



Obtención de celulosa, hemicelulosa y lignina a partir de los residuos de la planta de tomate, mediante una metodología experimental, para el desarrollo de biopelículas.

Jiménez Endara, Patricia Aracely

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Petroquímica

Trabajo de Unidad de Integración Curricular, previo a la obtención del título de Petroquímica

Ing. Sayavedra Delgado, Jonathan Javier. Msc

25 de agosto de 2023

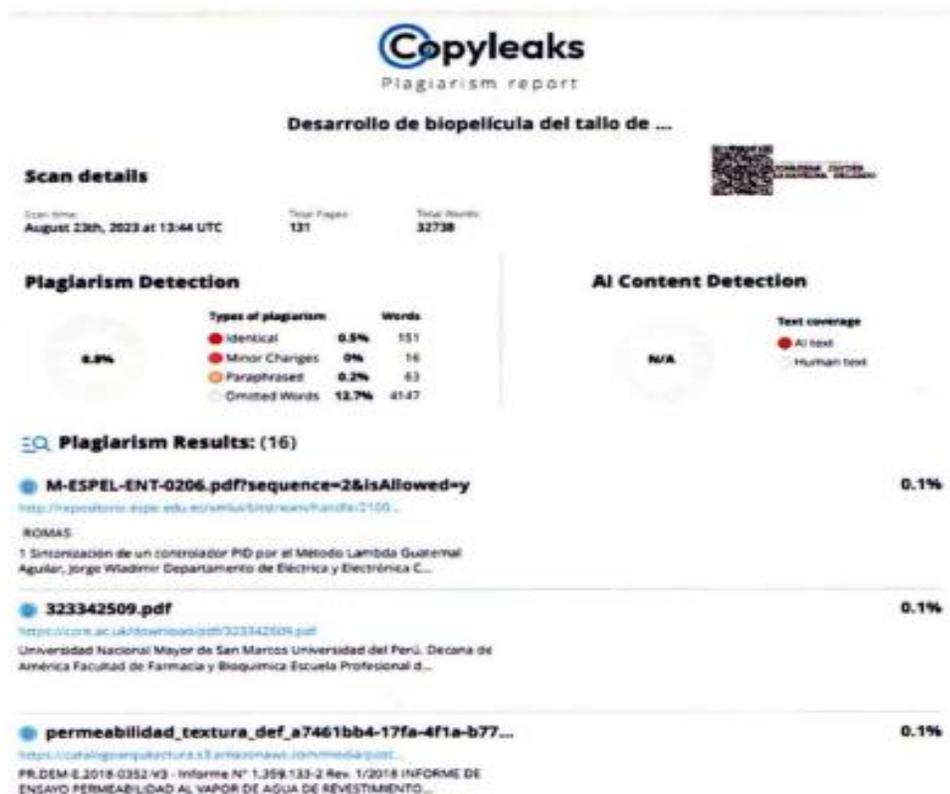
Latacunga



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Petroquímica

Reporte de verificación



Ing. Sayavedra Delgado, Jonathan Javier. Msc

C.C: 0502865850



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Petroquímica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **“Obtención de celulosa, hemicelulosa y lignina a partir de los residuos de la planta de tomate, mediante una metodología experimental, para el desarrollo de biopelículas.”** fue realizado por la **señorita Jiménez Endara, Patricia Aracely**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 25 de agosto de 2023

Ing. Sayavedra Delgado, Jonathan Javier. Msc

C.C: 0502865850



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Petroquímica

Responsabilidad de Autoría

Yo a **Jiménez Endara, Patricia Aracely**, con cédula de ciudadanía n°1003612882, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo integración curricular: **Obtención de celulosa, hemicelulosa y lignina a partir de los residuos de la planta de tomate, mediante una metodología experimental, para el desarrollo de biopelículas** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 25 de agosto de 2023

Jiménez Endara, Patricia Aracely

C.C: 1003612882



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Petroquímica

Autorización de publicación

Yo **Jiménez Endara, Patricia Aracely**, con cédula de ciudadanía n°1003612882, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Obtención de celulosa, hemicelulosa y lignina a partir de los residuos de la planta de tomate, mediante una metodología experimental, para el desarrollo de biopelículas** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 25 de agosto de 2023

Jiménez Endara, Patricia Aracely

C.C: 1003612882

Dedicatoria

A mi padre, por siempre estar a mi lado y creer en mí.

A mi madre, por su amor, esfuerzo y sacrificio, por ser mi soporte incondicional a pesar de la distancia.

A mis hermanas: Ceci, Moni y Jeaneth por suplir el papel de madre en mi niñez.

A mi hermana Gisse, por ser mi compañera, cómplice de alegrías, travesuras y tristezas.

Agradecimientos

Agradezco a Dios, por cada día lleno de luz, amor y esperanza, por bendecirme con cada una de las experiencias que se presentaron durante mi trayectoria universitaria.

Gratitud a mi familia, por su amor y apoyo absoluto en cada etapa, por sus enseñanzas y los valores que han inculcado en mí, inspirándome a ser una mejor persona.

A mis padres, por su esfuerzo, valentía y persistencia, por siempre acogirme con humildad y lealtad, gracias por todo su amor.

A mis hermanas, quienes siempre han estado presentes, de una u otra forma me han ayudado y motivado, han logrado forjar y fortalecer mi camino.

A mis pequeños sobrinos, por siempre ser fuente de amor incondicional.

A mis docentes y técnicos de laboratorio, por ser fuente de inspiración y enseñanza. Especialmente agradezco al Ing. Javier Sayavedra, por siempre estar dispuesto a cooperar e instruirme a través de sus sabios consejos, por su tiempo y sobre todo por la paciencia y confianza.

A mis adorados amigos: Katy, Alexis, Andrés, Jefferson y Juli, personas que han sido testigos de mi crecimiento personal, compañeros de muchas experiencias, risas y abrazos, gracias por demostrarme que la amistad es incondicional e incalculable.

A todas las personas que he tenido la oportunidad de conocer y aprender de ellas.

“La gratitud es la flor más bella que brota del alma”

Henry Ward Beecher

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Carátula.....	1
Reporte de Verificación de Contenidos	2
Certificación	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimientos.....	7
Índice de contenidos.....	8
índice de tablas.....	17
índice de ecuaciones	21
Resumen	22
Abstract.....	23
Capítulo I: Introducción.....	24
Antecedentes.....	24
Planteamiento del problema	25
Justificación e importancia	26

Alcance	28
Objetivos	29
<i>Objetivo general</i>	29
<i>Objetivos específicos</i>	29
Hipótesis.....	29
VARIABLES DE INVESTIGACIÓN	30
<i>Variable dependiente</i>	30
<i>Variable independiente</i>	30
Capítulo II: Fundamentación teórica y referencial	31
Residuos Agroindustriales	31
Potencial de residuos agroindustriales en Ecuador	33
Características de los residuos	35
Descripción de componentes que la biomasa	35
<i>Almidón</i>	35
<i>Celulosa</i>	36
<i>Hemicelulosa</i>	37
<i>Lignina</i>	38
Componentes de bajo peso molecular	41
<i>Extractivos</i>	41
<i>Cenizas</i>	42
Métodos de extracción de celulosa, hemicelulosa y lignina.....	42

Separación de hemicelulosa	43
Tipos de pretratamientos	43
<i>Pretratamientos físicos</i>	43
<i>Pretratamientos químicos</i>	44
<i>Extracción alcalina</i>	44
<i>Extracción ácida</i>	44
<i>Pretratamientos con disolventes</i>	44
<i>Fraccionamiento organosolv</i>	44
<i>Extracción mediante líquido iónico</i>	45
Descripción de la Planta de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>).....	45
Características botánicas	46
<i>Semilla</i>	46
<i>Raíz</i>	47
<i>Tallo</i>	47
<i>Hoja</i>	47
<i>Flor</i>	48
<i>Fruto</i>	48
Características generales	48
Composición química del tallo de la planta de tomate	49
Composición química de las hojas de la planta	50
Composición química del fruto	50
Aprovechamiento de los residuos de la planta de tomate.....	50

Principales compuestos poliméricos	51
<i>Polihidroxicanoato</i>	51
<i>Ácido poliláctico</i>	51
<i>Poliamida 11.....</i>	52
<i>Alcohol polivinílico (PVA)</i>	52
Bioplásticos.....	53
Bioplásticos a nivel mundial.....	54
Segmentos de mercado para polímeros de base biológica	55
Clases de biopolímeros.....	56
<i>Biopolímeros a base de celulosa</i>	56
<i>Biopolímeros a base de almidón</i>	57
<i>Biopolímeros a base de proteínas y lípidos.....</i>	57
Películas a base de mezcla de biopolímeros	58
Membranas/filtros	59
<i>Celulosa bacteriana (BC)</i>	60
<i>Celulosa nanofibrilada o microfibrilada (CNF).....</i>	60
<i>Nanocristales de celulosa (CNC).....</i>	60
Membranas en el tratamiento de aguas.....	61
Métodos en la preparación de membranas a base de nanocelulosa	62
<i>Filtración al vacío</i>	62
<i>Proceso de liofilización</i>	62
<i>Proceso de Impregnación de esteras electro hiladas.....</i>	63

	12
<i>Método de fundición de soluciones</i>	63
Composición de las películas.....	63
Materiales compuestos	64
<i>Matriz polimérica</i>	65
<i>Aditivos como plastificantes</i>	65
<i>Glicerol</i>	66
<i>Goma de Tara (Caesalpinia spinosa)</i>	67
<i>Características generales de la tara</i>	67
<i>Aprovechamiento de las semillas de la tara</i>	68
<i>Extracción de goma de tara</i>	68
Métodos de caracterización.....	69
Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	69
Caracterización de hemicelulosas	71
Ensayos mecánicos.....	71
<i>Módulo de elasticidad</i>	71
Técnicas de análisis térmico.....	72
Ensayos físico-químicos	74
<i>Permeabilidad de vapor de agua</i>	74
<i>Solubilidad y Contenido de humedad</i>	75
Capítulo III: Metodología.....	76
Materiales y métodos.....	76

	13
<i>Equipos</i>	77
<i>Instrumentos de laboratorio</i>	77
<i>Insumos</i>	78
<i>Reactivos</i>	78
Procesamiento de las muestras	79
Primera fase	80
<i>Tratamiento físico-químico</i>	81
<i>Lavado</i>	81
<i>Filtración</i>	81
<i>Secado</i>	81
<i>Trituración y tamización</i>	81
Determinación de humedad	82
Determinación de cenizas	82
Obtención componentes lignocelulósicos	83
Eliminación y determinación de extraíbles	84
<i>Selección de solvente</i>	84
Extracción Soxhlet	84
<i>Lavado y filtrado</i>	84
<i>Secado y pesaje</i>	85
Determinación de hemicelulosa	85
<i>Filtración y acondicionamiento</i>	85
<i>Centrifugación</i>	86

	14
<i>Secado y almacenaje</i>	86
Determinación de lignina	86
<i>Filtración y secado</i>	86
Determinación de Celulosa	87
Blanqueamiento de celulosa	87
Extracción de la goma de tara	88
Diseño experimental eliminación extraíbles	88
Diseño para la obtención de hemicelulosa	92
Diseño experimental para la obtención de lignina	93
Diseño experimental en la obtención celulosa	95
Diseño en el blanqueamiento de celulosa	96
Diseño para la obtención de películas de celulosa	98
Elaboración de la película	100
Pruebas fisicoquímicas	100
<i>Solubilidad</i>	100
<i>Permeabilidad al vapor de Agua</i>	101
<i>Contenido de humedad</i>	102
<i>Espesor</i>	102
Ensayos mecánicos	102
Técnicas de análisis térmico	103
Análisis Termogravimétrico TGA	103

Características estructurales	103
Espectrómetro infrarrojo de transformada de Fourier FTIR.....	103
Capítulo IV: Análisis de Resultados	104
Investigación bibliográfica de porcentajes de componentes lignocelulósicos.....	104
Componentes lignocelulósicos generados por los residuos de la planta de tomate	105
Acondicionamiento de residuos.....	106
Rendimiento de materia prima en los diferentes procesos.	108
Proceso extracción Soxhlet	110
Efectos principales que intervienen en la eliminación de extractivos.....	113
Humedad y contenido de cenizas en residuos	115
Obtención de componentes lignocelulósicos	116
<i>Obtención de Hemicelulosa</i>	116
<i>Obtención de lignina</i>	120
<i>Comparación de tratamientos según Tukey</i>	121
<i>Obtención de Celulosa</i>	123
Obtención de películas	125
Formación de películas mejoradas	128
<i>Interacción de factores entre el PVA y la celulosa</i>	131
<i>Pruebas Físicas</i>	132
<i>Solubilidad</i>	132
<i>Comparaciones que intervienen en el peso perdido con Acetona al 99%</i>	134

<i>Análisis de varianza para pérdida de peso de la película con acetona al 50 %</i>	135
<i>Comparaciones que intervienen en el peso perdido con Acetona al 50%</i>	136
Análisis de la permeabilidad al vapor de agua	140
Ensayo de posible aplicación (película como adsorbente)	144
Pruebas mecánicas	144
Ensayo de resistencia a la tracción	144
Análisis de termogravimetría	150
Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	154
Análisis de FT-IR	156
<i>Hemicelulosa</i>	159
<i>Celulosa</i>	160
<i>FTIR película</i>	161
Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones	164
Conclusiones	164
Recomendaciones	167
Bibliografía	168
Anexos	178

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Características sobre el usos y aplicaciones de los componentes lignocelulósicos</i>	40
Tabla 2 <i>Tipos de bioplásticos</i>	54
Tabla 3 <i>Diseño aplicado en la eliminación de extraíbles</i>	89
Tabla 4 <i>Diseño experimental en la extracción Soxhlet</i>	89
Tabla 5 <i>Diseño para la obtención de hemicelulosa</i>	92
Tabla 6 <i>Diseño en la extracción de lignina</i>	94
Tabla 7 <i>Diseño extracción de celulosa</i>	95
Tabla 8 <i>Diseño para obtener el mejor blanqueamiento de celulosa</i>	97
Tabla 9 <i>Diseño para obtener la mejor película</i>	98
Tabla 10 <i>Composición de los residuos de la planta de tomate</i>	105
Tabla 11 <i>Rendimiento de la materia prima en los diferentes procesos</i>	109
Tabla 12 <i>Rendimiento de la materia prima en los diferentes procesos</i>	110
Tabla 13 <i>Información del factor extracción Soxhlet</i>	111
Tabla 14 <i>Análisis de Varianza extracción Soxhlet</i>	111
Tabla 15 <i>Comparación de tratamientos extracción Soxhlet por Tukey a nivel de confianza del 95%</i>	112
Tabla 16 <i>Comparación datos experimentales con el bibliográfico</i>	114
Tabla 17 <i>Porcentaje de humedad y cenizas que contienen los residuos del tallo de tomate</i>	116
Tabla 18 <i>Información del factor para la obtención de hemicelulosa</i>	117
Tabla 19 <i>Análisis de varianza en la obtención de hemicelulosa</i>	117
Tabla 20 <i>Comparaciones de tratamientos obtención de hemicelulosa al 95% de nivel de confianza</i>	118
Tabla 21 <i>Información del factor extracción de lignina</i>	121
Tabla 22 <i>Análisis de Varianza extracción de lignina</i>	121
Tabla 23 <i>Comparación de tratamientos en la extracción de lignina</i>	122

Tabla 24 <i>Pruebas obtención de películas previas al diseño experimental</i> _____	126
Tabla 25 <i>Información del factor en la fabricación de películas mejoradas</i> _____	129
Tabla 26 <i>Análisis de Varianza fabricación de películas mejoradas</i> _____	130
Tabla 27 <i>Información del factor prueba de solubilidad</i> _____	132
Tabla 28 <i>Análisis de Varianza prueba de solubilidad</i> _____	133
Tabla 29 <i>Comparación de tratamientos solubilidad en acetona al 99%</i> _____	134
Tabla 30 <i>Análisis de Varianza solubilidad en acetona al 99%</i> _____	135
Tabla 31 <i>Comparación de tratamientos solubilidad en acetona al 50%</i> _____	137
Tabla 32 <i>Comparaciones de la solubilidad en acetona al 99 y 50%</i> _____	139
Tabla 33 <i>Datos del tiempo y la masa prueba de permeabilidad</i> _____	140
Tabla 34 <i>Permeabilidad en función de los tratamientos y humedades relativas controladas</i> _____	142
Tabla 35 <i>Resultados de las propiedades de tracción de las películas de PVA y celulosa</i> _____	147
Tabla 36 <i>Porcentajes de pérdida de masa en función de la temperatura</i> _____	153
Tabla 37 <i>Grupos principales de la celulosa, hemicelulosa y lignina en función de la longitud de onda</i> _____	158
Tabla 38 <i>Comparación de picos característicos</i> _____	162

