferentes intervalos de tiempo.

PROBETA	TIEMPO (h)	BANDAS/ÁREA			
		3325	2970	1636	1044
Líquido simulante	0	3300/132	SIN	1635/11.05	SIN
MC TC	6	52.900 ^{AB}	0.677 ^{EFGH}	3.681 ^C	2.881 ^D
MC TC	12	50.955 ^J	1.026 ^A	3.69 ^C	3.325 ^{AB}
MC TC	24	53.250 ^A	0.747 ^C	3.686 ^C	3.172 ^{ABCD}
MC TC	48	51.807 ^{DEFGHI}	0.633 ^M	3.708 ^B	2.843 ^D
MC TC	168	51.676 ^{EFGHI}	0.632 ^M	3.677 ^C	2.844 ^D
MC TC	336	51.860 ^{DEFGH}	0.634 ^M	3.703 ^C	2.841 ^D

MC TC	504	51.794 ^{DEFGHI}	0.651 ^{JKLM}	3.707 ^{BC}	2.895 ^{BCD}
MC TC	672	52.034 ^{DE}	0.635 ^M	3.690 ^C	2.835 ^D
MCT	6	53.121 ^{AB}	0.692 ^{DE}	3.683 ^C	3.025 ^{ABCD}
MCT	12	50.226 ^K	1.036 ^A	3.686 ^C	3.387 ^A
MCT	24	53.241 ^{AB}	0.743 ^C	3.685 ^C	3.130 ^{ABCD}
MCT	48	51.952 ^{DEF}	0.653 ^{IJKLM}	3.784 ^{AB}	2.865 ^D
MCT	168	51.620 ^{FGHI}	0.636 ^{LM}	3.685 ^C	2.886 ^{BCD}
MCT	336	51.459 ^{FGHIJ}	0.640 ^{KLM}	3.687 ^C	2.877 ^D
MCT	504	51.263 ^{IJ}	0.667 ^{FGHIJ}	3.674 ^C	2.930 ^{BCD}
MCT	672	51.535 ^{FGHI}	0.658 ^{HIJKL}	3.717 ^{BC}	2.871 ^D
NCTC	6	53.026 ^{AB}	0.702 ^D	3.676 ^C	3.057 ^{ABCD}
NCTC	12	52.290 ^{CD}	0.990 ^B	3.710 ^{BC}	3.324 ^{ABC}
NCTC	24	53.175 ^{AB}	0.732 ^C	3.674 ^C	3.073 ^{ABCD}
NCTC	48	51.930 ^{DEFG}	0.663 ^{GHIJ}	3.684 ^C	2.883 ^D
NCTC	168	51.627 ^{FGHI}	0.662 ^{GHIJK}	3.688 ^C	2.903 ^{BCD}
NCTC	336	51.786 ^{DEFGHI}	0.658 ^{HIJKL}	3.744 ^{ABC}	2.880 ^D
NCTC	504	51.343 ^{HIJ}	0.674 ^{FGHI}	2.686 ^C	2.912 ^{BCD}
NCTC	672	51.632 ^{FGHI}	0.675 ^{FGHI}	3.671 ^C	2.880 ^D
NCT	6	52.677 ^{BC}	0.726 ^C	3.690 ^C	2.983 ^{ABCD}
NCT	12	53.167 ^{AB}	0.980 ^B	3.667 ^C	3.275 ^{ABCD}
NCT	24	52.885 ^{AB}	0.738 ^C	3.685 ^C	3.066 ^{ABCD}
NCT	48	51.561 ^{FGHI}	0.670 ^{FGHIJ}	3.670 ^C	2.870 ^D
NCT	168	51.730 ^{DEFGHI}	0.692 ^{DE}	3.681 ^C	1.992 ^E
NCT	336	51.405 ^{FGHIJ}	0.638 ^{LM}	3.677 ^C	2.874 ^D
NCT	504	51.603 ^{FGHI}	0.683 ^{DEFG}	3.668 ^C	2.886 ^{BCD}
NCT	672	51.367 ^{GHIJ}	0.690 ^{DEF}	3.807 ^A	2.872 ^D

Nota: Los niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes. T – student $p \leq 0.05\%$

Goulas., (2001) estudió la migración general de películas multicapa en simulantes alimentarios oficiales de la UE, él observó que en agua destilada los valores de migración eran muy bajos independientemente del espesor de la película sin diferencias significativas. También menciona que la migración puede estar directamente relacionada con la naturaleza química del migrante, el polímero y el

simulante alimentario, en este caso los polímeros, en comparación con el agua, suelen ser de naturaleza mucho menos polar y, por lo tanto, no hubo tanta migración hacia el agua de los constituyentes poliméricos. Los resultados anteriores están de acuerdo con los resultados del presente trabajo.

En la Tabla 9 se muestra la comparación de medias de los resultados de migración de las 3 repeticiones de las 4 probetas en los diferentes tiempos de almacenamiento con etanol como líquido simulante.