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Biomasa residual en el Ecuador</i> _____	34
Figura 2 <i>Características físicas y estructurales de los residuos agroindustriales</i> _____	35
Figura 3 <i>Estructura molecular de la celulosa</i> _____	37
Figura 4 <i>Azúcares monoméricos de la hemicelulosa</i> _____	38
Figura 5 <i>Estructura molecular de la lignina</i> _____	39
Figura 6 <i>Composición química de residuos del tomate y otras hortalizas celulósicas</i> _____	49
Figura 7 <i>Estructura del monómero del PVA</i> _____	53
Figura 8 <i>Representación de los segmentos de mercado para polímeros de base biológica</i> _____	56
Figura 9 <i>Curvas de esfuerzo-deformación</i> _____	72
Figura 10 <i>Diagrama de pretratamientos y tratamientos físico-químicos de los residuos</i> _____	80
Figura 11 <i>Resumen de la extracción de componentes lignocelulósicos.</i> _____	83
Figura 12 <i>Agrupación de Datos</i> _____	106
Figura 13 <i>Cambios de apariencia en los diferentes procesos</i> _____	107
Figura 14 <i>Diagrama de efectos principales para residuos libres de extraíbles</i> _____	113
Figura 15 <i>Interacción de Factores que intervienen en la extracción Soxhlet</i> _____	115
Figura 16 <i>Representación gráfica del contenido la hemicelulosa</i> _____	120
Figura 17 <i>Representación gráfica de la cantidad de lignina</i> _____	123
Figura 18 <i>Representación gráfica de la cantidad de celulosa extraída</i> _____	124
Figura 19 <i>Representación gráfica de los efectos principales</i> _____	125
Figura 20 <i>Representación gráfica de las películas obtenidas</i> _____	127
Figura 21 <i>Representación gráfica de la apariencia de las películas previas</i> _____	128
Figura 22 <i>Representación gráfica de la apariencia de las películas mejoradas</i> _____	129
Figura 23 <i>Gráfica de interacción entre el PVA y la celulosa</i> _____	131

Figura 24 Representación gráfica de la pérdida de peso por la solubilización en acetona al 99% _____	138
Figura 25 Representación gráfica de las líneas de tendencia _____	142
Figura 26 Figura Tratamientos de permeabilidad al vapor de agua _____	143
Figura 27 Ensayo posible aplicación de la película como membrana de adsorción _____	144
Figura 28 Representación gráfica de la Fuerza vs desplazamiento en P1 _____	145
Figura 29 Representación gráfica de la Fuerza vs desplazamiento en P2 _____	146
Figura 30 Representación gráfica de la Fuerza vs desplazamiento en P3 _____	148
Figura 31 Representación gráfica de la Fuerza vs desplazamiento en P4 _____	149
Figura 32 Termograma TGA de P1 _____	150
Figura 33 Termograma TGA de P3 _____	151
Figura 34 Termograma TGA de la película de control _____	152
Figura 35 Termograma DSC de PVA _____	155
Figura 36 DSC película P2 _____	155
Figura 37 DSC película control _____	156

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 <i>Porcentaje de humedad por diferencia de pesos</i>	82
Ecuación 3 <i>Porcentaje de cenizas</i>	83
Ecuación 4 <i>Porcentaje Extraíbles</i>	85
Ecuación 5 <i>Porcentaje de solubilidad</i>	101
Ecuación 6 <i>Porcentaje de permeabilidad al vapor de agua</i>	101

Resumen

En este Trabajo, se determinó a la celulosa como el principal componente lignocelulósico del tallo de tomate mediante investigación bibliográfica y trabajo experimental, para la obtención de compuestos con valor agregado resultantes de los residuos generados post el cultivo de la planta. El proceso incluyó acondicionamiento de residuos mediante técnicas físicas como: lavado, triturado y secado, además de tratamientos químicos como la eliminación de extractivos mediante Soxhlet y el uso de solvente orgánico (etanol), posteriormente se sometió las muestras de residuos a hidrólisis alcalina usando $NaOH$, además de hidrólisis ácida H_2SO_4 para la eliminación de ligninas y hemicelulosas, inclusive procesos de blanqueamiento empleando hipoclorito comercial al 5%. Estos procesos se llevaron a cabo mediante diseño experimental factorial, el cual permitió la evaluación de análisis de varianza y comparación de variables por el método Tukey, llegando a obtener los mejores tratamientos de extracción. También se aplicó diseño experimental para la generación de biopelículas a base de celulosa y alcohol polivinílico (PVA), a través de ensayos previos, empleando glicerol y tara. Además, se empleó diseños que facilitaron identificar las mejores condiciones de las películas, con la ayuda de pruebas físicas, mecánicas y calorimétricas como: pruebas de solubilidad, permeabilidad, ensayos de tracción, análisis termogravimétrico (TGA), calorimetría diferencial de barrido (DSC). Mientras que el análisis de espectroscopia (FTIR), indicó la presencia de grupos funcionales presentes en las estructuras poliméricas. Finalmente, este conjunto de técnicas posibilitó determinar la baja solubilidad de las películas en acetona y componentes derivados del petróleo, de igual forma la determinación de buenas propiedades de barrera como la permeabilidad. Por lo tanto, se asocia el uso probable de las películas como membranas de adsorción en el tratamiento de aguas, convirtiéndose en una alternativa que aporta a la mitigación de contaminación ambiental, aprovechando las diferentes características y propiedades de los residuos generados por el cultivo de la planta de tomate.

Palabras clave: celulosa, hemicelulosa, lignina, PVA, tara, biopelículas.

Abstract

In this work, cellulose is determined as the main lignocellulosic component of the tomato stem through bibliographic research and experimental work, to obtain compounds with added value resulting from the residues generated post-cultivation of the plant. The waste inclusion process through physical techniques such as: washing, grinding and drying, in addition to chemical treatments such as the removal of extractives by Soxhlet and the use of organic solvent (ethanol), subsequently the waste samples were subjected to alkaline hydrolysis using $NaOH$, in addition to acid hydrolysis H_2SO_4 for the elimination of lignins and hemicelluloses, including bleaching processes using 5% commercial hypochlorite. These processes were carried out through factorial experimental design, which allowed the evaluation of analysis of variance and comparison of variables by the Tukey method, reaching the best extraction treatments. An experimental design was also applied for the generation of biofilms based on cellulose and polyvinyl alcohol (PVA), through previous tests, using glycerol and tara. In addition, designs were used that facilitated the identification of the best conditions of the films, with the help of physical, mechanical and calorimetric tests such as: solubility tests, permeability, tensile tests, thermogravimetric analysis (TGA), differential scanning calorimetry (DSC). While the analysis of spectroscopy (FTIR), indicated the presence of functional groups present in the polymeric structures. Finally, this set of techniques made it possible to determine the low solubility of the films in acetone and petroleum-derived components, as well as the determination of good barrier properties such as permeability. Therefore, the probable use of the films as adsorption membranes in water treatment is associated, becoming an alternative that contributes to the mitigation of environmental contamination, taking advantage of the different characteristics and properties of the residues generated by the cultivation of the tomato plant.

Keywords: cellulose, hemicellulose, lignin, PVA, tara, biofilms.

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

El incremento de la población mundial genera gran demanda en la producción de alimentos, la cual permite satisfacer las necesidades de la sociedad y garantizar la seguridad alimentaria, no obstante, se originan elevadas cantidades de residuos agroindustriales, llegando a ser parte de la problemática ambiental, debido a la mala gestión y la poca recepción de procesos adecuados en la disposición final de los residuos, generados por la agroindustria en varias zonas del mundo (Aguiar et al., 2021).

A nivel mundial se desecha alrededor de la tercera parte de los alimentos de la dieta diaria alimenticia en toda la cadena productiva, en otras palabras, desde el cultivo de la materia prima hasta el punto de venta. Debido al incremento de residuos orgánicos en todo el mundo, es necesario la implementación de estrategias que permitan reducir el impacto ambiental, por ejemplo, el desarrollo de subproductos con valor agregado, con el fin de aprovechar al máximo las propiedades físicas y químicas que presentan los residuos generados. Entre las opciones más atractivas están: la obtención de biomateriales, generación de biocombustibles, elaboración de polímeros biodegradables, transformación de residuos a compost y la generación de subproductos útiles en el campo medicinal (Rashwan et al., 2021).

El tomate (*Solanum lycopersicum*) es una de las especies más cultivadas alrededor del mundo, por ser un producto con extraordinarias propiedades nutricionales, además de ser un alimento de consumo masivo. Aun así, gran parte de la planta de tomate se desecha en vertederos a cielo abierto o en los campos de cultivo, naturalmente estos residuos vegetales tardan demasiado tiempo en descomponerse, por su elevado volumen de material lignocelulósico (Manrriquez et al., 2021).

Según el Banco mundial en el año 2020, alrededor de 17.37 millones de personas, generaron alrededor de 5 MMTPA de residuos orgánicos. En el Ecuador actualmente se cultiva alrededor de 1.691 ha de tomate riñón, contribuyendo con el 0.6% del valor agregado bruto agropecuario, principalmente en zonas como Chimborazo, Imbabura, Pichincha, Tungurahua, Guayas y otras. No obstante, se ocasiona la acumulación de residuos agroindustriales por la mala administración. Según estudios del 2020, el país recolecta alrededor de 604 toneladas de residuos orgánicos por día, entre los cuales se encuentran, hojas, tallos y raíces, en otros términos, cuantiosos porcentajes de biomasa, representando al 57.3% del total de residuos generados (Ministerio del Ambiente y Agua del Ecuador, 2020).

Por este motivo, se plantea promover el uso de los residuos de la planta de tomate, mediante la extracción de materias primas secundarias, como la lignina, celulosa y hemicelulosa, para la elaboración de materiales biocompatibles como biopelículas, gomas, adhesivos, espesantes y materiales poliméricos que pueden reemplazar a membranas artificiales, debido a las características, físicas, químicas y biológicas que estos poseen, las cuales pueden ser fabricadas a través de modificaciones o procesos como el método casting, con el objetivo de reutilizar los residuos generados por los cultivos de tomate, después de cada cosecha (Riera et al., 2018).

Planteamiento del problema

Hoy en día, un elevado porcentaje de residuos generados por el sector agrícola son descartados en zonas abiertas, suelos vacíos o incinerados de una forma desorganizada, ocasionando contaminación o bloqueo de fuentes hídricas, inducidos por el arrastre de partículas mediante el flujo del aire, por otra parte, la inexistencia de planes de control de disposición final de residuos vegetales, impiden mantener la armonía entre el ecosistema y la sociedad.

En la economía ecuatoriana el sector agroindustrial aporta con el 8% del PIB, sin embargo, la realidad alterna, conlleva a que esta contribución produzca cantidades significativas de residuos,

ocasionando contaminación de medios abióticos, bióticos y socioeconómicos, inclusive se suscitan pérdidas económicas por el problema de una inadecuada gestión en todo el proceso productivo de la materia prima (CAF, 2021); (Bonilla et al., 2020).

Por consiguiente, es imprescindible la aplicación de alternativas que mitiguen la problemática, a través del empleo de residuos vegetales, en la extracción de materias secundarias con valor añadido, como la celulosa, lignina y hemicelulosa, que se consiguen mediante transformaciones físicas y químicas, de residuos originados por plantas con gran contenido lignocelulósico, como lo es la planta de tomate. Hasta ahora, el Ecuador cuenta con pocos proyectos referentes al aprovechamiento de este tipo de componentes, los que más destacan son: EMAC, EMGIRS EP y El Centro Integral de Manejo de residuos sólidos de Loja, empresas públicas que se dedican a la generación de abonos orgánicos (Silva et al., 2021).

Por otra parte, es importante resaltar que varias zonas del Ecuador dedicadas a la agricultura, no cuentan con procesos adecuados, en la gestión de residuos agrícolas, por lo cual se ignora los beneficios que se puede obtener de la biomasa generada en los cultivos.

Justificación e importancia

Es indispensable la implementación de procesos, para la adecuada gestión de residuos originados por el sector agrícola en toda la cadena de valor, además de la identificación de materias con características adicionales importantes. En realidad, la primera opción para atenuar la contaminación, es el compostaje, técnica que permite la degradación de restos orgánicos, en función de determinadas condiciones para evitar, que los residuos sean transportados a vertederos a cielo abierto o incinerados, ocasionando contaminación por gases efecto invernadero originando la alteración de fuentes hidrológicas.

A pesar de que esta técnica incrementa materia orgánica al suelo, mejora la fertilidad y estructura, se ignoran los subproductos de gran utilidad que pueden extraerse mediante la aplicación de otro tipo de tratamientos. Un mecanismo clave que aplica la economía circular, describe estrategias hacia un camino sostenible, pretendiendo controlar la acumulación de residuos provocados por el consumo masivo. Naturalmente en años posteriores, debido a la falta de procesos de gestión adecuada de residuos y al crecimiento poblacional, se desarrollarán enormes impactos ambientales, por ello el interés en el aprovechamiento de residuos vegetales (Ortiz et al., 2021).

Recientemente estudios afirman que la biomasa disponible en el Ecuador para usos secundarios ronda alrededor de 19 MMTPA, dichos datos reúnen residuos de origen agrícola, ganadero y forestal, por esta razón, la presente investigación pretende extraer componentes como la lignina, celulosa y hemicelulosa, los cuales son de gran utilidad en industrias farmacéuticas, alimenticias, de polímeros y otros (Mármol, 2022).

Por consiguiente, se procura el estudio acerca de las propiedades físicas y químicas que aportan los componentes de los residuos del tallo de la planta de tomate, además de la identificación de aplicaciones, que se pueden obtener mediante transformaciones químicas y combinaciones con otro tipo de materia prima, que le aporten características variables y biocompatibles. Por ejemplo, la elaboración de biopelículas o membranas para el tratamiento de aguas contaminadas, por la industria textil, metalúrgica, petrolera y demás (Silva et al., 2021).

El desarrollo de materiales con particularidades biodegradables, es una alternativa enfocada en el reemplazo de materiales sintéticos, inclusive presentan funcionalidades interesantes y variables, a causa de las características de superficie y la conformación de los grupos funcionales. La generación de películas formadas por componentes orgánicos, pueden ser reforzadas a través de la adición de otros

materiales naturales que aportan propiedades mecánicas como fuerza de tensión, adsorción, elasticidad y permeabilidad, dependiendo del uso que se le quiera otorgar (Sonawane et al., 2022).

El proyecto busca enfocarse en la reutilización y el empleo de recursos renovables. En otras palabras, el uso de materia prima proveniente de residuos vegetales de la planta de tomate, previniendo la contaminación ambiental, la acumulación de residuos, además, el aprovechamiento del potencial de los materiales lignocelulósicos, con la finalidad de cooperar con el cumplimiento de los principios de la química verde y el desarrollo de una economía circular, por medio de la elaboración de productos secundarios amigables con el ambiente (Whiteker, 2019).

Considerando las características de los residuos se obtienen compuestos con propiedades versátiles. Estos materiales pueden ser membranas a base de celulosa, las cuales pueden ser empleadas para la adsorción de pigmentos en aguas residuales de industrias textiles o incluso para la filtración de compuestos que causan contaminación en diferentes fuentes de agua. También es importante mencionar el empleo de nanocelulosa en el tratamiento de aguas tiende a ser efectivo. Dado que, estas membranas presentan buena área superficial, además de grupos funcionales que atraen a contaminantes. Conjuntamente, estos materiales pueden someterse a modificaciones con la finalidad de aumentar la eficiencia en la limpieza de aguas contaminadas (Mautner, 2020).

Alcance

El presente trabajo tuvo como objetivo esencial la extracción de componentes lignocelulósicos, principalmente la celulosa, procedente de los residuos del tallo de tomate, la cual, se mezcla con aditivos y plastificantes, logrando elaborar a escala reducida, películas biodegradables multifuncionales. Se procuró identificar e implementar una forma más interesante al problema de la contaminación ambiental por la generación de residuos de origen vegetal, logrando aportar opciones sostenibles y de

valor agregado, por medio de la elaboración de las películas a base de celulosa, PVA, Tara, glicerol y otros productos biodegradables.

Objetivos

Objetivo general

Obtener celulosa, hemicelulosa y lignina a partir de los residuos de la planta de tomate, mediante una metodología experimental, para el desarrollo de biopelículas.

Objetivos específicos

Identificar componentes útiles en la fabricación de biopelículas a partir de residuos generados por la planta de tomate, según la investigación bibliográfica correspondiente.

Extraer celulosa, hemicelulosa y lignina de los residuos mediante trabajo experimental para su posterior análisis.

Obtener subproductos con valor agregado a través de la modificación de la celulosa, hemicelulosa y lignina, por transformación química.

Demostrar la importancia de los componentes obtenidos, con base en el análisis de las características y propiedades empleados en el diseño de una aplicación orientada a diferentes sectores.

Hipótesis

¿Es factible la elaboración de biopelículas mediante la extracción de componentes como la celulosa, hemicelulosa y lignina, a partir de residuos de la planta de tomate, con la intención de mejorar las propiedades de las películas?

Variables de investigación***Variable dependiente***

- Rendimiento de la extracción de componentes lignocelulósicos.
- Permeabilidad de películas.
- Transparencia de las películas.
- Rigidez de películas.
- Volumen de Agua.
- Molde de secado.

Variable independiente

- Tiempo del proceso de secado.
- Temperatura de secado.
- Relación de formación de películas entre plastificante y celulosa.

Capítulo II

Fundamentación Teórica y referencial

Residuos Agroindustriales

El crecimiento demográfico en muchas zonas del mundo causa inestabilidad alimentaria, debido a la gran demanda de productos esenciales en la dieta del ser humano, inclusive genera una disputa entre seres humanos y animales. Acorde con lo anterior, la organización para la agricultura y la alimentación (FAO) indica que “más de 821 millones de personas sufren de desnutrición”, particularmente en países del continente africano, Medio Oriente y en algunas zonas de América Latina, a raíz de este incremento se ha generado índices bajos de productividad agrícola, disparidad de tierras y el empobrecimiento de agricultores (Organización para la agricultura y la alimentación [FAO], 2018, p.3).

De manera análoga el incremento de población da como resultado la degradación de recursos en mayor proporción, al igual que la destrucción y deforestación de suelos, a causa del nivel de consumo descontrolado y desperdicio. Generando mayores impactos en el medio ambiente y en la seguridad alimentaria, por ello la importancia de promover estrategias que posibiliten el equilibrio entre la población, recursos y medio ambiente, evitando la acumulación de elevadas cantidades de desechos originados por el sector agroindustrial en toda la cadena de producción de alimentos, ignorando el aprovechamiento de la biomasa vegetal (Aguiar et al., 2021).

Por otro lado, los residuos de alimentos de consumo diario, sobre todo están compuestos por hojas, tallos, cortezas, bagazo, semillas entre otros. Materia sustanciosa en componentes orgánicos, eventualmente la biomasa que se deriva de las actividades agrícolas es incinerada a cielo abierto o abandonada en rellenos, convirtiéndose en un problema ambiental, puesto que este tipo de prácticas causan contaminación de fuentes hídricas, además de que dan origen a la emisión de gases efecto

invernadero por la disposición inadecuada. En vista de mitigar este tipo de efectos se opta por elaborar composta, sin embargo, no se aprovecha las diferentes propiedades de los residuos (S. Mendoza, 2021).

En el Ecuador el sector dedicado a actividades agrícolas aporta de gran manera la economía nacional, mediante los cultivos de banano, café, cacao, arroz, papa entre otros. Paralelamente se originan porcentajes elevados de residuos por el sector agroindustrial, ocasionando consecuencias ambientales, debido a la inexistencia de suficientes programas que permitan el aprovechamiento de los residuos o la gestión adecuada. De manera que se desestima las características físicas, químicas y biológicas que contienen residuos orgánicos, útiles para la generación de biocombustibles, polímeros de base biológicas, subproductos ricos en materia lignocelulósica. Materia empleada en la elaboración de fibras en industrias textiles, inclusive materiales biocompatibles en la biomedicina, lo cual contribuiría al crecimiento económico del país (Silva et al., 2021).

Generalmente estos residuos se obtienen durante las etapas de postcosecha y transformación, un ejemplo claro de la cantidad de residuos generados por la industria es la biomasa disponible de los restos de la palma africana después del proceso de postcosecha. En otras palabras, para la producción de aceite de palma, únicamente se emplea el 9% de los componentes del fruto, mientras que el 91% restante es desechado. Así mismo el procesamiento de café aprovecha el 9.5% de la planta, entre tanto el remanente se designa como residuo. En base a estos porcentajes se observa la disponibilidad de biomasa para la extracción de componentes con valor agregado (Godoy et al., 2020).

De este modo, se considera a los residuos, como la biomasa disponible para la obtención de materia bioenergética o no energética, dependiendo del origen. Ordinariamente la biomasa suele ser clasificada en 2 principales ramas, la primera corresponde a biomasa residual y la segunda se deriva de cultivos energéticos. Siendo los residuos agroindustriales los que se originan en cosechas de árboles frutales o vegetales, recolectando cantidades considerables de ramas, cortezas, raquis, cáscaras y tallos,

residuos concentrados en materia lignocelulósica. Reflejando porcentajes entre el 10 al 25% en lignina, 40 al 80% en celulosa y 15 al 30% correspondiente a hemicelulosa, los cuales pueden variar según el tipo de especie cultivada (Vargas et al., 2021).

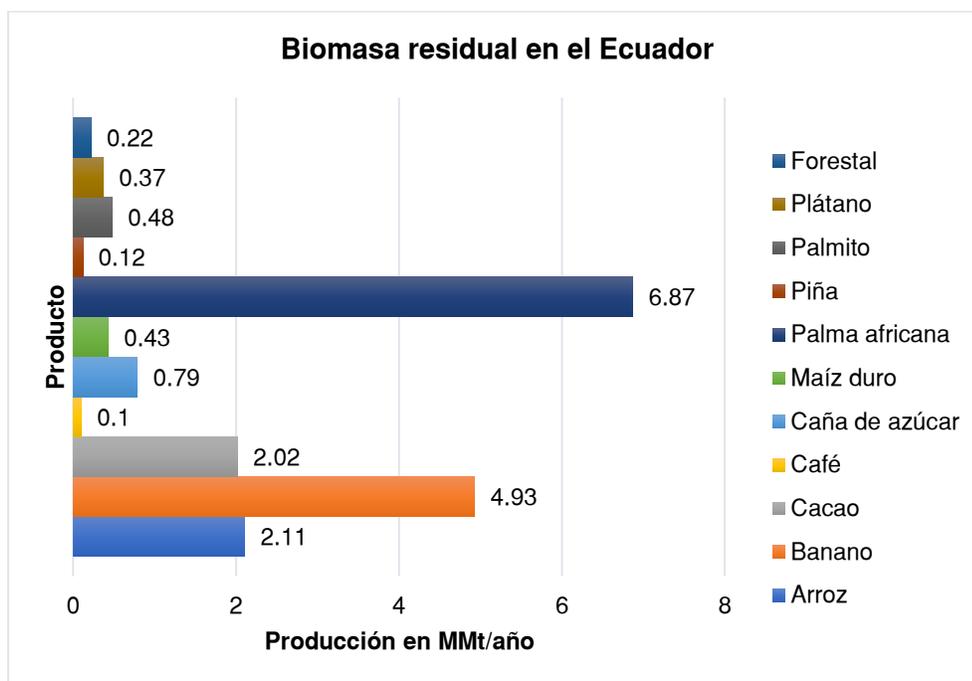
Potencial de residuos agroindustriales en Ecuador

En el Ecuador, la biomasa disponible de acuerdo al estudio realizado por Mármol (2022), muestra que la biomasa aprovechable es de aproximadamente 19.3 millones de toneladas por año, materia que asocia residuos del sector agrícola, ganadero y forestal, fuente importante de materia prima renovable, con una amplia gama de características físicas, químicas y energéticas, es así que, la biomasa residual originada por la actividad agrícola en el Ecuador es de 18.23 MMTPA, que probablemente pueden ser usados para la generación de bioenergía, además de biopelículas o fibras empleadas en la industria textil y el tratamiento de aguas (Vargas et al., 2021).

En la Figura 1, se despliega la producción de biomasa en el Ecuador respecto a productos convencionales como; el arroz, banano, cacao, café, caña de azúcar, palma africana entre otros. Obteniendo mayores porcentajes de biomasa respecto a raquis, pseudotallo, hojas, fibras de los diferentes cultivos.

Figura 1

Biomasa residual en el Ecuador



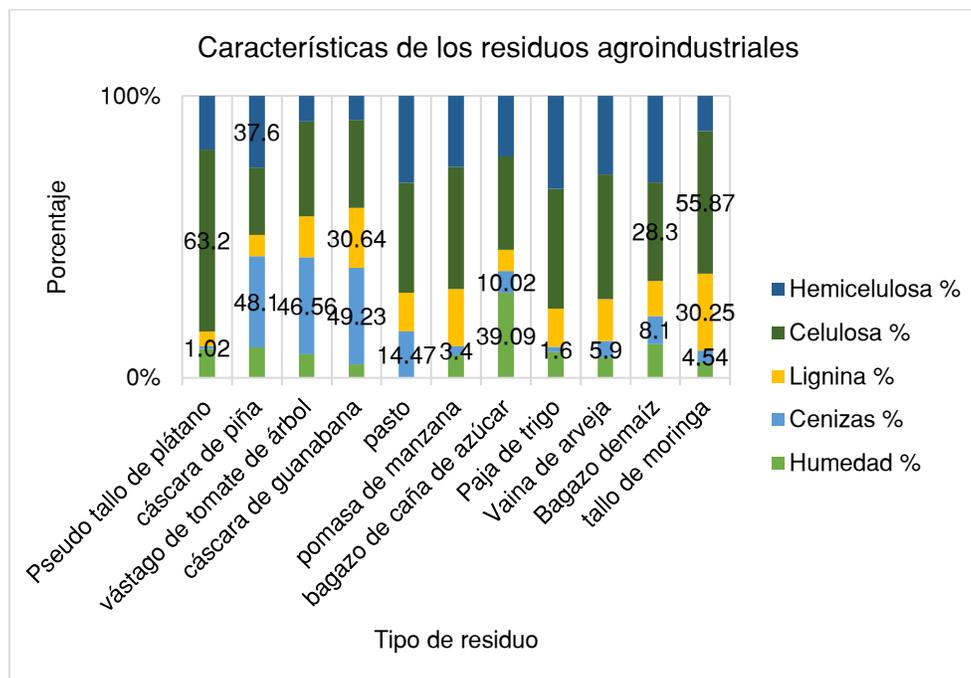
Nota. El gráfico representa la producción de biomasa en el Ecuador. *Tomado de Potencial de Biomasa en América del Sur para la Producción de Bioplásticos* (p.11) por Vargas et al., 2021, Instituto Superior Tecnológico Crecer más.

Según el ministerio del ambiente en el Ecuador las metodologías aplicadas para mitigar la contaminación generada por los residuos orgánicos urbanos son: la digestión anaerobia, el sistema aerobio y el secado, no obstante, el país no cuenta con un programa para tratar los residuos remanentes en las áreas rurales, dedicadas a la actividad agrícola (Ministerio del Ambiente y Agua del Ecuador, 2020).

Características de los residuos

Figura 2

Características físicas y estructurales de los residuos agroindustriales



Nota. El gráfico representa los porcentajes de humedad, cenizas, contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina de algunos residuos agroindustriales. Adaptado a diferentes fuentes bibliográficas.

(Rojas et al., 2019)

Descripción de componentes que la biomasa

Almidón

La biomasa agrícola proviene de diferentes productos vegetales que poseen componentes principales susceptibles a cambios físicos y químicos, para su posterior empleo. Entre los constituyentes con mayor porcentaje se encuentra el almidón, el cual es un polisacárido muy común en biomasa originada por los residuos del trigo, maíz y yuca convirtiéndose en un polímero útil en la síntesis de

materias para la generación de bioplásticos, al mismo tiempo estas están sujetas a limitaciones, como la baja resistencia a la humedad, propiedades mecánicas reducidas, así como, reducida elongación y poca flexibilidad, incluso por su elevada viscosidad, los almidones requieren ser tratados químicamente, con la finalidad de transformarlos en materias con mayor índice de procesabilidad (Vargas et al., 2021).

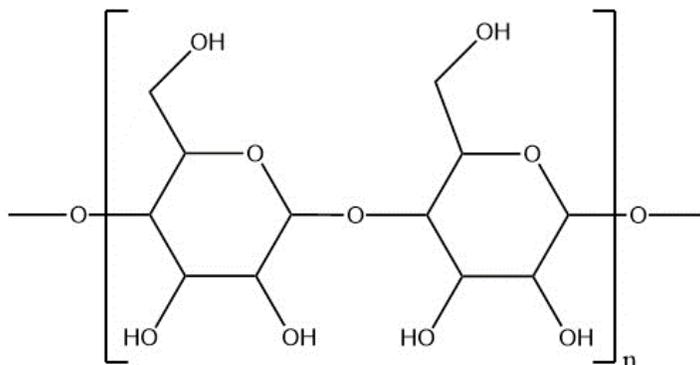
Al mismo tiempo, el almidón genera compuestos como el ácido láctico mediante un proceso de fermentación microbiana, el cual es usado en la obtención del polímero de ácido poliláctico (PLA), materia prima amigable con el medio ambiente, útil en la fabricación de artículos como botellas, bandejas, cintas de embalaje, mercancías de uso común, debido las buenas propiedades de barrera que posee y a la biodegradabilidad a determinadas condiciones (Vargas et al., 2021).

Celulosa

Se establece a la celulosa como el polímero natural más abundante en la naturaleza, se encuentra en las paredes celulares de varias especies vegetales, la celulosa se caracteriza por ser un polisacárido constituido por la unión de monosacáridos, esta biomolécula orgánica se compone por moléculas de $\beta(1-4)$ D-glucopiranosa ($C_6H_{12}O_6$), de hecho, la unidad repetitiva de la celulosa es la anhidro-D-glucosa (AGU), moléculas formadas por enlaces covalentes entre monosacáridos, debido a la reacción de condensación, entre un aldehído y un hidroxilo, generalmente la celulosa, está constituida por aproximadamente 3000 a 10000 unidades de glucosa, siendo una fibra que proporciona propiedades estructurales especiales en las paredes de las células vegetales, los enlaces entre el hidrógeno y grupos hidroxilo de la molécula proporciona una red cristalina (Vallejos & Area, 2019).

Figura 3

Estructura molecular de la celulosa



Nota. La figura representa la estructura molecular de la celulosa: enlaces β glucosídico (1-4-β-d-anhidro glucopiranososa). Tomado de Nanocelia Producción y usos de la celulosa nanofibrilada y microfibrilada (p. 22) por Vallejos, M. E y Area, M. C, 2019, Red CYTED-NANOCELIA.

Hemicelulosa

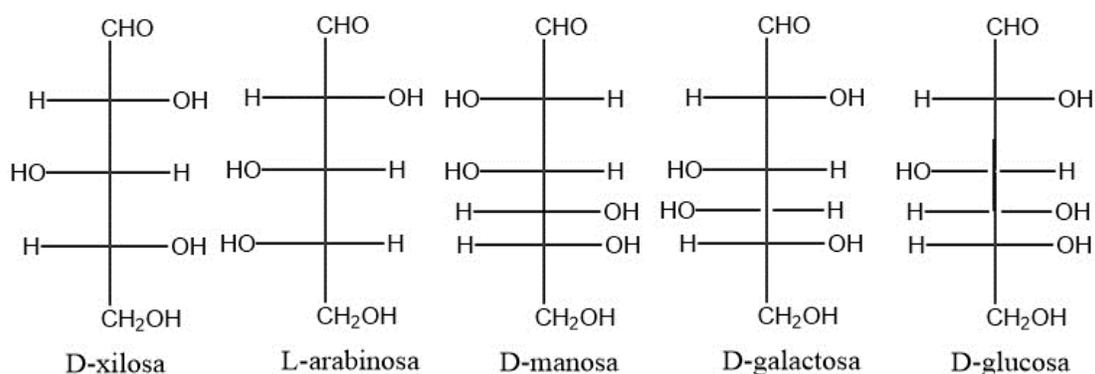
La hemicelulosa es un hetero polímero, compuesto por cinco monosacáridos diferentes como, D-glucosa, D-manosa, D-galactosa, D-xilosa y L-arabinosa, formando cadenas lineales y ramificadas de 100 y 200 unidades, generalmente la hemicelulosa representa alrededor del 23-32% del contenido de la biomasa, siendo los xilanos las hemicelulosas predominantes en la naturaleza, este componente es el encargado de enlazar las moléculas de celulosa y lignina de las especies vegetales, además, se singulariza por poseer una estructura amorfa e hidrofílica, se origina durante la fotosíntesis de las plantas, universalmente se encuentra en mayor proporción en plantas madereras, en comparación con la celulosa, almidón o lignina, este elemento no suele ser de gran valor comercial, debido a que suele hidrolizarse con mayor rapidez (Dhia, 2021).

Del mismo modo, al ser un polímero compuesto por diferentes monosacáridos, existen diferentes tipos de hemicelulosas, siendo las galacto glucomanos, arabinoglucuronixalos y

arabinogalactanos los que predominan en especies coníferas como los pinos, cedros entre otros, mientras que, en especies de plantas como latifoliadas y gramíneas o más conocidas como plantas herbáceas, predominan las hemicelulosas del tipo glucuronoxilanos, glucomananos, galacto glucomananos entre otros (Vallejos & Area, 2019).

Figura 4

Azúcares monoméricos de la hemicelulosa



Nota. Los gráficos representan la estructura de tres azúcares monoméricos presentes en la hemicelulosa. Tomado de Tomado de Nanocelia Producción y usos de la celulosa nanofibrilada y microfibrilada (p. 23) por Vallejos, M. E y Area, M. C, 2019, Red CYTED-NANOCELIA.

Lignina

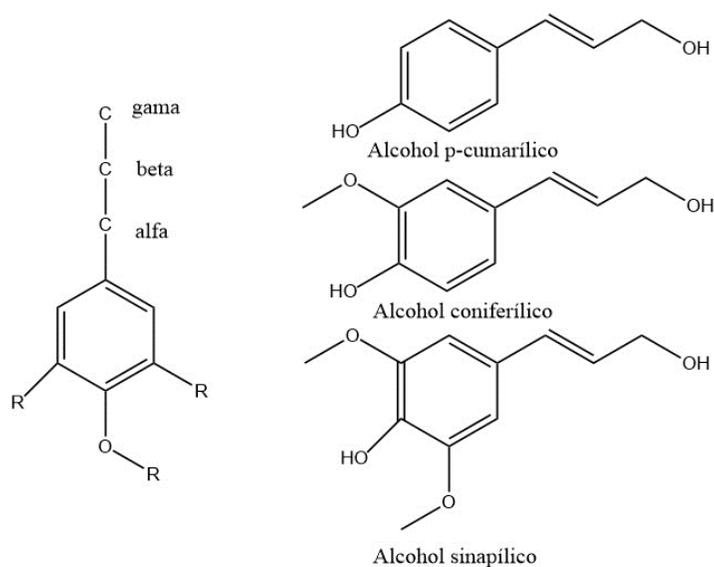
La lignina es considerada una molécula compleja, debido a que se compone de azúcares inorgánicos, es una macromolécula de estructura amorfa, compuesta por aromáticos, comúnmente representa entre el 15-25% del peso de la planta, se encarga de la protección de las fibras de celulosas, mediante la aportación de rigidez e impermeabilización, proporcionando la protección de ataques enzimáticos, este polímero se encuentra en las diferentes capas de la pared celular, que en unión con la hemicelulosa forman una red de microfibras, que rodean a la celulosa, la lignina posee diferentes copolímeros derivados de alcoholes insaturados provenientes de fenilpropano, frecuentemente se

diferencian tres unidades repetitivas, como el componente cumaril derivado del alcohol p-cumárico, guayacilo originada del coniferol y la tercera unidad siringilo, proveniente del alcohol sinapílico (Guerrero, 2021).