En el espectro infrarrojo del etanol al 93%, que muestra en el Anexo 7 se aprecia la banda situada en 3319 cm^{-1} que representa a los grupos OH, otra a los 2973 cm^{-1} que se le atribuye al estiramiento CH_2 , otra en 1087 cm^{-1} que representa a los alcoholes secundarios y una más a 1045 cm^{-1} asociada los alcoholes primarios. Después de 6 horas de contacto con las cuatro probetas objeto de estudio, sobresale la presencia de una banda a los 3325 cm^{-1} , misma que es asociada al enlace OH, como se describió anteriormente, cabe resaltar que se presentó un ligero desplazamiento de dicha banda que indica la interacción con otras moléculas disueltas en el líquido estudiado (Iturbe, 2004). También otras bandas a 2970 cm^{-1} que también se desplaza debido a la interacción con las moléculas CH_2 provenientes de los materiales base empleados en la elaboración de las probetas (almidón y la microcelulosa), la banda en 1087 cm^{-1} se mantiene en el mismo lugar y la banda ubicada a los 1044 cm^{-1} que tuvo un ligero desplazamiento debido a la interacción de los anillos aromáticos presentes en las probetas debido a la incorporación del AEO y de los CT.

En cuanto a lo que se refiere a la cinética de liberación de los constituyentes de la matriz al líquido simulante se puede apreciar que para la banda de 3325 cm^{-1} el valor máximo del área bajo la curva se presentó a las 12 horas de contacto con las probetas NC-T, seguido de MC-TC, MC-T y NC-TC a 24 horas de almacenamiento ya que están situadas en el mismo nivel de significancia y este es diferente al resto de los tratamientos. En la banda a 2970 cm^{-1} el máximo valor del área bajo la curva se presentó a las 12 horas de contacto con las probetas MC-TC y MC-T, encontrándose estas a un mismo nivel de significancia y diferente con respecto al resto de los tratamientos, seguido por las muestras NC-TC y NC-T. Para la banda

a 1087 cm⁻¹ el máximo valor se presentó a las 6 horas con las probetas MC-TC, MC-T y NC-TC ya que están situadas en el mismo nivel de significancia y este es diferente al resto de los tratamientos, seguidos por la muestra NC-T que presenta el valor máximo en las 14 y 24 h ya que están situadas en el mismo nivel de significancia y este es diferente al resto de los tratamientos. Por otro lado, la banda a los 1044 cm⁻¹, alcanza de igual manera los máximos a las 12 y 24 h de contacto para las cuatro probetas objeto de estudio, con diferencias estadísticamente significativas con respecto al resto de los tratamientos.

Tabla 9. Medias de áreas de las diferentes bandas presentes en el etanol como líquido simulante a diferentes intervalos de tiempo.

PROBETA	TIEMPO (h)	BANDAS/ÁREA			
		3325	2970	1087	1044
Líquido simulante	0	3319/28.8	2973/1.92	1087/3.01	1045/8.14
MC TC	6	52.900 ^{AB}	0.677 ^{EFGH}	0.994 ^A	2.881 ^D
MC TC	12	50.955 ^J	1.026 ^A	0.970 ^{CDE}	3.325 ^{AB}
MC TC	24	53.250 ^A	0.747 ^C	0.991 ^{AB}	3.172 ^{ABCD}
MC TC	48	51.807 ^{DEFGHI}	0.633 ^M	0.957 ^{EF}	2.843 ^D
MC TC	168	51.676 ^{EFGHI}	0.632 ^M	0.955 ^F	2.844 ^D
MC TC	336	51.860 ^{DEFGH}	0.634 ^M	0.941 ^{GHIJ}	2.841 ^D
MC TC	504	51.794 ^{DEFGHI}	0.651 ^{JKLM}	0.931 ^{JKLM}	2.895 ^{BCD}
MC TC	672	52.034 ^{DE}	0.635 ^M	0.926 ^{KLMN}	2.835 ^D
MCT	6	53.121 ^{AB}	0.692 ^{DE}	0.991 ^{AB}	3.025 ^{ABCD}
MCT	12	50.226 ^K	1.036 ^A	0.973 ^{CD}	3.387 ^A
MCT	24	53.241 ^{AB}	0.743 ^C	0.987 ^{AB}	3.130 ^{ABCD}
MCT	48	51.952 ^{DEF}	0.653 ^{IJKLM}	0.957 ^{EF}	2.865 ^D
MCT	168	51.620 ^{EFGHI}	0.636 ^{LM}	0.941 ^{GHIJ}	2.886 ^{BCD}
MCT	336	51.459 ^{FGHIJ}	0.640 ^{KLM}	0.940 ^{GHIJ}	2.877 ^D
MCT	504	51.263 ^{IJ}	0.667 ^{FGHIJ}	0.920 ^{MNO}	2.930 ^{BCD}
MCT	672	51.535 ^{EFGHI}	0.658 ^{HIJKL}	0.912 ^O	2.871 ^D
NC TC	6	53.026 ^{AB}	0.702 ^D	0.993 ^A	3.057 ^{ABCD}
NC TC	12	52.290 ^{CD}	0.990 ^B	0.968 ^{DE}	3.324 ^{ABC}