Tanto la hemicelulosa como la lignina se unen mediante enlaces covalentes, esta unión genera resistencia en los materiales lignocelulósicos, también es importante mencionar que las unidades fenilpropanoides se unen por alrededor de diez o más tipos de enlaces de éter-arilo y carbono-carbono, comúnmente se forma por la polimerización oxidativa de monómeros de fenilpropano, el grado de polimerización de la lignina es de difícil medición debido a que este componente tiende a fragmentarse considerablemente durante el proceso de extracción (Dhia, 2021).

Figura 5

Estructura molecular de la lignina



Nota. La figura representa la unidad estructural de la lignina acompañada de unidades fenilpropano. Tomado de Tomado de Nanocelia Producción y usos de la celulosa nanofibrilada y microfibrilada (p. 22) por Vallejos, M. E y Area, M. C, 2019, Red CYTED-NANOCELIA.

Tabla 1

Características sobre el usos y aplicaciones de los componentes lignocelulósicos

Componente	Tipo de extracción	Compuestos	Usos y aplicaciones	Rendimiento	Bibliografía
Lignina	Hidrolisis ácida y básica	Compuestos aromáticos	Síntesis de resinas Aditivos alimentarios	Moderada	(Lizundia et al., 2021)
	Uso de solventes como acetona acuosa, etanol	ácidos mucónicos	Plásticos, Antioxidantes Surfactantes		(Wang et al., 2022)
Celulosa	Alcalina	Acetato de celulosa	Materiales poliméricos reforzados con fibras	Bueno	(Amirah et al., 2022)
	Hidrólisis ácida (H ₂ SO ₄ , H ₃ PO ₄ , HCl/C ₆ H ₈ O ₇)	Carboximetil celulosa Microfibras de celulosa Nanocristales de celulosa	Biocompuestos, Nanorellenos reemplazo de (PMMA-Poliacrilamida)		(Risite et al., 2022)
Hemicelulosa	Hidrolisis ácida (CH ₃ COOH, CH ₂ O ₂ , HCl)	Pentosa, ácido fúrico xilosa, xilitol	Producción de etanol combustible Producción de sorbitol	Bajo	(Huang et al., 2021) (Lu et al., 2021)
	Uso de peróxido	xilooligosacáridos			

Componente	Tipo de extracción	Compuestos	Usos y aplicaciones	Rendimiento	Bibliografía
	de hidrógeno	Furfural,	Levadura para		
	Solventes orgánicos	Arabinosa	piensos		
	Fermentación		Uso en farmacéutica		
			Biopolímeros		
			conductores		

Nota. La tabla describe las características sobre la extracción, usos y aplicaciones de los componentes lignocelulósicos encontradas en diferentes investigaciones.

Componentes de bajo peso molecular

Estos elementos se encuentran inmersos en la biomasa en porcentajes inferiores, sin embargo, cuentan con la capacidad de influir en tratamientos posteriores a la extracción de componentes lignocelulósicos, se dividen en dos grupos principales:

Extractivos

En este grupo se encuentran componentes simples y de orden complejo que se originan por procesos metabólicos de la planta, en el conjunto de metabolitos primarios se encuentran los aminoácidos, ácidos carboxílicos, grasas simples y azúcares simples, mientras que los componentes con mayor complejidad son los alcaloides, flavonoides, monoterpenos, cumarinas y otras sustancias de mayor complejidad, esta agrupación de compuestos tienen la facultad de elevar el poder calorífico de la biomasa, lo cual genera una rápida degradación de la lignina para la formación de componentes fenólicos (Tepale, 2020).

Cenizas

Se caracteriza a las cenizas, como aquellos residuos inorgánicos remanentes, después de someter la biomasa a elevadas temperaturas, los elementos que se suelen encontrar en material lignocelulósico corresponden a sodio, potasio, calcio, magnesio, cloro, silicio y otros, a menudo la cantidad de cenizas es de alrededor del 1% de la biomasa, no obstante, las concentraciones de estos nutrientes dependen del origen de la biomasa (Tepale, 2020).

Métodos de extracción de celulosa, hemicelulosa y lignina

Para la extracción y purificación de la celulosa, se requiere aplicar procesos fundamentales de acondicionamiento, eliminación de componentes superficiales como pigmentos, suciedad y el ablandamiento de la lignina, además de la reducción del tamaño de la biomasa lignocelulósica, mediante métodos físicos, mientras que para la extracción de la celulosa se requiere la aplicación de reactivos alcalinos, ácidos, solventes y compuestos como el hipoclorito de sodio con la finalidad de blanquear y eliminar componentes como la lignina y hemicelulosa (Pinto et al., 2022).

La reducción del tamaño de las muestras de biomasa es de gran importancia, debido a que tamaños pequeños de partículas se aumenta el área de contacto entre los reactivos químicos y los grupos funcionales de la biomasa, comúnmente el pretratamiento alcalino, se caracteriza por presentar ventajas significativas, entre las cuales son: temperaturas bajas en contraste con los tratamientos que aplican sustancias ácidas, el empleo de sustancias alcalinas evita la degradación de los polisacáridos, mediante hidrólisis generando una buena deslignificación, la celulosa se logra obtener mediante la exposición de las muestras en soluciones de hidróxido de sodio a temperaturas bajas como 70-90 °C además de agitación mecánica y lavados sucesivos con agua destilada (Pinto et al., 2022).

Separación de hemicelulosa

Debido a que la hemicelulosa se encuentra rigurosamente enlazada a la celulosa y lignina, se precisa de métodos efectivos para la separación, estos pretratamientos pueden ser físicos, químicos e incluso biológicos, comúnmente la hemicelulosa tiende a degradarse parcial o completamente durante la aplicación de estos procesos.

Tipos de pretratamientos

Pretratamientos físicos

Entre los pretratamientos físicos se encuentra la extracción hidrotermal o auto hidrólisis, proceso que se caracteriza por su corto tiempo de reacción, manejo de temperaturas elevadas en el rango de 170 y 220 °C, emplea solventes como agua acetilada o N-dimetilformamida para obtener elevadas conversiones de hemicelulosa y disminuir la solubilidad de otros componentes presentes en la biomasa, este método permite solubilizar selectivamente la hemicelulosa, dando como resultado la solubilización del 72.1% de xilano y la recuperación del 63.2% de sacáridos solubles (Lu et al., 2021).

Mientras que la extracción a vapor, depende de elevadas temperaturas y presiones, con la finalidad de que el vapor pueda internarse en la pared celular de la planta, para posteriormente separar los componentes, según investigaciones este tipo de proceso reporta recuperaciones de hemicelulosa de alrededor del 22.8% a temperaturas de 196 °C, durante tiempos mínimos de 5 min, sin embargo se requiere de equipos especiales para la recuperación, además de un consumo considerable de energía, incluso esta forma de separación genera hemicelulosas de baja pureza (Lu et al., 2021).

Pretratamientos químicos

Extracción alcalina

La extracción alcalina es usualmente empleada para la extracción de hemicelulosa, generando recuperaciones de alta pureza, comúnmente se emplean reactivos como la sosa cáustica o más conocida como hidróxido de sodio, la ventaja de este proceso es la extracción de la hemicelulosa sin degradar a la celulosa y lignina, no obstante los tiempos de reacción son superiores, rondan alrededor de 3 a 4 h y la temperatura de proceso suele ser de 60-90 °C y la concentración de la solución de NaOH (p/p) de aproximadamente 12.33 %, generando solubilización de xilano del 65-73 % en biomasa no maderera, mientras que para pulpas de madera los rendimientos están entre el 80-91 %, mientras que la aplicación de peróxido de hidrógeno permite deslignificar y solubilizar la hemicelulosa (Lu et al., 2021).

Extracción ácida

Este tipo de extracción, permite la ruptura de los enlaces hidrógeno entre la hemicelulosa y celulosa, generando la hidrólisis de la hemicelulosa, generalmente se utiliza ácidos fuertes, como ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico o ácido nítrico, este tipo de tratamiento permite obtener rendimientos del 55.1% de xilano, aun así, presenta limitaciones significativas, como la degradación parcial de la hemicelulosa, inclusive a concentraciones bajas de ácido se puede generar furfural, también es importante tomar en cuenta la temperatura y el tiempo de reacción, debido a que este proceso ácido hidroliza fácilmente la hemicelulosa, dando como resultado rendimientos bajos de xilano y mayor cantidad de monosacáridos (Lu et al., 2021).

Pretratamientos con disolventes

Fraccionamiento organosolv

Este tipo de pretratamiento, hace uso de solventes orgánicos, debido a que estos tienen una gran capacidad de separar celulosa, hemicelulosa y lignina, entre los compuestos complejos más

comunes se encuentran el dimetilsulfóxido, solventes como benceno con etanol al 96% a temperaturas entre 70 °C y tiempos de reacción de 20 min, este tratamiento, permite separar directamente la hemicelulosa, evitando la deslignificación, además la hemicelulosa extraída se caracteriza por poseer una elevada pureza, aunque los solventes orgánicos proporcionan dificultades al momento de degradar, debido a la inflamabilidad, toxicidad y volatilidad, lo cual dirige a una mayor contaminación ambiental (Lu et al., 2021).

Extracción mediante líquido iónico

Este método se considera prácticamente amigable con el ambiente, debido a que presenta gran estabilidad térmica como química, asimismo la facilidad al separar los componentes de la biomasa, estos líquidos destruyen los enlaces de hidrógeno entre la celulosa y hemicelulosa, pero una mejor extracción de hemicelulosa requiere la aplicación de un pretratamiento alcalino de hidróxido de sodio, seguido por etanol obteniendo porcentajes de hemicelulosa del 48% en biomasa de palmeras aceiteras, cantidad obtenida después de realizar alrededor de cuatro ciclos de extracción según las investigaciones realizadas, sin embargo la preparación de líquidos iónicos suele ser compleja y de costos considerables, inclusive las hemicelulosas extraídas por este tipo de tratamiento genera impurezas (Lu et al., 2021).

Descripción de la Planta de tomate (*Solanum lycopersicum*)

Esta planta frutal es relevante a nivel mundial, por contener componentes con elevado nivel nutricional como potasio, fósforo, vitaminas A-C, a su vez, es una fuente importante de antioxidantes, convirtiéndose en un producto de consumo masivo, tanto para la industria como para el consumo fresco, la producción y el consumo mundial del tomate es liderada por China, seguido por Estados Unidos, mientras que México es considerado el principal exportador (Ortega et al., 2022).

A nivel nacional el cultivo de tomate se origina principalmente en superficies con climas tropicales, valles y zonas andinas, con el objetivo de cumplir las condiciones adecuadas para obtener

buenos rendimientos, comúnmente el cultivo de tomate se concentra en la Sierra central, específicamente en la provincia de Tungurahua, en campos a cielo abierto o en invernaderos, mientras que el área total sembrada a nivel nacional es de 3054 ha, originando una producción de alrededor de 61426 ton anuales (Cevallos, 2018).

En este tipo de cultivos es esencial implementar la poda, técnica más conocida como la eliminación de brotes, dependiendo la etapa en la cual se encuentre la hortaliza, se efectúa oportunamente impidiendo que los nutrientes se dirijan hacia los tallos secundarios de la planta y no al fruto como tal, conforme lo requiera el ciclo de la planta se realiza 4 tipos de poda, entre ellos la poda de formación, de mantenimiento, de hojas, de flores y finalmente el aclareo de frutos, con el fin de proporcionar excelentes condiciones para la correcta producción y evitar consumo de energía que puede ser desaprovechado (Viera, 2020).

No obstante, este modelo de actividad agrícola genera considerables residuos, que no suelen ser aprovechados, por lo tanto, tienden a tener una disposición final inadecuada, generalmente son desechados en el mismo lugar o son depositados en vertederos a cielo abierto, escasos sectores realizan el compostaje, debido a la generación de gastos adicionales, por lo cual, se ignora los subproductos que pueden ser extraídos estos residuos, que potencialmente presentan componentes antifúngicos e insecticidas, por el contenido de alcaloides, al igual que componentes con elevado material lignocelulósico (Viera, 2020).

Características botánicas

Semilla

La planta presenta semillas de tamaños entre 3 a 5 mm, con forma regularmente ovalada, semi redonda o triangular, color grisáceo, cubierta de pequeñas vellosidades, se forma por el embrión, endospermo y la cubierta seminal se estima que el tamaño de la semilla no afecta la germinación de la

planta, si no de las condiciones del cultivo, cualquier tamaño de semilla proporciona un crecimiento y formación vigoroso (Aguilar, 2021).

Raíz

Comúnmente se compone por un sistema radicular constituido por una raíz principal, raíces secundarias y adventicias (raíces aéreas), todas estas cumplen con la función de sostén al suelo, absorción y transporte de agua y diferentes nutrientes, la raíz se compone de epidermis, córtex y cilindro vascular, en donde los pelos de la raíz tienen la función de absorción, mientras que el transporte de agua y nutrientes está a cargo del transporte de agua y nutrientes, la longitud promedio de la raíz es de alrededor 21-22 cm (Aguilar, 2021).

Tallo

El tallo de la planta se establece de tipo herbáceo, de tamaño grueso, anguloso y de color verdoso, generalmente mide entre 2 a 4 cm de ancho en la parte inferior, a medida que crece la parte superior reduce de tamaño, en el tallo principal se suelen formar los tallos secundarios, hojas y racimos florales, el tallo se constituye por la epidermis, corteza, cilindro vascular, tejido medular, pelos glandulares que expulsan una sustancia de color verdosa que repelen a algunos insectos, la longitud del tallo puede llegar a medir de 30 a 40 cm, incluso algunas especies suelen crecer hasta 4m de alto, esto depende de la poda en el cultivo (Aguilar, 2021).

Hoja

Las hojas se diferencian por expulsar fragancia aromática, su color es verdoso, la superficie está cubierta por pelos glandulares, la posición de la hoja puede ser de forma horizontal, semirrecta o inclinada, depende del crecimiento en las varias partes del tallo, las hojas de las plantas de tomate pueden ser del tipo papa, enana, pimpinellifolium, estándar, hirstum y otras, presenta entre 7 a 9 foliolos con bordes dentados (Aguilar, 2021)..

Flor

Está compuesta por 5 o más sépalos, pétalos y estambres que nacen del ovario, generalmente se generan en forma de racimos que pueden ser simples o ramificados, el primer apareamiento de la flor en el cultivo se origina entre los 20 y 50 días después de la siembra, el tamaño de las flores puede ser medianas y grandes, depende de las especies comerciales del tomate, la temperatura a la cual germina la flor es de 20 a 25 °C (Aguilar, 2021).

Fruto

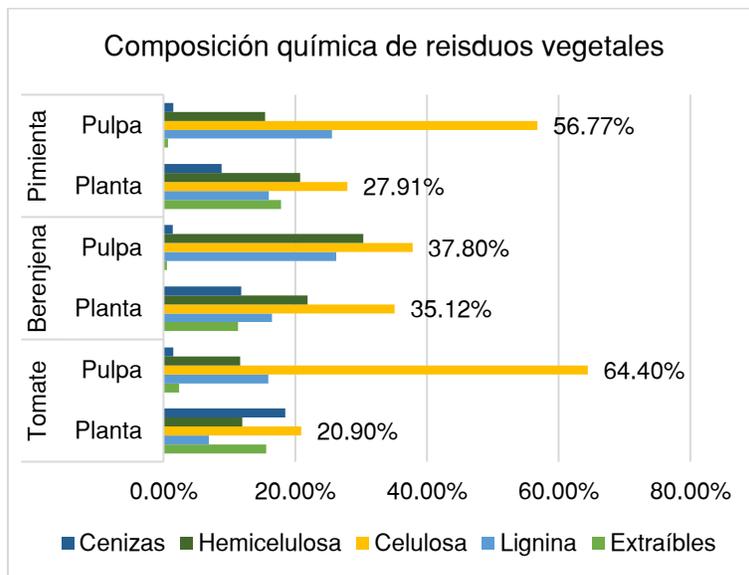
La planta presenta frutos de forma baya globosa, con tonalidad verde y rojiza cuando se ha madurado completamente, sin embargo, pueden presentar tonalidades amarillentas, naranjas e incluso negro, la cáscara contiene un valor alto de pectina, su superficie tiende a ser lisa, el fruto se compone por pericarpio, tejido placentario y semillas, el peso promedio que alcanza es de 600 g, dependiendo la especie y condiciones de cultivo (Aguilar, 2021; López, 2017).

Características generales

La planta de *Solanum lycopersicum* se encuentra en la familia *Solanaceae*, una especie de elevado consumo y de gran adaptabilidad a diferentes hábitats, este tipo de plantas poseen significativos porcentajes de componentes principales como celulosa, lignina, hemicelulosas. La obtención de celulosa mediante tratamientos básicos o ácidos, generalmente para obtener pulpas celulósicas purificadas es necesario la eliminación de componentes que no pertenecen a tejidos estructurales, como extraíbles y cenizas, según investigaciones mediante métodos de purificación se puede obtener hasta un 66.4% de celulosa en las plantas de tomate, además informan que el contenido de lignina es superior en comparación con otros residuos vegetales, empleados en la producción de nano fibras de lignocelulosa (Bascón et al., 2020).