NC TC	24	53.175 ^{AB}	0.732 ^C	0.980 ^{BCD}	3.073 ^{ABCD}
NC TC	48	51.930 ^{DEFG}	0.663 ^{GHIJ}	0.951 ^{FG}	2.883 ^D
NC TC	168	51.627 ^{EFGHI}	0.662 ^{GHIJK}	0.947 ^{FGH}	2.903 ^{BCD}
NC TC	336	51.786 ^{DEFGHI}	0.658 ^{HJKLM}	0.937 ^{HJK}	2.880 ^D
NC TC	504	51.343 ^{HIJ}	0.674 ^{EFGHI}	0.923 ^{LMNO}	2.912 ^{BCD}
NC TC	672	51.632 ^{EFGHI}	0.675 ^{EFGHI}	0.917 ^{NO}	2.880 ^D
NCT	6	52.677 ^{BC}	0.726 ^C	0.990 ^{AB}	2.983 ^{ABCD}
NCT	12	53.167 ^{AB}	0.980 ^B	0.982 ^{ABC}	3.275 ^{ABCD}
NCT	24	52.885 ^{AB}	0.738 ^C	0.982 ^{ABC}	3.066 ^{ABCD}
NCT	48	51.561 ^{EFGHI}	0.670 ^{EFGHIJ}	0.945 ^{FGHI}	2.870 ^D
NCT	168	51.730 ^{DEFGHI}	0.692 ^{DE}	0.933 ^{IJKL}	1.992 ^E
NCT	336	51.405 ^{FGHIJ}	0.638 ^{LM}	0.925 ^{JLMN}	2.874 ^D
NCT	504	51.603 ^{EFGHI}	0.683 ^{DEFG}	0.922 ^{LMNO}	2.886 ^{BCD}
NCT	672	51.367 ^{GHIJ}	0.690 ^{DEF}	0.917 ^{NO}	2.872 ^D

Nota: Los niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes. T – student $p \leq 0.05\%$

Sánchez, (2015) en su estudio sobre la evaluación del efecto antimicrobiano de la polisuccinimida funcionalizada con extractos de aceite esencial de orégano señala que el timol tiene una baja solubilidad en agua, pero es muy soluble en alcoholes, así como en soluciones acuosas fuertemente alcalinas debido a la desprotonación del fenol. La poca migración de timol en los líquidos simulantes probados podría ser a causa de la baja proporción de éste compuesto en el biomaterial y por lo tanto la baja concentración en la migración de los mismos, ya que esto se puede dar de manera prolongada ocasionado por la formación de un enlace débil entre el polímero y el timol o AEO.

En la Tabla 10 se muestra la comparación de las medias de las áreas bajo la curva de las bandas presentes en las 3 repeticiones de las 4 probetas en los diferentes tiempos de almacenamiento con el isooctano como líquido simulante.

El isooctano es un alcano de fórmula general C_8H_{18} y en su espectro infrarrojo que se muestra en el Anexo 8 se aprecia una banda situada en 2954 cm^{-1} que representa las vibraciones de valencia de los grupos CH_3 , otra a los 1468 cm^{-1} que se atribuye a las vibraciones de deformación de los grupos CH_2/CH_3 , otra en 1393 cm^{-1} que

representa el desdoblado de los grupos CH₃. Después de 6 horas de contacto con las cuatro probetas objeto de estudio, sobresale la presencia de una banda a los 1065 cm⁻¹ que es asociada a la presencia de los anillos aromáticos presentes en las probetas debido a la incorporación del AEO y de los CT.

En cuanto a la cinética de liberación de los constituyentes de la matriz al líquido simulante se puede apreciar que para la banda de 2954 cm⁻¹ el valor máximo del área bajo la curva se presentó a las 6 horas de almacenamiento con las probetas MC-TC y MC-T, cada una situadas en el mayor nivel de significancia y este es diferente al resto de los tratamientos, seguidos por la muestra NC-TC y NC-T que presenta el máximo valor a las 672 horas, en la banda a 1468 cm⁻¹ el máximo valor del área bajo la curva se presentó a las 12 horas de contacto con las probetas MC-TC, posteriormente MC-T y NC-TC a las 6 horas, seguido por la muestra NC-T a las 672 horas. Para la banda a 1393 cm⁻¹ el máximo valor se presentó a las 6 horas en la probeta MC-TC, en la probeta MC-T se presentó a las 24 horas seguidas de NC-T y NC-TC a las 12 horas, en la banda a los 1065 cm⁻¹, alcanza los máximos a las 168 horas de contacto para las cuatro probetas objeto de estudio, con diferencias estadísticamente significativas con respecto al resto de los tratamientos. Cabe resaltar que a diferencia de la migración con los otros dos líquidos simulantes, etanol y agua, que son de carácter polar y medianamente polar, respectivamente, en los cuales hubo presencia de una banda de alrededor de los 3300 cm⁻¹ correspondientes a la formación de enlaces de tipo puente de hidrogeno entre los líquidos simulantes y los grupos OH contenidos principalmente en el glicerol empleado en la elaboración de las probetas, éstas se encuentran ausentes o en un grado casi indetectable cuando se utiliza el isooctano como líquido migrante, lo anterior puede deberse principalmente a la naturaleza apolar de este simulante.

Tabla 10. Medias de áreas de las diferentes bandas presentes en el isooctano como líquido simulante a diferentes intervalos de tiempo.