Figura 6

Composición química de residuos del tomate y otras hortícolas celulósicas



Nota. La figura representa la variación de componentes lignocelulósicos. Tomado Residuos de plantas hortícolas como nueva fuente de moléculas Aislamiento de Nanofibras de Lignocelulosa: Aplicación en el Proceso de Reciclado de Cartón (p. 3), por Villegas, I. Bascón, et al., 2020, Published by MDPI.

Composición química del tallo de la planta de tomate

Los tejidos de la planta como los tallos, contienen una considerable cantidad de metabolitos presentes en los frutos, principalmente presentan compuestos fenólicos en menor porcentaje en comparación con el 32-46% que poseen los frutos, al igual que la capacidad antioxidante, que es alrededor del 30-50% inferior en contraste con los frutos (Vega et al., 2022).

Sin embargo, la celulosa, hemicelulosa y la lignina son sustancias principales en las paredes celulares de la planta, por ejemplo, la lignina proporciona soporte y genera un crecimiento adecuado, con propiedades antimicrobianas, protegiendo a la planta de patógenos, el factor primordial para encontrar una cantidad significativa de lignina depende del contenido de nitrógeno (Liu et al., 2021).

Según un estudio acerca del uso potencial del tallo de tomate como materia prima, se encontró que el tallo posee alrededor del 43.11% de material celulósico, 12.29% de lignina, 7.91% hemicelulosa y el porcentaje restante fibras, convirtiéndose en un residuo agrícola de gran interés industrial debido a su gran volumen y disponibilidad estacional, así mismo se considera como una alternativa a fibras sintéticas, por contener propiedades mecánicas y de hidrofobicidad elevadas en comparación con otros materiales vegetales como la cáscara de arroz, hierba, palma, carpelo de algodón entre otros (Taha et al., 2018).

Composición química de las hojas de la planta

Según estudios fitoquímicos en hojas de diferentes especies de la familia de *Solanum lycopersicum* revelan el contenido de compuestos como alcaloides, saponinas, taninos, flobotaninos, flavonoides, ácidos clorogénicos entre otros, siendo los terpenos componentes que aportan propiedades antimicrobianas, los cuales pueden ser opciones alternativas para la fabricación de bioactivos útiles para la salud (Y. Mendoza et al., 2020).

Composición química del fruto

El fruto de la planta de *Solanum lycopersicum* posee un amplio valor nutricional, por su contenido de componentes como beta carotenos, específicamente el licopeno característico por poseer propiedades antioxidantes naturales, también contiene vitaminas, fibra dietética y minerales, entre ellas el calcio, hierro, fósforo y potasio, mientras que del grupo de aminoácidos se distingue a la tiamina y lisina (Vallejo, 2021).

Aprovechamiento de los residuos de la planta de tomate

Algunas de las investigaciones actuales se dirigen al desarrollo de productos que empleen materias primas para la generación de energías renovables como los biocombustibles, fabricación de papel, obtención de celulosa fabricación de bioplásticos, generalmente se enfocan en la generación de

productos con valor agregado, sin embargo, se debe tomar en cuenta que los componentes estructurales como lignina, celulosas y hemicelulosas de los residuos agroindustriales tienden a cambiar dependiendo de su origen y naturaleza. Es idóneo el aprovechamiento de los residuos de biomasa de tomate para la producción de productos como nano fibras lignocelulósicas, o como agentes que aportan resistencia y refuerzo a materiales como el cartón (Filian et al., 2020).

Principales compuestos poliméricos

Estos productos generalmente dependen de las propiedades y características, incluso del proceso de obtención, además de las diferentes fuentes de extracción por ello se pueden identificar tres grupos importantes: plásticos de base biológica, plásticos bio basados y plásticos biodegradables a base de recursos fósiles, muchos de estos polímeros a base de celulosa, almidón o proteínas tienden a ser descompuestos por microorganismos, agua u condiciones controladas, sin embargo, no todos los bioplásticos son biodegradables (Aponte & Soledad, 2022).

Estudios recientes han logrado la síntesis de diferentes compuestos poliméricos de base biológica, los de uso común son:

Polihidroxicanoato

Es un poliéster elastomérico que proviene de la síntesis biológica de bacterias, este tipo de compuestos se singularizan por ser biocompatibles y biodegradables, además de que son precursores de farmacéuticos debido al poder antibacteriano, transportadores de fármacos, también son empleados en el desarrollo de dispositivos médicos como: grapas, parches, barreras de adhesión entre otros (Nanda et al., 2022).

Ácido poliláctico

Es un polímero termoplástico, generado mediante la polimerización del ácido láctico, compuesto producido a través de la fermentación de azúcares provenientes de recursos renovables,

como residuos de remolacha, caña de azúcar y otros, se caracteriza por poseer una mayor resistencia mecánica y mejor plasticidad térmica, además, la emisión de gases efecto invernadero es menor en comparación con el tereftalato de polietileno, polipropileno y poliamida 11, para obtener aplicaciones mejoradas, el producto se somete a diferentes modificaciones, para posteriormente ser usado en la fabricación de envases, tejidos y fibras útiles en la industria alimenticia, de construcción, agricultura y transporte (Nanda et al., 2022).

Poliamida 11

Polímero de base biológica, se genera a través del tratamiento de recursos renovables como el aceite de ricino, se caracteriza por gozar de una elevada estabilidad química y mecánica, este tipo de producto es de gran importancia a nivel industrial, debido a que se emplea como refuerzo para fibras naturales, sin embargo, es un polímero no biodegradable. Nuevas investigaciones establecen que la poliamida 11 reforzada con fibras de origen lignocelulósico, pueden lograr propiedades mecánicas similares a la de polímeros como el polipropileno tratado con fibra de vidrio, lo cual permite el uso en la elaboración de piezas automotrices y herrajes (Nanda et al., 2022).

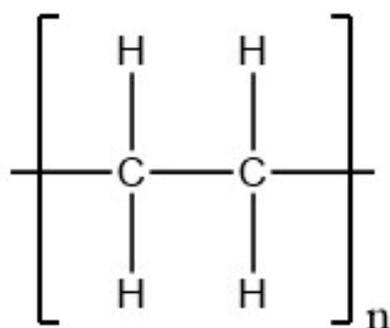
Alcohol polivinílico (PVA)

El alcohol polivinílico es un compuesto polimérico formado por unidades de un solo monómero, presenta características de biodegradabilidad y biocompatibilidad, alta permeabilidad en fluidos, e incluso buena elasticidad, también posee propiedades hidrofílicas lo que explica la afinidad al agua y la insolubilidad en lípidos o grasas, además presenta un comportamiento no lineal frente a esfuerzos mecánicos, por tal motivo se considera un compuesto de gran utilidad en varios sectores, donde el PVA es empleado en la formación de membranas, hidrogeles e inclusive elaboración de lentes de contacto, investigaciones demuestran que a mayor peso molecular, aumenta la tendencia de cristalinidad (Freire et al., 2021).

Consecuentemente tiene una mejor estabilidad térmica, produciendo mejores efectos a la tracción mecánica, sin embargo, el comportamiento de este polímero depende de las condiciones además del grado de hidrólisis, debido a que en agua caliente tiende a solubilizarse de manera rápida, pese a ello el PVA presenta buenas propiedades de barrera, convirtiéndolo en un compuesto atractivo para la elaboración de envases y películas para alimentos.

Figura 7

Estructura del monómero del PVA



Bioplásticos

En la actualidad, la producción de bioplásticos es una industria en constante crecimiento. Representando un camino hacia el desarrollo económico, generando nuevas alternativas hacia la sostenibilidad ambiental. Permitiendo mantener el equilibrio entre energía y medio ambiente, a través del empleo de materia prima generada por biorresiduos, en aplicaciones como el desarrollo de bioplásticos. Los cuales se producen en base a almidones, proteínas, celulosa, ácidos poliláctico, biopolietileno, biopoliuretano entre otros. Generando interés en la economía circular, un componente polimérico se denota bioplástico por su base biológica o por el potencial de biodegradabilidad, además de la biocompatibilidad.

Tabla 2*Tipos de bioplásticos*

Bioplásticos			
	Biodegradables	Poli Ácido láctico (PLA) Polihidroxialcanoato (PHA) Poli succianato de butileno de base biológica (Bio-PBS)	Síntesis mediante: Almidón Acetato de celulosa Fermentación bacteriana Caña de azúcar • Aplicaciones •Envase alimentos •Biomateriales •Automoción •Industria Textil
	No biodegradables	Polietileno (Bio-PE) Polipropileno (Bio-PP) Politereftalato de etileno (BIO-PET)	Síntesis mediante: Glucosa Caña de azúcar Remolacha

Nota. La tabla, describe los diferentes tipos de bioplástico, la materia de síntesis y algunos usos (p. 3), por Kong, et al., 2023, Published by MDPI.

Bioplásticos a nivel mundial

La producción de bioplásticos rodea la cantidad de 4 MMTPA, ocupando un eslabón importante en el desarrollo sostenible, eludiendo de esa forma, el empleo de recursos no renovables, como los combustibles fósiles. Los plásticos de orden biológico se basan en la extracción de monómeros presentes en la biomasa, para luego ser modificados y polimerizados, supliendo al plástico sintético. Normalmente los bioplásticos se singularizan por poseer características mejoradas, además, de que aportan a la reducción de huella de carbono y la reducción de componentes no renovables, aun así, esa

utilidad depende de los parámetros de procesamiento, como de la estructura química y el tiempo de vida útil (Ali et al., 2022).

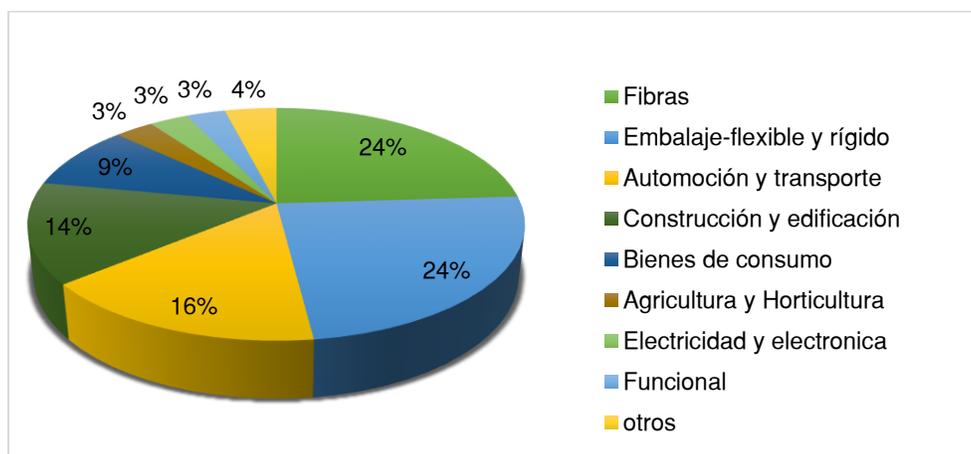
Se considera a Asia como el principal productor de bioplásticos, representando globalmente el 46% de total, mientras que Europa contribuye con el 26% de la producción a nivel mundial y en tercer lugar América del Norte con un 17%, entre los plásticos de base biológica más comúnmente producidos están: el polietileno, el tereftalato y poliamidas, conformando el 40% del volumen de producción, los cuales son empleados en productos de embalaje, alcanzando el consumo de alrededor de 1 millón de toneladas de bioplásticos (Nanda et al., 2022).

Segmentos de mercado para polímeros de base biológica

En la actualidad, los plásticos de base biológica son empleados en varios sectores, principalmente las fibras de acetato de celulosa (CA) y tereftalato de polítrimetileno (PTT) abarcando con una intervención del 24% del total, seguido por segmentos de embalaje flexible y rígido, resinas epoxi, poliuretanos y policarbonatos en automoción y transporte, entre los bienes de consumo se nombra a cápsulas de café y bolsas de biorresiduos, en el grupo de funcional se incluyen a adhesivos, revestimientos e inclusive cosméticos, mientras que el último grupo se mencionan a películas de impresión, aplicaciones médicas y productos empleados en el sector acuícola (Skoczinski et al., 2021).

Figura 8

Representación de los segmentos de mercado para polímeros de base biológica



Nota. Segmentos de mercado. Tomado de Bio-based products: Green premium prices and consumer perception of different biomass feedstocks (p.11) por Partanen et al., 2020, Renewable Carbon

Clases de biopolímeros

Biopolímeros a base de celulosa

Se interpreta a la celulosa como un polisacárido que contienen grupos de monómeros de glucosa enlazados mediante enlaces glucosídicos, siendo uno de los polímeros de base biológicas que más predominan en la naturaleza, estos productos generan gran interés debido a las características de biodegradabilidad, elevada durabilidad, resistencia y rigidez, incluso las fibras de celulosa se emplean para reforzar otros polímeros, los enlaces débiles de hidrógeno que contienen los bioplásticos a partir de celulosa estimulan una degradación rápida, lo cual provoca una disminución de propiedades mecánicas (Nanda et al., 2022).

Por tal motivo, se debe tratar a estos biopolímeros con otros polisacáridos como la pectina y el quitosano, generando mejoras en las características de estabilidad, flexibilidad e inclusive en la

transparencia, de modo que, los pretratamientos posibilitan superar las limitaciones, como la sensibilidad al agua y la insuficiencia de adhesión interfacial, estudios actuales demuestran el desarrollo de biopolímeros con propiedades magnéticas, en otras investigaciones se emplea la celulosa para el desarrollo de nano recubrimientos de cápsulas, empaques de alimentos, películas de embalaje, fabricación de marcos de anteojos, protectores de pantalla, cosméticos entre otros (Nanda et al., 2022).

Biopolímeros a base de almidón

Estos biopolímeros son de relevante interés industrial, a causa de la capacidad de renovación, biodegradabilidad y su alta disponibilidad, siendo uno de los productos más conveniente en la generación de películas comestibles, con características mecánicas y de transparencia similar a los plásticos sintéticos convencionales, sin embargo, el uso de cultivos como el maíz es preocupante, debido a que se somete a la disputa por cultivos y tierras alimentarias, logrando inestabilidad en la seguridad alimentaria, igualmente se requiere de estudios rigurosos debido a que en ciertas condiciones los productos a base de almidón tienden a expulsar compuestos olorosos incrementando la tasa de degradación, estos efectos pueden ser atenuados mediante la adición de aceites esenciales, posibilitando su demanda a nivel farmacéutico (Nanda et al., 2022).

Biopolímeros a base de proteínas y lípidos

Se desarrollan a través de proteínas de origen animal o vegetal, como la soja, gluten de trigo, caseína, gelatina y otros. Estos biopolímeros adquieren mejores propiedades mecánicas en comparación con los polisacáridos, usualmente se usan como productos de empaque, presentan buenas características de barrera a los gases y propiedades aromáticas, los polímeros de base proteica pueden ser mejorados con látex, mientras que las películas biopoliméricas a base de lípidos, se singularizan por la transparencia, elasticidad y moderada resistencia al agua, por lo cual, se usa para el envase de frutas,

verduras, aumentando la vida útil de los alimentos, mediante la adición de aceites esenciales con propiedades antimicrobianas (Nanda et al., 2022).

Películas a base de mezcla de biopolímeros

La finalidad de formar películas a base de mezclas de biopolímeros permite proporcionar diferentes características, pudiendo aportar y contrarrestar las propiedades adecuadas a las aplicaciones requeridas, debido a la biocompatibilidad y biodegradabilidad de algunos polímeros de origen vegetal, las propiedades físicas, químicas y morfológicas dependen del tipo de biopolímeros empleados y la proporción añadida, un claro ejemplo es que la combinación de biopolímeros que contienen polisacáridos, como el quitosano con goma guar o hidrogeles, cuentan con la capacidad de mejorar las propiedades mecánicas y térmicas de las películas, actualmente las mezclas que presentan elevados potenciales industriales son, celulosa con almidón, celulosa con quitosano, celulosa con agar entre otras, siendo la celulosa el material que actúa como soporte (Park et al., 2020).

La celulosa es empleada en la elaboración de compuestos poliméricos, a causa de presentar importantes propiedades físicas, entre ellas un alto módulo de Young aproximadamente de 114 GPA, parámetro de relevancia por ser el módulo que representa la elasticidad de un material en función de una fuerza aplicada, además de poseer una elevada cristalinidad llegando a obtener porcentajes del 89%, así mismo, el grado de polimerización se aproxima a 14400, el cual tiene importancia en las propiedades mecánicas del polímero y finalmente cabe destacar su área superficial llegando a ser de 37 metros cuadrados por gramo, esta materia natural cuenta con buenas capacidades de absorción de aceite, aun así, su eficacia aumenta mediante el mejoramiento de la superficie lipofílica de las fibras de la celulosa, para lo cual se aplica la acetilación, con el fin de elevar la hidrofobicidad (Peng et al., 2020).

La variación de las mezclas poliméricas dependen de la aplicación, efectividad y costos de obtención, un ejemplo del cruce de compuestos son las membranas de celulosa y alcohol polivinílico, las

cuales después de un tratamiento tienden a ser usadas como filtros para la separación de mezclas de aceite y agua, comúnmente observadas en la industria petrolera, varias tecnologías se han implementado para el tratamiento de aguas residuales, sin embargo, no logran satisfacer los requisitos y necesidades para cumplir con el desarrollo sostenible, debido a factores como contaminación secundaria por la dificultad de eliminación, materiales costosos y baja eficiencia, es por ello que, la celulosa es una materia con alto potencial para obtener membranas poliméricas eficaces en la separación de emulsiones aceite-agua (Xu et al., 2019).