PROBETA	TIEMPO (h)	BANDAS/ÁREA			
		2954	1468	1393	1065
Líquido simulante	0	2954/4.25	1468/2.45	1393/0.23	SIN
MC TC	6	1.528 ^{IJKLM}	0.783 ^{IJKLM}	0.081 ^A	0.401 ^{DEFG}

MCTC	12	1.435 ^{NO}	0.792 ^{FGHIJ}	0.078 ^{A^{BC}}	0.025 ^R
MCTC	24	1.474 ^{LMNO}	0.780 ^{KLMN}	0.077 ^{ABCD}	0.183 ^{MNOP}
MCTC	48	1.480 ^{KLMNO}	0.760 ^{QR}	0.076 ^{BCD}	0.295 ^{HIJKL}
MCTC	168	1.492 ^{KLMN}	0.762 ^{PQR}	0.078 ^{ABC}	0.525 ^{AB}
MCTC	336	1.472 ^{MNO}	0.764 ^{OPQR}	0.077 ^{ABCD}	0.366 ^{EFGHI}
MCTC	504	1.491 ^{KLMN}	0.765 ^{OPQ}	0.078 ^{ABC}	0.380 ^{DEFGH}
MCTC	672	1.493 ^{KLMN}	0.753 ^R	0.076 ^{BCD}	0.457 ^{ABCD}
MCT	6	1.671 ^{BCDE}	0.803 ^{CDEF}	0.076 ^{BCD}	0.416 ^{CDEF}
MCT	12	1.507 ^{JKLM}	0.795 ^{EFGH}	0.076 ^{BCD}	0.117 ^{PQ}
MCT	24	1.483 ^{KLMNO}	0.705 ^{HIJKL}	0.078 ^{ABC}	0.168 ^{NOPQ}
MCT	48	1.528 ^{IJKLM}	0.774 ^{LMNO}	0.076 ^{BCD}	0.311 ^{GHIJKL}
MCT	168	1.563 ^{HIJ}	0.773 ^{MNOP}	0.078 ^{ABC}	0.537 ^A
MCT	336	1.533 ^{IJKLM}	0.771 ^{NOPQ}	0.077 ^{ABCD}	0.356 ^{EFGHIJ}
MCT	504	1.583 ^{GHI}	0.781 ^{JKLMN}	0.076 ^{BCD}	0.326 ^{FGHIJK}
MCT	672	1.605 ^{FGH}	0.775 ^{LMNO}	0.075 ^{CD}	0.425 ^{CDE}
NC TC	6	1.535 ^{IJKL}	0.803 ^{CDEF}	0.075 ^{CD}	0.151 ^{OPQ}
NC TC	12	1.571 ^{HI}	0.800 ^{CDEF}	0.080 ^{AB}	0.151 ^{OPQ}
NC TC	24	1.541 ^{IJK}	0.797 ^{DEFG}	0.076 ^{BCD}	0.137 ^{PQ}
NC TC	48	1.577 ^{HI}	0.787 ^{GHIJK}	0.076 ^{BCD}	0.268 ^{JKLM}
NC TC	168	1.644 ^{DEFG}	0.787 ^{GHIJK}	0.077 ^{ABCD}	0.500 ^{ABC}
NC TC	336	1.617 ^{EFGH}	0.793 ^{EFGHI}	0.078 ^{ABC}	0.325 ^{GHIJK}
NC TC	504	1.648 ^{DEF}	0.796 ^{EFGH}	0.075 ^{CD}	0.284 ^{IJKL}
NC TC	672	1.720 ^{BC}	0.803 ^{CDEF}	0.074 ^D	0.360 ^{EFGHI}
NCT	6	1.427 ^O	0.802 ^{CDEF}	0.076 ^{BCD}	0 ^R
NCT	12	1.613 ^{EFGH}	0.804 ^{BCDE}	0.078 ^{ABC}	0.172 ^{NOPQ}
NCT	24	1.582 ^{HI}	0.815 ^B	0.076 ^{BCD}	0.086 ^{QR}
NCT	48	1.587 ^{Fghi}	0.795 ^{EFGH}	0.076 ^{BCD}	0.230 ^{LMNO}
NCT	168	1.730 ^B	0.810 ^{BC}	0.074 ^D	0.442 ^{BCDE}
NCT	336	1.667 ^{CDE}	0.811 ^{BC}	0.074 ^D	0.293 ^{HIJKL}
NCT	504	1.685 ^{BCD}	0.808 ^{BCD}	0.076 ^{BCD}	0.243 ^{KLMN}
NCT	672	1.816 ^A	0.827 ^A	0.074 ^D	0.294 ^{HIJKL}

Nota: Los niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes. T – student $p \leq 0.05\%$

En un estudio realizado por Agustinelli *et al.*, (2021) para películas elaboradas a base de proteína de soja en la cual se empleó en glicerol como agente plastificante se evidenció la incapacidad del isooctano para hinchar la matriz hidrófila, restringiendo la difusión de los migrantes apolares como el glicerol presente en la elaboración de este material, lo cual concuerda con lo observado en la presente investigación. Así mismo, en este estudio los anillos aromáticos del AEO y CT que son compuestos de baja polaridad y son solubles en solventes como etanol, dietileter y acetona, entre otros, obtienen su máxima concentración a partir de las 168 horas.

VIII. CONCLUSIONES

Las probetas constituidas por MC/NC, PSI, almidón, glicerol y AEO/CT son compósitos solubles en agua, la mezcla que presenta mayor estabilidad fue la mezcla MC-TC, la menor solubilidad puede deberse a un aumento en la interacción entre los grupos hidroxilo de la MC y los componentes de TC, lo que lleva a una disminución en la disponibilidad de grupos hidroxilo y, por lo tanto, reduce las interacciones polisacárido-agua.

Los materiales son fuertes absorbedores de compuestos polares como el agua ya que probaron su capacidad de hinchamiento y pudieran ser apropiados en el caso de películas o recubrimientos que se consumirán simultáneamente con los alimentos, sin en cambio, para aplicaciones en alimentos con alto contenido de humedad, están indicados envases con bajo poder de absorción, por lo que el envase protege el alimento y no se degrada por contacto con el agua.

De los ensayos de migración se puede apreciar que las muestras más estables fueron las de NC, además hubo afinidad de disolución por los líquidos simulantes polares y medianamente polares como el agua y el etanol, pero en el caso de los apolares la migración fue baja.

El compósito es polar, recomendable para alimentos ricos en agua, sin embargo, pudiera pensarse que es una desventaja puesto que se va a disolver, pero existen alternativas para cambiar los niveles de polaridad de las moléculas base, que en este caso son los procesos de acetilación para que éste biomaterial sea más resistente al agua.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Agustinelli, S. P., Ciannamea, E. M., Ruseckaite, R. A., & Martucci, J. F. (2021). Migration of red grape extract components and glycerol from soybean protein concentrate active films into food simulants. *Food Hydrocolloids*, 120(March), 106955. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106955>
- Alamri, M. S., Qasem, A. A. A., Mohamed, A. A., Hussain, S., Ibraheem, M. A., Shamlan, G., Alqah, H. A., & Qasha, A. S. (2021). Food packaging's materials: A food safety perspective. *Saudi Journal of Biological Sciences*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.04.047>
- Ángel, S. A. M. (2019). *Síntesis, caracterización y optimización de las propiedades mecánicas de un biomaterial activo de tercera generación para el envasado alimentario*.
- Aniskevich, A., & Glaskova, K. T. (2019). Effect of moisture on elastic and viscoelastic properties of fiber reinforced plastics: Retrospective and current trends. In *Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites* (2nd ed.). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102601-4.00003-5>
- Arvanitoyannis, I. S., & Bosnea, L. (2004). Migration of Substances from Food Packaging Materials to Foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 44(2), 63–76. <https://doi.org/10.1080/10408690490424621>
- ASTM D570. (2014). Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. *ASTM Standards*, 98(Reapproved 2010), 25–28.
- Bennett, G. D. (2005). A green polymerization of aspartic acid for the undergraduate organic laboratory. *Journal of Chemical Education*, 82(9), 1380–1381. <https://doi.org/10.1021/ed082p1380>
- Castillo Quiroz, D., Berlanga Reyes, C. A., & Cano Pineda, A. (2005). *Recolección, Extracción Y Uso De La Fibra de Lechuguilla (Agave lechuguilla Torr.) En El Estado De Coahuila*. 23.
- Cruz, E. J. E. (2019). *Evaluación de las propiedades de barrera de un bioenvase activo a base de polisuccinimida reforzado con microcelulosa*.
- Domínguez, Pérez, L. A., Beltrán-Barrientos, L. M., González-Córdova, A. F., Hernández-Mendoza, A., & Vallejo-Cordoba, B. (2020). Artisanal cocoa bean fermentation: From cocoa bean proteins to bioactive peptides with potential health benefits. *Journal of Functional Foods*, 73(July), 104134. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.104134>
- Duffó, G. S. (2012). Una mirada a los biomateriales. *Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable*, 69–70.
- Durand, E., Beaubier, S., Ilic, I., fine, F., Kapel, R., & Villeneuve, P. (2021). Production and antioxidant capacity of bioactive peptides from plant biomass to counteract lipid oxidation. *Current Research in Food Science*, 4(May), 365–397. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.05.006>
- Escobar, J. (2020). Elaboración y caracterización de biopelículas elaboradas con quitosano y adicionadas con partículas de almidón. *Universidad Autónoma Del Estado De México*, 1–66.
- Espinel, K. A. A. (2014). SOLUBILIDAD: ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE CEMENTOS TEMPORALES UTILIZADOS EN TRATAMIENTOS PROTÉSICOS (ESTUDIO IN VITRO). *Paper Knowledge . Toward a Media*

History of Documents.