Membranas/filtros

Las membranas/ filtros a base de celulosa, aplicados en el tratamiento de aguas residuales en el campo petrolero, generalmente dependen de parámetros como la permeabilidad hídrica, el flujo de agua y el rechazo de contaminantes, en virtud del tamaño de poro y el área de afinidad. Factores relevantes en la separación, la cual depende la interacción de grupos funcionales de la película con los grupos de las sustancias contaminantes. Además, es importante tener en cuenta el tamaño del poro de la membrana, porque muchos de las especies a retener pueden tener diámetros superiores, lo cual provocaría el rechazo de contaminantes. Es decir, la baja impregnación en las membranas, por la deficiente interacción molecular (Mautner, 2020).

Se identifican a tres grupos principales de nanocelulosa disponibles en la naturaleza, aunque divergen en función de las dimensiones, pureza y cristalinidad, e incluso depende de los tratamientos o procesos a los cuales la materia es sometida. La homogeneización de estas fibras vegetales requiere de tratamientos químicos como la oxidación, esterificación, acetilación, si es el caso también se emplean tratamientos enzimáticos, además de métodos ultrasónicos y procesos que requieren el empleo de fuerzas mecánicas y de cizallamiento con la finalidad de destruir las fibras (Varghese et al., 2022).

Celulosa bacteriana (BC)

Las fibras de la celulosa se obtienen mediante proceso de biosíntesis, en el cual las bacterias son encargadas de generar las nanofibrillas con diámetros de alrededor de 20-100 nm, además de poseer un alto grado de cristalinidad, alta pureza y buenas capacidades de retención. Es un polímero proveniente de la fermentación de la glucosa, hidrólisis enzimática, generalmente polisacáridos de bajo peso molecular, las estructuras de este tipo de celulosa suelen ser más complejas, amorfa y fibrillas cortas. También presenta una mejor pureza en comparación con la celulosa de origen vegetal (Vallejos & Area, 2019).

Celulosa nanofibrilada o microfibrilada (CNF)

Este tipo de estructuras se extraen de especies vegetales mediante procesos físicos y químicos, con el objetivo de obtener fibras de diámetros pequeños y con buenas funcionalidades, presentan una cristalinidad más baja y un alto grado de polimerización. Particularmente las partículas presentan mayor heterogeneidad, debido a que se compone de nanofibrillas y fragmentos de fibras residuales, el diámetro puede variar entre 0.035-50 μm . Este tipo de celulosa presenta mayor rigidez y elevada resistencia mecánica. Incluso son capaces de formar matrices poliméricas enlazadas por enlaces hidrógeno, el origen de esta proviene de madera dura o blanda como: remolacha, paja, tallos, cereales entre otros (Vallejos & Area, 2019).

Algunos de los tratamientos son: mecánicos, químicos y enzimáticos, procesos que requieren de un elevado costo energético, mientras que los pretratamientos como la oxidación o carboximetilación, generan una celulosa más homogénea.

Nanocristales de celulosa (CNC)

Este tipo de nanocristales dependen de tratamientos como la hidrólisis ácida, con el fin de obtener regiones cristalinas lineales mediante la separación de zonas amorfas, los grupos superficiales

de los CNC dependen del tipo de ácido empleado en la hidrólisis, el H_2SO_4 aportará grupos funcionales de sulfato, mientras que el uso de HCl generará una superficie con grupos $-OH$, generalmente son más cristalinos en comparación con los CNF, con excelentes propiedades mecánicas y ópticas, particularmente se obtiene de la madera, algas y bacterias, mediante hidrólisis ácida (Varghese et al., 2022).

Membranas en el tratamiento de aguas

Las membranas a base de nanocelulosa son apropiadas para una variedad de aplicaciones, debido a que actúan como barrera en la separación selectiva de fases, como la eliminación de contaminantes, estas membranas pueden ser de origen sintético o biológico, se componen de materiales orgánicos e inorgánicos, esencialmente productos poliméricos, materiales a base de vidrio, carbono entre otros, algunas membranas de origen biológico se forman a partir de proteínas, grasas y lípidos, debido a ello pueden ser clasificadas en isotrópicas y anisotrópicas, las primeras cuentan con una composición más homogénea y se emplean en membranas de microfiltración, mientras que las de carácter anisotrópico no presentan uniformidad, debido a la diversidad de estructuras y capas, son empleadas en procesos como la ósmosis inversa (Varghese et al., 2022).

Las características esenciales que debe presentar una membrana son buena permeabilidad al agua, grupos funcionales óptimos, buena estabilidad química y mecánica, además de resistencia a la humedad y fuerzas de tracción. Las membranas a base de nanofibras presentan ventajas en comparación con las membranas poliméricas, a causa de su alta área superficial, resistencia y la posibilidad de realizar modificaciones.

Métodos en la preparación de membranas a base de nanocelulosa

Filtración al vacío

La técnica de filtración al vacío para obtener membranas compuestas por capas estructuradas de nanocelulosa es un proceso rápido y simple, en este proceso las partículas de nanocelulosa se empaquetan en una película, las concentraciones de NC dependerá de la morfología y la porosidad que requiere la membrana. La combinación de filtrado al vacío y prensado caliente permite obtener membranas adsorbentes de nanocelulosa. Para estos fines se emplea una base de soporte como papel filtro, generando una capa de soporte de nanofibras que puede ser recubierta por inmersión con CNC, formando una membrana biológica, con características de alta estabilidad mecánica, sin embargo, algunos estudios realizados por varios autores reflejan la disminución de porosidad. Aun así la inmersión de CNC hace posible la mejora de la resistencia a la tracción y el aumento de espesor, estas membranas pueden ser empleadas en la purificación de aguas contaminadas con elementos como la plata, el cobre y hierro (Varghese et al., 2022).

Proceso de liofilización

Este proceso de formación de membranas presenta tamaños de poros capaces de eliminar tintes de soluciones, debido a que los CNC hidrolizados con H_2SO_4 son eficaces en la eliminación de tintes como el violeta de metilo, a causa de la atracción electrostática entre los CNC y componentes de los tintes, específicamente, se menciona a las membranas fabricadas mediante la combinación de nanocristales de celulosa y una matriz de quitosano, lo cual proporciona una estructura altamente porosa y un elevado espesor, aun así, las investigaciones reportan estabilidad mecánica menor, debido a la eliminación de enlaces hidrógeno en el proceso de liofilización (Varghese et al., 2022).

Proceso de Impregnación de esteras electro hiladas

La aplicación de este proceso permite obtener membranas con estructuras isotrópicas y anisotrópicas, un ejemplo de ello son las membranas electrohiladas del compuesto polimérico acetato de celulosa, membranas empleadas en microfiltración debido a su porosidad elevada, la incorporación de celulosa nanocristalina a la matriz polimérica permite mejorar la resistencia a la tracción y disminuye el tamaño de poros, sin embargo estas membranas son eficaces en operaciones de destilación por membrana, a causa de que la presión de entrada de líquido se eleva por poseer CNC, además de que los nanocristales generan una mejor estabilidad térmica (Varghese et al., 2022).

Método de fundición de soluciones

El método de fundición de soluciones permite generar membranas compuestas por triacetato de celulosa y CNC, empleadas en procesos de desalinización de agua, debido a sus capacidades de hidrofiliidad, mejora en la permeación de agua y por su elevada superficie, incluso las propiedades mecánicas como la tracción se benefician por la interacción entre los enlaces de hidrógeno entre las partículas de CNC y triacetato de celulosa, algunos de los estudios confieren el rendimiento de desalinización a los disolventes empleados en la fabricación de las membranas, siendo los más eficaces el dimetilsulfóxido, dimetilformamida entre otros, ya que aportan a la membrana mayor homogeneidad, mayores niveles de cristalinidad y mejora en la resistencia a la tracción, sin embargo la reproducibilidad de membranas a mayor escala aún es complejo de lograr (Varghese et al., 2022).

Composición de las películas

Los materiales a base de nanocelulosa (NC), generalmente son usados para el tratamiento de aguas contaminadas, la adecuada modificación de las superficies de los nanocristales de celulosa permiten mejorar la adsorción de compuestos contaminantes en el agua, por ejemplo, el tratamiento

con ácido sulfúrico permite, mejorar la afinidad hacia colorantes e incluso iones de metales pesados, en gran magnitud (Sadare et al., 2022).

La naturaleza fibrosa de la nanocelulosa permite aportar propiedades mecánicas a un costo reducido, además de que es un compuesto con excelentes características de biocompatibilidad, convirtiéndose en parámetros excelentes en la formación de membranas empleadas en la purificación de agua, debido a que este compuesto posee una cantidad considerable de grupos funcionales hidroxilo en la superficie, lo cual mediante modificaciones y reacciones químicas permite ser usada con diversos fines, especialmente en membranas de absorción de contaminantes, debido a su elevada área superficial, confiriéndole gran potencial como material sostenible para la remoción de contaminantes (Varghese et al., 2022).

Sin embargo, debido a que la celulosa se constituye de enlaces hidrógeno dentro y fuera del plano, revela interacción anfílica o Van-der Waals, la cual explica la insolubilidad de la celulosa en agua, debido a su carácter hidrofílico, aun así, las cadenas de celulosa contienen anillos de piranosa, concediéndole de esta manera características hidrofóbicas, es decir que las interacciones moleculares de la celulosa presentan anisotropía, generando rivalidad entre el carácter hidrofóbico e hidrofílico, lo cual entorpece la disolución de celulosa en solventes polares y apolares, finalmente la nanocelulosa es un nanomaterial renovable de baja densidad y características benefactoras como alta resistencia, flexibilidad y porosidad útiles en la fabricación de compuestos híbridos (Varghese et al., 2022).

Materiales compuestos

Aquel material constituido por dos o más fases con diferentes propiedades químicas, las cuales se identifican por la función de cada una de ellas, siendo una fase la que actúa como matriz, mientras que la otra se comporta como material de refuerzo, los materiales compuestos mejora los rendimientos e incluso eleva las posibles aplicaciones, debido a la combinación de diferentes propiedades, los

materiales de refuerzo como fibras de celulosa logran un refuerzo más robusto y rígido, además las características de estos materiales dependen del tamaño y geometría de las fibras, pudiendo ser identificados como normales o a nano escala, según su previo tratamiento.

A través de la incorporación de materiales de refuerzo es posible, elevar la dureza y la resistencia a la rotura de plástico, inclusive algunos nano aditivos permiten elevar la resistencia al fuego, y disminuyen la permeabilidad a la humedad de vapor de agua y gases, estos factores son importantes en aplicaciones de uso alimentario, mejorando las propiedades de barrera.

Matriz polimérica

La matriz polimérica (MP) es un arreglo de polímeros, la mayoría de polímeros son empleados para preparar MP, algunos de los factores que se toman en cuenta en la preparación de la matriz es el tipo de polímero, la naturaleza de la superficie, la química del polímero y la estructura debido a que estos parámetros son los que determinan las propiedades y capacidades de las estructuras a formar, como la flexibilidad, biodegradabilidad y biocompatibilidad, las matrices poliméricas se unen a partículas de tamaños pequeños con la finalidad de rellenar los vacíos, aportando a la resistencia, dureza y rigidez del polímero además de la mejora de las propiedades de las membranas compuestas.

Aditivos como plastificantes

Las sustancias que actúan como aditivos en las dosis adecuadas permiten mejorar las propiedades de las películas, además de añadir diferentes propiedades mecánicas y de barrera, al igual que tienen la capacidad de modificar la estructura de las películas, comúnmente se emplea compuestos compatibles con la celulosa, estos aditivos son sorbitol, glicerol, maltitol, goma gellan, etilenglicol, entre otros, estos compuestos tienen gran compatibilidad, debido a que presentan estructuras similares a la nanocelulosa, lo cual permite que la mezcla sea homogénea, según investigaciones la adición de estos

componentes puede elevar la rugosidad, además de la modificación de características como la transparencia, el brillo, la viscosidad y la permeabilidad al agua (Fernández et al., 2021).

Las membranas a base de celulosa compuestas por nanofibrillas y microfibrillas con la implementación de aditivos generan mejores características en condiciones húmedas, por ejemplo poli alcohol vinílico, es un compuesto polimérico que tiene la capacidad de actuar como agente de reticulación, mejorando de esa forma la estabilidad de la red de la estructura de celulosa, debido a la abundancia de grupos hidroxilo, dando lugar a una superficie con elevadas características de hidrofiliidad (Mautner, 2020).

Glicerol

La adición de glicerol a la matriz polimérica tiene la función de elevar las características del bioplástico, generalmente esta sustancia natural mejora la capacidad de absorber agua, por sus propiedades hidrófilas, además de la formación de cristales, incluso el glicerol cuenta con la capacidad de aportar flexibilidad y resistencia al agrietamiento, también es un químico empleado en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética debido a que no es tóxico (Inayati et al., 2020).

En el desarrollo de películas, se añade al glicerol como plastificante, aplicando tratamientos de función en soluciones a diferentes concentraciones, mejorando de ese modo las propiedades físicas, estructurales, mecánicas y térmicas, generando disminución de fragilidad, además del aumento en el espesor de la biopelícula, los diferentes estudios demuestran resistencia respecto a tracción y mayor flexibilidad, a causa de la disminución de las fuerzas intermoleculares y la temperatura de transición vítrea en la estructura polimérica, incluso las muestras tratadas con glicerol revelan mayor estabilidad térmica y el mejoramiento de permeabilidad al vapor de agua, de hecho el glicerol permite homogeneizar de mejor manera las películas (Tarique et al., 2021).

Goma de Tara (Caesalpinia spinosa)

Caesalpinia spinosa ordinariamente nombrada como tara o guarango, es una especie forestal perteneciente al grupo de las leguminosas, originaria de Sudamérica, esta planta se caracteriza por distribuirse en zonas áridas en forma natural, siendo Perú el principal productor a nivel mundial. Las semillas se han destacado por su uso ancestral y medicinal debido al contenido de sustancias con características potenciales como los taninos, flavonoides y gomas, en la actualidad las semillas son empleadas para obtener compuestos útiles en la curtiembre del cuero, también el polvo de las semillas en pequeñas cantidades es usado como espesante en la industria de alimentos, mientras que a nivel industrial se consume para la producción de gomas, cómo es la goma de Tara (López et al., 2020).

La goma de tara se compone de macromoléculas como el polisacárido galactomanano. Presenta propiedades hidrofílicas, su estructura principal está formada por unidades de (1-4)- β - d-manopiranosas unidas en enlaces glucosídicos a (1-6)- α - d-galactopiranosas. Se emplea para el desarrollo de películas con excelentes propiedades mecánicas y de buena apariencia. Sin embargo, son altamente permeables al vapor de agua, sin embargo, las propiedades de barrera al agua pueden ser mejoradas mediante la adición de ácido oleico como aditivo hidrófobo, esta goma se extrae de los frutos del árbol de Tara (Ma et al., 2016).

Características generales de la tara

Este árbol puede alcanzar alturas de aproximadamente 12 m en estado de vejez, mientras que en la etapa de arbustos mide alrededor de 2 a 3 m, estas características dependen de las condiciones del suelo, consta de un tronco principal con tallos de hasta 60 cm de grosor, cubierto de corteza espinosa, con hojas que miden de 8 a 15 cm, sus flores de color amarillento, mientras que los frutos se recubren de vainas de color rojizo anaranjado en estado de madurez, las semillas se caracterizan por ser de color verde en sus inicios, además de poseer una característica blanda, mientras que se torna color café en

estado de madurez, con textura rígida, las vainas contienen alrededor de 4 a 7 granos, con forma redondeada (Bermeo, 2021).

Las semillas se singularizan por poseer porcentajes diferenciales en cuanto a cáscara, gomas y germen, predominando el 37.5% del peso en germen, mientras que en inferiores las partes restantes, representando el 28% y 34% respectivamente, químicamente los frutos del guarango poseen compuestos como carbohidratos, en la semilla se encuentra el 56.17% de compuestos éteres, el 19.62% pertenece al grupo de proteínas, finalmente en cantidades inferiores están la fibra cruda y el extracto con porcentajes menores al 6% (Bermeo, 2021).

Aprovechamiento de las semillas de la tara

Las semillas de guarango se emplean para obtener gomas, aceites, fibras, harinas y otros compuestos de gran potencial, la goma de tara se distingue por ser un polímero galactomanano, que contiene galactosa y manosa en proporciones de 3:1, comúnmente llamados hidrocoloides, con propiedades espesantes, aglomerantes, gelificante y estabilizantes, además de poseer características resistentes a la descomposición, debido a estos factores es muy usada en el sector farmacéutico, cosmético y principalmente en la industria de alimentos (Bermeo, 2021).

Sin embargo, en la actualidad se emplea la goma de tara para la elaboración de películas comestibles, recubrimientos biopoliméricos, que tienden a disminuir la migración de vapor de agua, debido a la propiedad de retención de agua, además de actuar como barrera frente a los compuestos como dióxido de carbono y lípidos de diferentes alimentos.

Extracción de goma de tara

La goma de tara se puede extraer por diferentes tratamientos, entre ellos, la aplicación de reactivos como el ácido sulfúrico, manteniendo principalmente las variables como el tiempo de contacto, concentración y la temperatura a la cual se somete la solución y las semillas, con el fin de

desintegrar la parte externa y obtener la goma, también es posible la obtención de la goma mediante aplicación de soluciones alcalinas como el hidróxido de sodio, no obstante es importante combinar con el método ácido, con el fin de separar efectivamente los componentes de la semilla, cabe destacar que las temperaturas por medio ácido son de alrededor de 60 a 90°C mientras que al trabajar con hidróxido de sodio, se propone temperaturas de 40°C (Bermeo, 2021).