- Geigrich, J. (2003). Modern Times and Imperfect Cycles. *Journal of Industrial Ecology*, 7(3–4), 10–12. <https://doi.org/10.1162/108819803323059352>
- Goulas, A. E. (2001). Overall migration from commercial coextruded food packaging multilayer films and plastics containers into official EU food simulants. *European Food Research and Technology*, 212(5), 597–602. <https://doi.org/10.1007/s002170000294>
- Hernández, González, M., Pérez Berumen, C. M., Sánchez Ruíz, H., Ruíz Salazar, C. V., Hernández Paz, J. F., Olivas-Armendáriz, I., Martel-Estrada, S. A., & Rodríguez González, C. A. (2017). Polysuccinimide functionalized with oregano's essential oil extracts, an antimicrobial extended release bio-material. *Materials Letters*, 191, 73–76. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.01.035>
- Isidro, L. A. G. (2019). *Establecimiento de las condiciones para la obtención de micro celulosa a partir de fibras de lechuguilla (Agave lechuguilla Tor.) mediante tratamiento químico-mecánico.*
- Iturbe, L. C. (2004). Aplicaciones de la FTIR al estudio de las interacciones polímero-polímero. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 5(3), 111–132.
- Kalia, Kaur, & Kaith. (2011). Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites. In *Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-17370-7>
- Ketkaew, S., Kasemsiri, P., Hiziroglu, S., Mongkolthananaruk, W., Wannasutta, R., Pongsa, U., & Chindaprasirt, P. (2018). Effect of Oregano Essential Oil Content on Properties of Green Biocomposites Based on Cassava Starch and Sugarcane Bagasse for Bioactive Packaging. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(1), 311–318. <https://doi.org/10.1007/s10924-017-0957-x>
- Liu, Y., Jin, L., Wang, C., Sheng, J., & Song, Y. (2021). Thymol-functionalized hollow mesoporous silica spheres nanoparticles: preparation, characterization and bactericidal activity. *Bulletin of Materials Science*, 44(2). <https://doi.org/10.1007/s12034-021-02425-2>
- Majid, I., Ahmad Nayik, G., Mohammad Dar, S., & Nanda, V. (2018). Novel food packaging technologies: Innovations and future prospective. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(4), 454–462. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.11.003>
- Martins, P. C., Bagatini, D. C., & Martins, V. G. (2021). Oregano essential oil addition in rice starch films and its effects on the chilled fish storage. *Journal of Food Science and Technology*, 58(4), 1562–1573. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04668-z>
- Mota, E. G., & Subramani, K. (2018). Nanotechnology in operative dentistry: A perspective approach of history, mechanical behavior, and clinical application. *Emerging Nanotechnologies in Dentistry: Second Edition*, 59–82. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812291-4.00004-2>
- Muhamad, I. I., Zahan, K. A., Pa'e, N., Salehudin, M. H., Khairuddin, N., Marsin, A. M., Yusof, A. H. M., & Salleh, E. (2018). Accelerated testing methodology for long-term life prediction of cellulose-based polymeric composite materials. *Durability and Life Prediction in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, 149–171. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102290-0.00008-8>

- Navia, P., P. D., Ayala, A., A. A., Villada, S., & C, H. (2014). Interacciones empaque-alimento: migración. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(100), 100–110. <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v13n25/v13n25a08.pdf>
- Nilsen, N. J., Fernández, E. N., Radusin, T., Rotabakk, B. T., Sarfraz, J., Sharmin, N., Sivertsvik, M., Sone, I., & Pettersen, M. K. (2021). Current status of biobased and biodegradable food packaging materials: Impact on food quality and effect of innovative processing technologies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(2), 1333–1380. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12715>
- Ollier, R. P., Perez, C. J., & Alvarez, V. A. (2013). Preparation and characterization of micro and nanocomposites based on poly(vinyl alcohol) for packaging applications. *Journal of Materials Science*, 48(20), 7088–7096. <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7521-4>
- Quino, G., Tagarielli, V. L., & Petrinic, N. (2020). Effects of water absorption on the mechanical properties of GFRPs. *Composites Science and Technology*, 199(May), 108316. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108316>
- Román, B. J. A., Rosas, A. J. L., Rodríguez-herrera, A. L., & Palma-, H. M. (2020). *Evaluación de solubilidad y pérdida de peso en la degradación de biopelículas elaboradas a base de mezclas de harina de plátano y chayotextle*. 5(1), 190–204.
- Romero, P., Marfisi, S., Oliveros, P., Rojas, B., & Peña, G. (2014). OBTENCIÓN DE CELULOSA MICROCRISTALINA A PARTIR DE DESECHOS AGRÍCOLAS DEL CAMBUR (*Musa sapientum*). SÍNTESIS DE CELULOSA MICROCRISTALINA. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 15(6), 286–300.
- Salarbashi, D., Tajik, S., Ghasemlou, M., Shojaee-Aliabadi, S., Noghabi, M. S., & Khaksar, R. (2013). Characterization of soluble soybean polysaccharide film incorporated essential oil intended for food packaging. *Carbohydrate Polymers*, 98(1), 1127–1136. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.07.031>
- Sánchez, H. (2015). *Evaluación del efecto antimicrobiano de la Poisucciimida funcionalizada con extractos del aceite esencial de oregano (Lippia berlandieri Schauer)*. 117.
- Savino, S., & Fraaije, M. W. (2020). The vast repertoire of carbohydrate oxidases: An overview. *Biotechnology Advances*, June, 107634. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107634>
- Seoane, I. T., Fortunati, E., Puglia, D., Cyras, V. P., & Manfredi, L. B. (2016). Development and characterization of bionanocomposites based on poly(3-hydroxybutyrate) and cellulose nanocrystals for packaging applications. *Polymer International*, 65(9), 1046–1053. <https://doi.org/10.1002/pi.5150>
- Siracusa, V., & Lotti, N. (2018). Biobased Plastics for Food Packaging. In *Reference Module in Food Science*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100596-5.22413-x>
- Tajik, S., Maghsoudlou, Y., Khodaiyan, F., Jafari, S. M., Ghasemlou, M., & Aalami, M. (2013). Soluble soybean polysaccharide: A new carbohydrate to make a biodegradable film for sustainable green packaging. *Carbohydrate Polymers*, 97(2), 817–824. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.05.037>
- Tapia, C. P. C. (2017). Envases Inteligentes : *European Cooperation in Science and Technology*.

- Vazquez, A., & Perez, M. V. (2016). *Bioplásticos y plásticos degradables*. May. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1294.4241>
- Voniatis, C., Balsevicius, L., Barczikai, D., Juriga, D., Takács, A., Kőhidai, L., Nagy, K., & Jedlovszky-Hajdu, A. (2020). Co-electrospun polysuccinimide/poly(vinyl alcohol) composite meshes for tissue engineering. *Journal of Molecular Liquids*, 306, 0–8. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112895>
- Weber, C. J., Haugaard, V., Festersen, R., & Bertelsen, G. (2010). Production and applications of biobased packaging materials for the food industry: Food Additives & Contaminants: Vol 19, No sup1. *Food Additives and Contaminants*, 19(January 2013), 37–41. <https://doi.org/10.1080/0265203011008748>
- Weselake, R. J., Chen, G., & Singer, S. D. (2018). Plant bioproducts. *Plant Bioproducts*, 1–268. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8616-3>
- Wong, L. (2019). Biomateriales: del laboratorio al mercado Biomaterials: from laboratory to market. *Revista Cubana de Química*, 31, 63–78.
- YANG, F., CHEN Xu, H. M., Qian, Y., , CAI Xi-xi, CHEN Xuan, D. M., & HUANG Jian-lian, W. S. (2021). *food-derived bioactive peptides*. 20(9), 2313–2332. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63463-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63463-3)
- Yu, S., Sun, J., Shi, Y., Wang, Q., Wu, J., & Liu, J. (2021). Nanocellulose from various biomass wastes: Its preparation and potential usages towards the high value-added products. *Environmental Science and Ecotechnology*, 5, 100077. <https://doi.org/10.1016/j.es.2020.100077>

X. ANEXOS

Anexo 1. Medias del porcentaje de solubilidad

Nivel	Medias de mínimos cuadrados
MC T 3 A	82.456
NC TC 3 B	80.196
NC T 3 C	78.237
MC T 2 D	75.043
MC TC 3 D	74.518
NC TC 2 E	71.374
MC TC 2 F	68.159
NC TC 1 G	66.967
NC T 2 G	66.953
MC TC 1 H	63.017
MC T 1 I	60.162
NC T 1 J	56.518

Nota: Los niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes. T – student $p \leq 0.05\%$

Anexo 2. Medias del porcentaje de remanente

Nivel		Medias de mínimos cuadrados
NC T 1	A	43.482
MC T 1	B	39.838
MC TC 1	C	36.983
NC TC 1	D	33.633
NC T 2	D	33.047
MC TC 2	E	31.839
NC TC 2	F	28.626
MC TC 3	G	25.482
MC T 2	G	24.957
NC T 3	H	21.763
NC TC 3	I	19.804
MC T 3	J	17.544

Nota: Los niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes. T – student $p \leq 0.05\%$

Anexo 3. Medias del incremento de longitud

Nivel		Medias de mínimos cuadrados
MC T	A	6.605
NC T	A	6.505
MC TC	A	6.22
NC TC	A	5.175

Nota: Los niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes. T – student $p \leq 0.05\%$

Anexo 4. Medias del incremento de espesor

Nivel		Medias de mínimos cuadrados
MC T	A	0.689
NC T	B	0.602
MC TC	B	0.59
NC TC	C	0.533

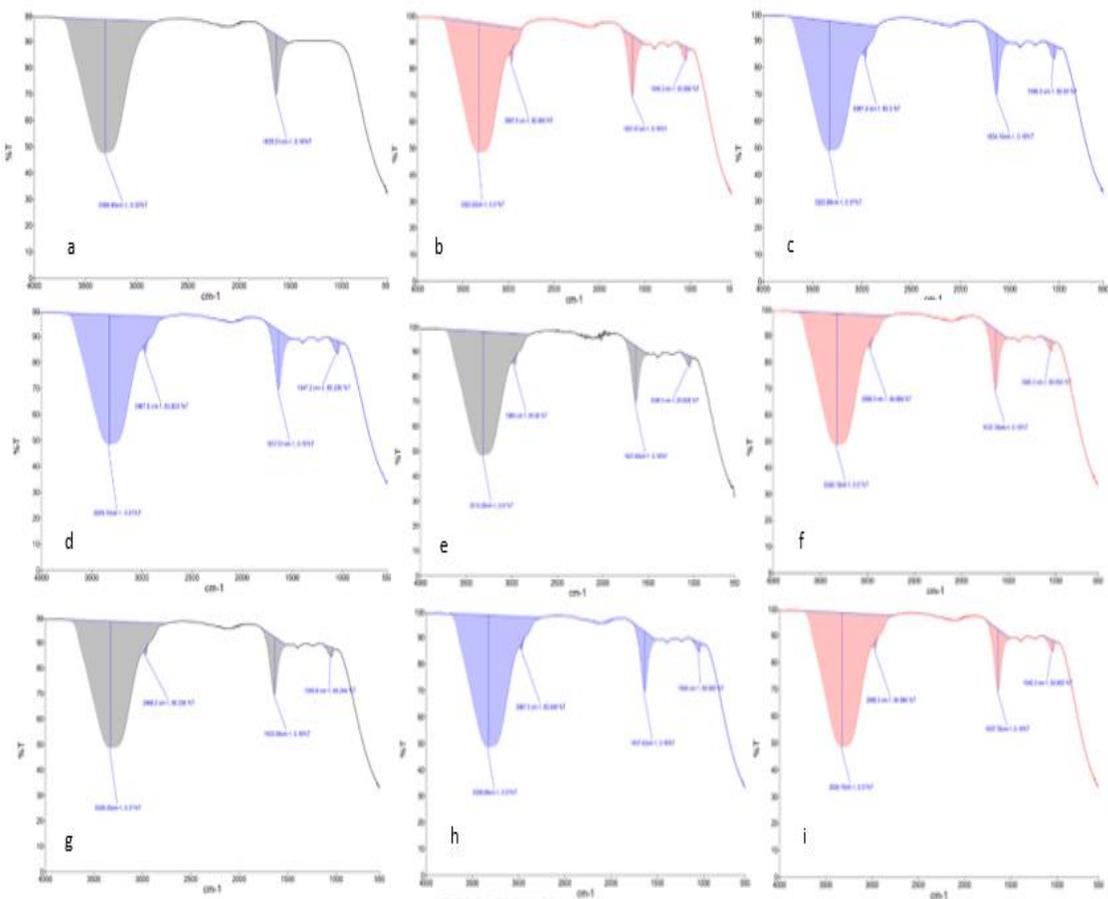
Nota: Los niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes. T – student $p \leq 0.05\%$