Asimismo, la extracción por vía húmeda es un tratamiento que requiere de procesos previos como molienda, adicionalmente se completa con agua y soluciones ácidas o básicas, para posteriormente separar la pasta de los otros componentes como la cáscara, además de que este tratamiento presenta desventajas de coloración, debido a que la cáscara tiende a solubilizarse en el proceso, lo cual no aporta al valor comercial, igualmente el último método existente es la extracción por vía seca, el cual se singulariza por aplicar tratamientos térmicos y mecánicos, como el tostado de semillas, la molienda y posteriormente la aplicación de shock térmico, con el fin de separar los diferentes componentes, aunque esta técnica presenta elevada cantidad de granos insolubles en agua e impurezas (Bermeo, 2021).

Métodos de caracterización

Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Técnica empleada en la identificación de grupos funcionales, mediante la determinación de las bandas de absorción, este procedimiento consiste en exponer el material de análisis a un espectro de luz infrarroja a una determinada longitud de onda, se caracteriza por analizar muestras de manera rápida, sin generar cambios, la luz de incidencia se fragmenta en tres áreas distintas en función de la longitud de onda, infrarrojo lejano, medio y cercano.

Por lo general para la identificación de la estructura molecular y verificación de compuestos orgánicos se emplea la región de espectro electromagnético o medio, la cual se encuentra en longitudes

de onda entre 2500 nm y 25000 nm es decir a números de onda que rondan los 4000 cm^{-1} y 400 cm^{-1} , actualmente el FTIR provee mejores resoluciones, alta fiabilidad, reproducibilidad, además de que utiliza cantidades mínimas de analito, sin embargo la calidad del espectro puede ser afectada por la humedad atmosférica y el dióxido de carbono (Hong et al., 2021).

Regiones espectrales en polisacáridos

1) Región de $4000\text{-}2500\text{ cm}^{-1}$

El grupo hidroxilo -OH presente en polisacáridos se determina en la región de $3600\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$, mientras que grupos de CH y CH_2 se atribuyen a bandas ubicadas entre $3000\text{-}2500\text{ cm}^{-1}$, que pueden ser vibraciones simétricas y asimétricas respectivamente.

2) Región de $1800\text{-}1500\text{ cm}^{-1}$

En esta región se identifican los estiramientos de dobles enlaces, es decir en polisacáridos pécticos se identifican grupos COO^- , también en esta área se suele encontrar una banda perteneciente al agua, la cual se encuentra alrededor de 1635 cm^{-1} , aún así depende de las fuerzas de interacción molecular.

3) Región de $1500\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$

En esta región se determinan grupos como CH_2 y C-OH pertenecientes a carbohidratos, sin embargo, debido a la superposición de bandas, la determinación de estos grupos es compleja.

4) Región de $1200\text{-}800\text{ cm}^{-1}$

Generalmente las bandas que aparecen en esta región representan a las configuraciones de enlaces glucosídicos.

5) Región en 800 cm^{-1}

La información estructural de polisacáridos en esta región es limitada, aun así, se ubican bandas relacionadas con vibraciones esqueléticas que componen los carbohidratos.

Caracterización de hemicelulosas

Las hemicelulosas secas previamente se caracterizan con la ayuda de espectros FTIR, para ello las muestras se muelen, hasta obtener un polvo fino, los escaneos se someten a resoluciones de 4000 a 400 cm^{-1} .

Ensayos mecánicos

Los ensayos mecánicos son técnicas útiles en la identificación de propiedades estructurales que caracterizan a un material, según el instituto de normalización se emplea la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2635:2012. Para evaluar las propiedades de tracción de las láminas plásticas delgadas, es decir películas con espesores menores a 1,0 mm, mientras que, para plásticos con espesores mayores a 1,00 mm, se emplea la norma ASTM D638. Ensayo que facilita la determinación de características como la tensión a tracción, la deformación, el módulo de tracción, la resistencia a la tracción, factores mecánicos controlados para obtener materiales de buena calidad, dichas pruebas se basan en la fuerza o cargas aplicadas al plástico, hasta su punto de rotura o deformación. Estas propiedades proporcionan datos útiles para investigaciones de desarrollo y diseño además de permitir el control de calidad y especificación de un material (ASTM 2635, 2012).

Módulo de elasticidad

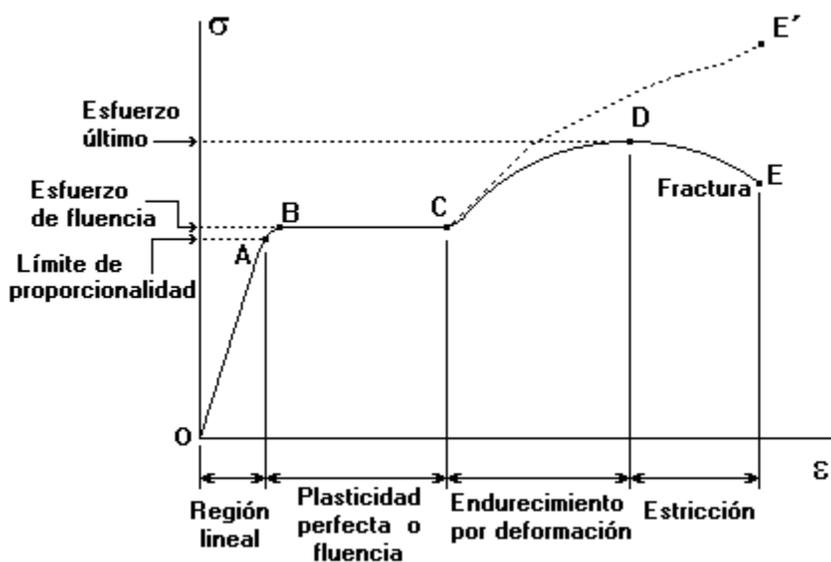
El módulo de elasticidad en las pruebas mecánicas proporciona el índice de rigidez del material evaluado, en otras palabras, la relación de deformación o estiramiento en respuesta a la tensión aplicada. El cual se determina mediante la identificación del gradiente en la curva del diagrama entre la tensión y deformación, según el diagrama descrito en la Figura 9, la primera parte del diagrama corresponde a un comportamiento lineal, lo que indica que la tensión aplicada es proporcional a la

generada, mientras que la zona de deformación elástica, indica que el material puede ser deformado, sin embargo, al retirar la tensión, este vuelve a su forma original.

Contrario a la zona de deformación plástica, además de que el punto de resistencia indica el punto máximo a la tensión máxima que el material soporta, en cambio a zona de estricción es el área cercana al punto de ruptura, la gráfica del ensayo dependerá en gran medida del tipo de material y el grosor.

Figura 9

Curvas de esfuerzo-deformación



Nota. Representación gráfica de curvas esfuerzo-deformación. Tomado de Ensayo de Tracción de probetas (p.2) por Uribe et al., 2019. Universidad Tecnológica de Bolívar.

Técnicas de análisis térmico

Estas técnicas permiten evaluar el comportamiento térmico y la estabilidad de un material o sustancia, en base a los cambios de temperatura. Existen varios equipos para analizar diferentes

muestras. Generalmente el análisis termogravimétrico (TGA) y la técnica de calorimetría diferencial de barrido (DSC) son muy empleadas en la elaboración y diseño de biopolímeros. El TGA es una técnica que proporciona datos acerca de la pérdida de masa de la muestra analizada a una temperatura determinada, dicha pérdida se relaciona a la volatilización de componentes presentes en el material, como también la descomposición de alguno de ellos y la formación de cenizas.

El análisis termogravimétrico permite la caracterización de los materiales con respecto a su composición, además brinda información cualitativa y cuantitativa, en cuanto a los rangos en los cuales la materia se deshidrata, descompone o degrada, debido a los cambios de temperatura. La información del análisis se representa mediante un termograma. Una gráfica que relaciona el peso del analito y la temperatura, además de que esta técnica permite realizar mediciones de modo isotérmico, cuasi-isotérmico y modo dinámico, el TGA es de uso común en la industria química, farmacéutica, alimenticia y en el sector de polímeros (Blanco & Siracusa, 2021).

Mientras que, la técnica DSC es un ensayo de gran importancia en la industria de los plásticos, debido a que proporciona información de las composiciones polimérica. Detecta transiciones de liberación de calor (exotérmicas) o de absorción de calor (endotérmicas), como transiciones vítreas, comportamientos de fusión y cristalización. Este ensayo mide la diferencia de flujo de calor entre una muestra de referencia y el analito, es decir mide las temperaturas y flujos de calor coligados a las transiciones térmicas que presenta un material. Los picos relacionan la temperatura y la energía necesaria para atravesar las transiciones, usualmente la información permite verificar la calidad, cristalinidad y la pureza de un polímero.

La temperatura de transición vítrea (T_g), es la cual indica la transformación del material de un estado rígido o duro a un estado blando y viceversa. La T_g se presenta en materiales con una estructura amorfa, esta propiedad permite evaluar el punto en el cual un material polimérico puede ser sometido a

optimización, mejorando los parámetros de calidad, según se requiera mediante la adición de aditivos. De igual manera el punto de fusión (T_m), indica la temperatura a la cual un material sólido pasa a líquido, es empleado para determinar el grado de pureza y cristalinidad de los materiales (Menczel et al., 2023).

Ensayos físico-químicos

Los ensayos físico-químicos tienen como finalidad revelar información acerca de las propiedades de las sustancias o materiales como películas a base de proteínas, celulosa vegetal o bacteriana, mediante la medición de factores como: permeabilidad de vapor, solubilidad, contenido de humedad, espesor y transparencia, con el objetivo de garantizar la calidad de un material y su correcta aplicación.

Permeabilidad de vapor de agua

Generalmente es la propiedad más investigada en la industria dedicada a la elaboración de películas biodegradables, debido a que es indispensable evaluar los efectos del agua en la degradación de los materiales. Analiza las diferentes reacciones que pueden ocurrir por el exceso o ausencia de agua. La permeabilidad de vapor de agua permite cuantificar la cantidad de agua que puede atravesar por la matriz polimérica. El método gravimétrico aplicado para estos análisis se basa en la prueba ASTM E96, método estándar para estudiar los cambios, frente al paso de vapor de agua, en materiales como el papel, películas plásticas y otro tipo de materiales laminados. Aun así, esta prueba se limita a muestras con espesores no mayores a 32 mm.

Los materiales sometidos a los ensayos deben ser acondicionados a una humedad relativa del 65%, con el objetivo de establecer condiciones de equilibrio. Para este tipo de ensayos es necesario controlar la humedad relativa dentro y fuera de la cápsula. Los coeficientes de permeabilidad son independientes del espesor del material, mientras que la velocidad de permeación del vapor de agua es una propiedad propia del envase (Echeverría, 2020).

Solubilidad y Contenido de humedad

El contenido de humedad de las películas se puede obtener mediante la deshidratación y la cuantificación respecto a la diferencia de peso de la muestra antes y después del secado. Mientras que, la solubilidad de los materiales depende de la interacción con los disolventes y el pH. Sin embargo, la disolución de los materiales depende de los elementos componentes de la muestra, un ejemplo de ello es la solubilización del polímero sintético PVA en agua y escasa solubilidad en compuestos orgánicos, mientras que el ácido poliláctico es un compuesto que puede ser disuelto en éter pero no en cloroformo.

Capítulo III

Metodología

Materiales y métodos

El presente estudio se efectuó en los laboratorios de Petroquímica ubicados en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga, perteneciente a la parroquia Belisario Quevedo. En el desarrollo de este trabajo se manejó dos tipos de investigación, la primera hace referencia a la revisión bibliográfica, con el propósito de reunir información enlazada con el aprovechamiento de los biorresiduos generados en la postcosecha del tomate *Solanum* y la generación de bioplásticos, mientras que la segunda fase se desarrolló de forma experimental, a causa del tratamiento de variables controladas, a través del diseño experimental que permitió identificar los parámetros que tienen influencia en el desarrollo de biopelículas.

En la caracterización de componentes lignocelulósicos, se empleó equipos de análisis como espectroscopia FTIR pertenecientes a la Universidad Técnica de Ambato UTA, mientras que para la caracterización mecánica de las biopelículas desarrolladas se utilizó equipos pertenecientes al laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Matriz

La parte principal del desarrollo del trabajo se basó en la obtención de la materia prima, la identificación de cantidades de residuos disponibles para lo cual se detalla los materiales y reactivos a usar, la segunda sección se basó en la extracción de compuestos potenciales que contienen la biomasa vegetal, es decir, contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina que contienen los tallos de tomate, como también los métodos de extracción de los componentes con valor agregado para la generación de membranas, como tercer punto se caracterizó los diferentes tipos de componentes secundarios obtenidos, se cuantificó y se seleccionó a la celulosa como el componente con mayor valor agregado para el desarrollo de compuestos poliméricos.

En esta sección se detallan las variables y condiciones que se controlaron en el diseño experimental, para la obtención de películas biodegradables a base de celulosa y aditivos como la goma de tara y otros componentes de la matriz polimérica. Finalmente, como quinto tópico se detalla las técnicas y ensayos que se emplearon para determinar las características físicas y químicas de las membranas de celulosa modificadas.

Equipos

- Mantas de calentamiento BOECO
- Equipo baño María
- Balanza analítica BOECO modelo BPS 51 PLUS
- Mufla Thermo Scientific
- Estufa de secado ESCO Isotherm
- Plancha de agitación y calentamiento BOECO modelo MSH-420
- Máquina de tracción universal Amsler
- Espectrómetro infrarrojo por transformada de Fourier FTIR – PerkinElmer
- Analizador termogravimétrico (TGA) – PerkinElmer, modelo Pyris.
- Agitador de hélice BOECO OSD-20

Instrumentos de laboratorio

- Equipo de extracción soxhlet
- Micro espátula de acero inoxidable
- Balones volumétricos de aforo capacidad variable

- Vasos de precipitación
- Pipetas
- Embudo büchner
- Kitasato 500 ml
- Probetas
- Embudos
- Termómetro
- Crisol

Insumos

- Papel filtro
- Tamiz
- Semillas de Tara
- Recipientes de polipropileno
- Tallos de Tomate
- Cuchillo
- Cloro comercial

Reactivos

- Etanol al 96%
- Tolueno

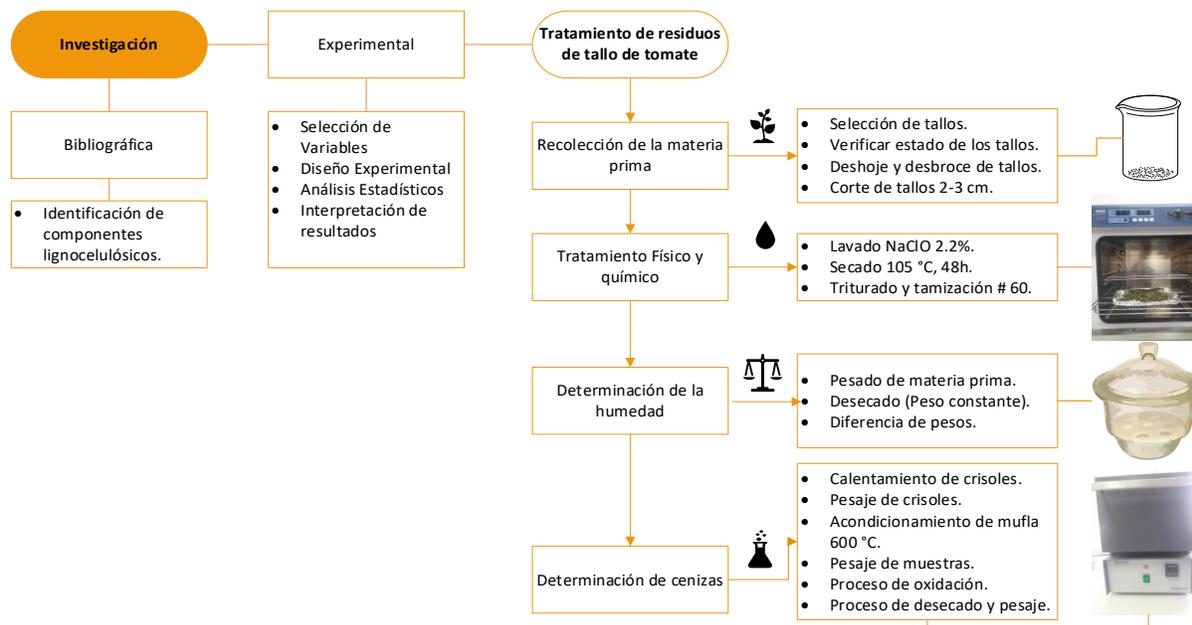
- Ácido Sulfúrico al 95-97%
- Hexano
- Hidróxido de sodio al 99%
- Hipoclorito de sodio

Procesamiento de las muestras

Los tallos de tomate se sometieron a procesos físicos como lavado y trituración, procesos químicos para la eliminación de extraíbles como grasas y aceites, además de la precipitación de taninos contenidos en la planta, componentes que interfieren en la determinación de compuestos principales como la celulosa, hemicelulosa y lignina, además de la determinación de humedad y cenizas que contiene las muestras, identificando la pérdida de masa que sufren los especímenes cuando se someten a una determinada temperatura (Figura 10).

Figura 10

Diagrama de pretratamientos y tratamientos físico-químicos de los residuos



Nota. Síntesis de los procesos de acondicionamiento de residuos del tallo.

Primera fase

Los residuos de la planta de tomate se recolectaron en invernaderos ubicados en la provincia del Carchi, después del proceso de cosecha, se seleccionó tallos de la planta de tomate de determinados diámetros de aproximadamente, se verificó que los tallos se encuentren en buen estado, con aspecto fresco y sin áreas en descomposición o lesiones acuosas, una vez colectados se procedió al deshoje y desbroce con la finalidad de obtener solamente los tallos, como paso posterior se procedió a cortar los tallos hasta obtener longitudes requerida.

Tratamiento físico-químico

Lavado

Las muestras de tallos se sometieron a un lavado con soluciones de hipoclorito de sodio (NaClO) al 2.2 % y agua destilada a temperaturas entre 40-50 °C, con el propósito de eliminar tierra, sedimentos que se encuentran en la superficie de los tallos, tratando de remover la mayoría de impurezas, mediante el uso del agitador magnético, en seguida se realizó varios lavados con agua destilada para retirar las concentraciones de NaClO.

Filtración

Después los tallos se llevaron al proceso de filtración al vacío aplicando papel filtro y un embudo büchner de porcelana adjunto a un Kitasato, para que el papel filtro se fije a la base del embudo es necesario mojarlo con agua destilada, lo cual permitió una mejor absorción del líquido y la acumulación del residuo sólido en la parte superior del papel de una manera rápida.

Secado

Las muestras se llevaron a un proceso de secado en una estufa Esco Isotherm, horno de convección forzada a temperatura controlada de 105°C durante un período de 48 horas, con el objetivo de garantizar la eliminación del contenido de agua en las muestras.

Trituración y tamización

Después del secado se procedió a triturar, utilizando un molino eléctrico Hamilton Beach (120V), con la finalidad de mejorar el área de contacto de las muestras en posteriores procesos. Luego se tamizaron, mediante el uso de tamiz de acero inoxidable redondo de malla número 60, las muestras se guardaron en el desecador hasta obtener pesos constantes, hasta su posterior análisis (Cajamarca, 2021).

Determinación de humedad

Se determinó la humedad de las muestras mediante la diferencia de pesos, entre el peso de las muestras iniciales pesadas y los pesos después del tratamiento de secado, este análisis se basó en las normas desarrolladas por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM), el contenido de humedad se analizó con la intención de determinar si la materia es viable para ser empleada en la elaboración de membranas de los componentes potenciales como celulosa, lignina y hemicelulosa, debido a que este parámetro influye en las propiedades del producto final (Ordoñez, 2019).

Para identificar el contenido de humedad se pesó por lo menos tres muestras de residuos recolectados, se trasladaron a la estufa en recipientes previamente tarados respectivamente, las muestras se secan a una temperatura entre 103°C-105°C durante 48 horas, luego las muestras se colocan en el desecador hasta obtener un peso constante y finalmente se aplica la Ecuación 1 para obtener el porcentaje de humedad.

$$\text{Humedad (\%)} = \left(\frac{\text{peso de muestra inicial (g)} - \text{peso de muestra seca (g)}}{\text{peso de muestra inicial (g)}} \right) * 100$$

***Ecuación 1** Porcentaje de humedad por diferencia de pesos*

Determinación de cenizas

La cantidad de cenizas permitió estimar el contenido de minerales y otro tipo de materia inorgánica presente en los tallos, de tal forma que se obtiene el porcentaje de residuos después de someter las muestras a un proceso de oxidación mediante el control de temperaturas entre 580 a 600 °C según la norma ASTM D1102-84, para ello se calentó los crisoles en la mufla y se tararon, posteriormente se pesaron tres muestras de aproximadamente 1 g en cada crisol y se lleva a la mufla a una temperatura de 600°C por alrededor de 1 h y media, pasado el tiempo designado, los crisoles con la

muestra se llevaron a un desecador por al menos 20 min, para luego ser pesados hasta obtener un peso constante y así determinar el porcentaje de cenizas mediante la aplicación de la siguiente fórmula.

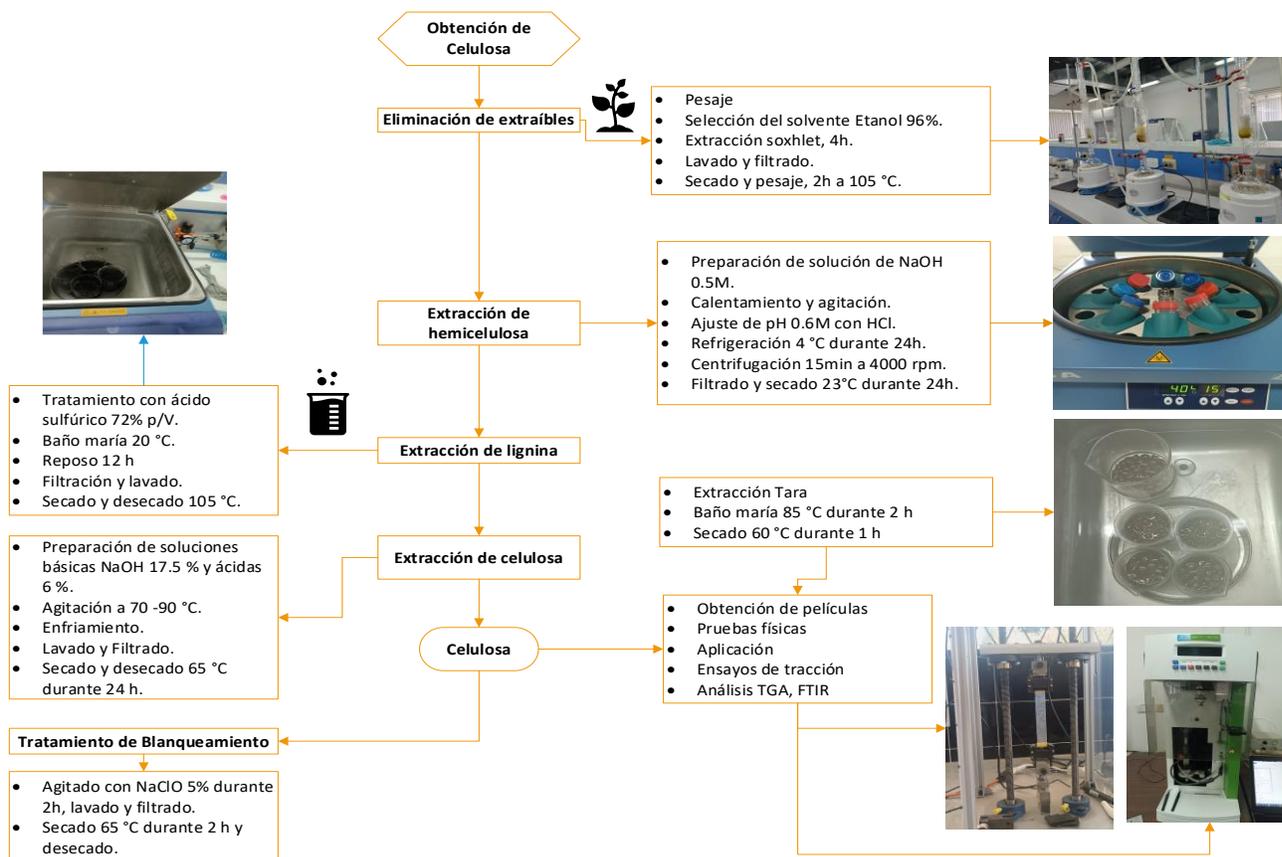
$$\text{Cenizas (\%)} = \left(\frac{\text{peso de muestra calcinada (g)}}{\text{peso inicial de la muestra (g)}} \right) * 100$$

Ecuación 2 Porcentaje de cenizas

Obtención componentes lignocelulósicos

Figura 11

Resumen de la extracción de componentes lignocelulósicos.



Nota. Síntesis procesos extracción de celulosa y obtención de películas

Eliminación y determinación de extraíbles

Esta técnica se efectuó para cuantificar y eliminar los extraíbles que contienen las muestras de los tallos del tomate, estos compuestos generalmente ácidos grasos insaturados, los cuales pueden interferir en análisis de pureza de la celulosa, hemicelulosa y lignina, para llevar a cabo esta exclusión de materiales, se utilizó un equipo soxhlet, que comprende una manta de calentamiento, balón de fondo redondo, un extractor, un refrigerante y mangueras de hule, se sitúa muestras de residuos en cartuchos de celulosa para ubicarlos en los extractores.

Selección de solvente

En este tratamiento se utilizó etanol siendo este un compuesto con índices bajos de peligro, además de ser un solvente de baja toxicidad, debido a que puede obtenerse de materias biológicas e incluso a un menor costo, el uso del etanol como solvente es de gran contribución a causa de proporcionar elevadas interacciones con moléculas polares, pudiendo remover compuestos no glicéridos, fosfátidos, esteroides y finalmente pigmentos, entonces se seleccionó al etanol.

Extracción Soxhlet

El proceso de extracción se realizó por triplicado empleando diferentes volúmenes de etanol al 96% y muestras de residuos de tallo de tomate, el proceso se lleva a cabo durante un periodo de 4 h, hasta notar que la coloración de la solución que contiene el extractor muestre una tonalidad incolora, mientras que el balón contiene las sustancias extraídas.

Lavado y filtrado

Finalmente, los residuos se lavaron con agua destilada hasta reducir la cantidad de solvente, posteriormente se filtraron con la ayuda de un embudo büchner y un Kitasato, para agilizar el proceso de separación entre el líquido y el sólido.

Secado y pesaje

Las muestras se secaron a temperatura ambiente durante 2 h, después se llevaron a la estufa a una temperatura de 105 °C con el fin de eliminar la humedad, finalmente se pesó la cantidad de sólidos presentes en la solución, se guardaron en un desecador hasta posterior uso, para la determinación de extraíbles se toma en cuenta el peso de los recipientes empleados en la recuperación de solvente a través del rotavapor mediante la Ecuación 3.

$$\text{Extraíbles (\%)} = \left(\frac{\text{peso de balón evaporación y muestra} - \text{peso de balón evaporación vacío (g)}}{\text{peso de balón evaporación vacío (g)}} \right) * 100$$

Ecuación 3 Porcentaje Extraíbles

Determinación de hemicelulosa

Para determinar el contenido de hemicelulosa, se aplica extracción alcalina, para ello se prepara una solución de *NaOH* 0,5 M, posteriormente se seleccionaron muestras libres de extraíbles entre 4.01 y 6.01 g, las cuales se vierten en vasos de precipitación con 100 mL de la solución preparada previamente, simultáneamente la mezcla se sometió a calentamiento y agitación, con la ayuda de una plancha de agitación magnética, este proceso se llevó a cabo durante 90 min aproximadamente a temperaturas entre 25 a 45 °C.

Filtración y acondicionamiento

Las muestras se filtraron, separando el material sólido del líquido, luego se ajustó el pH de las soluciones sobrenadantes, el rango varía desde 3,5 a 5,5, el cual es ajustado gota a gota con una solución de *HCl* 6M, consecuentemente las soluciones se almacenaron en un refrigerador a una temperatura de 4 °C durante 24 h.

Centrifugación

Pasado el tiempo, las muestras se centrifugan durante 15 min a 4000 rpm, posteriormente se añadió alrededor de 25 mL de etanol y se continúa con la centrifugación durante otros 15 min, con la el objetivo de contribuir con la precipitación de las hemicelulosas contenidas en las muestras.

Secado y almacenaje

Los precipitados se secaron a una temperatura de 23 °C durante 24 h y se almacenan hasta su caracterización (da Silva Braga & Poletto, 2020).

Determinación de lignina

Para la identificación del contenido de lignina, se prepararon vasos de precipitación se pesaron muestras, luego se agregan alrededor de 15 a 25 mL de ácido sulfúrico a una concentración de 72% (p/v). Después se mezcló el sólido y la solución de ácido con ayuda de una varilla de agitación, posteriormente los especímenes se llevaron a un proceso de agitación durante 120 min en baño maría a 20 °C. Inmediatamente el contenido se transfiere a balones de fondo redondo de capacidad de 1 L y se adicionaron alrededor de 575 mL de agua destilada, con el objetivo de disminuir la concentración de ácido, seguido la mezcla se llevaron a proceso de reflujo durante 4 h, pasado el tiempo designado, la solución se dejó en reposo, durante 12 h.

Filtración y secado

La mezcla se sometió a filtración con la ayuda de un embudo büchner y papel filtro previamente tarado, para eliminar las concentraciones de ácido se lava las muestras con agua destilada hasta obtener un pH neutro, como etapa final, el sólido retenido se secó a temperatura de 105 °C en la estufa, después se llevaron las muestras al desecador hasta obtener pesos constantes y se realizó la cuantificación de lignina seca (Sarria et al., 2018).

Determinación de Celulosa

En la extracción de celulosa se empleó principalmente de $NaOH$, además de H_2SO_4 , en la primera etapa, se preparan soluciones básicas a concentraciones entre 10%, 12.5 % y 17.5 % en peso. Este tratamiento se modificó y planificó tomando como base el estudio realizado por (Rendón et al., 2020) . Se colocaron muestras libres de extraíbles en cantidades de 1 a 4 g en vasos de precipitación, enseguida se añade volúmenes de $NaOH$ entre 80 y 100 mL, según corresponda el diseño. Las mezclas se colocaron en una plancha de calentamiento a temperaturas entre 70 a 90 °C durante 2 h aproximadamente, luego las soluciones se mantuvieron en reposo, hasta que se logró el enfriamiento, posteriormente las muestras se lavaron y se filtraron hasta obtener un pH neutro.

Las muestras filtradas se llevaron a la estufa a 65 °C, el siguiente proceso consiste en colocar las muestras secas en vasos de precipitación añadiendo alrededor de 50 mL de H_2SO_4 a una concentración de 6 % (v/v), las mezclas se llevaron a una plancha de calentamiento y se mantienen en constante agitación durante 1 h, tras cumplir el tiempo las muestras se lavaron con agua destilada y se filtraron hasta obtener un pH de 7, a continuación el material sólido se sometió a calentamiento en la estufa a 65 °C durante 24h, se pesaron hasta obtener un peso constante y se almacenaron hasta el próximo tratamiento (Steven et al., 2022).

Blanqueamiento de celulosa

Para la obtención de una celulosa de color blanquecino se aplicó hipoclorito de sodio comercial $NaClO$, se realizó diluciones de $NaClO$ a concentraciones entre 1.5%, 2.5% y 5%. Se prepararon vasos de precipitación con muestras de celulosa de 3 g y se añade alrededor de 150 mL de solución blanqueadora respectivamente, luego las mezclas se llevaron a una plancha de calentamiento durante 2 h en constante agitación. Finalizado el tiempo las muestras se lavan y se filtran con agua destilada, hasta

un pH neutro, posteriormente las muestras se llevaron a la estufa a 65 °C durante 12 h, con el fin de eliminar la humedad, una vez secas se pesaron y se guardaron hasta su análisis final.

Extracción de la goma de tara

La goma de tara se obtiene mediante la eliminación de la cáscara y germen, para ello se dejó reposar los frutos en agua durante dos días, para ablandar la superficie, o con la ayuda del equipo baño maría se sometió las muestras a una temperatura de 85 °C durante 2 h aproximadamente.

Con la ayuda de un escalpelo se dividió la semilla para poder separar y retirar el endospermo, el cual es identificado por ser incoloro y con textura elástica, después el endospermo se llevó a la estufa a una temperatura de 60 °C durante 60 min, para eliminar el contenido de humedad mediante el secado, además de evitar la descomposición de la goma. Como siguiente paso se procedió al proceso de trituración del endospermo, para obtener un polvo fino a través del aumento de área de superficie de contacto, finalmente se tamizó y se llevó al desecador, hasta su uso posterior (Bermeo, 2021).

Diseño experimental eliminación extraíbles

Para analizar el efecto de las variables y condiciones aplicadas en el estudio se empleó un diseño multifactorial para los diferentes procesos, en el proceso de extracción de pigmentos y ácidos grasos se empleó un diseño factorial de tres factores y diferentes niveles de estudio como se indica en la tabla 1, con la finalidad de identificar el tratamiento con el cual se obtiene mayor cantidad de residuos libres de extraíbles.

Tabla 3

Diseño aplicado en la eliminación de extraíbles

Factores	Niveles de estudio		
	Etanol	Etanol-Agua	
Tipo de solvente			
Volumen de solvente (mL)	180	280	300
Cantidad de muestras (g)	14	15	16

Nota. La presente tabla muestra las variables preliminares que influyen en la eliminación de extraíbles.

El diseño experimental utilizado en el desarrollo del trabajo se realizó mediante el uso del programa Design Expert, el cual permitió la modificación de factores y niveles de estudio, para lo cual se realizó un diseño en el cual se mantiene constante la temperatura de ebullición del solvente, mientras que la Tabla 4, indica el diseño realizado por triplicado tomando en cuenta los factores y niveles de la Tabla 3.

Tabla 4

Diseño experimental en la extracción Soxhlet

Orden corrida	# Corridas	Muestra (g)	Volumen (mL)	Solvente	Peso final (g)
11	1	15.01	180	ET+H2O	-
33	2	16.01	280	ET+H2O	-
50	3	15.01	280	ET+H2O	-
19	4	14.01	180	ET	-

Orden corrida	# Corridas	Muestra (g)	Volumen (mL)	Solvente	Peso final (g)
16	5	14.01	300	ET+H2O	-
15	6	16.01	280	ET+H2O	-
52	7	14.01	300	ET+H2O	-
48	8	16.01	180	ET+H2O	-
3	9	16.01	180	