Anexo 5. Medias del incremento de peso

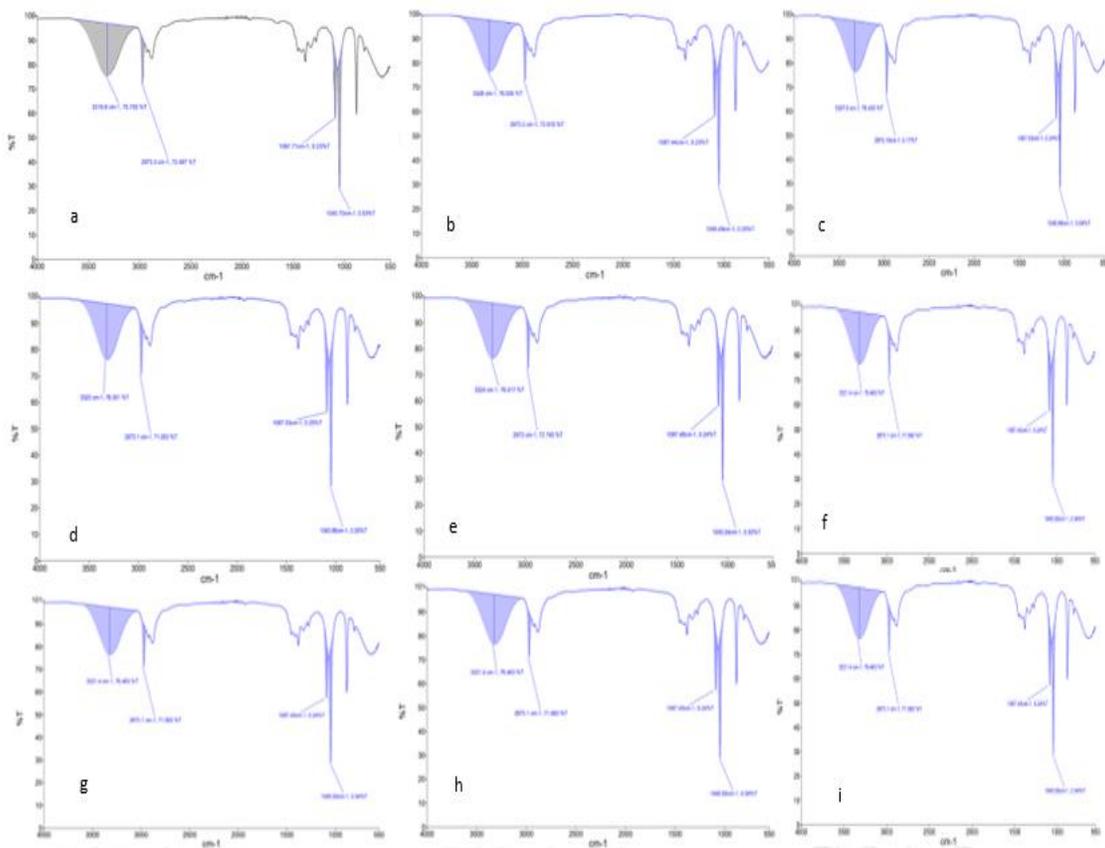
Nivel		Medias de mínimos cuadrados
MC T	A	0.684
NC T	A	0.634
MC TC	B	0.560
NC TC	B	0.556

Nota: Los niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes. T – student $p \leq 0.05\%$

Anexo 6. Espectros de la migración en agua al tiempo inicial (a), 6h (b),12h (c), 24h (d), 48h (e), 168h (f), 336h (g), 504h (h) y 672h (i).



Anexo 7. Espectros de la migración en etanol 93% al tiempo inicial (a), 6h (b), 12h (c), 24h (d), 48h (e), 168h (f), 336h (g), 504h (h) y 672h (i).



Anexo 8. Espectros de la migración en iso-octano al tiempo inicial (a), 6h (b), 12h (c), 24h (d), 48h (e), 168h (f), 336h (g), 504h (h) y 672h (i).

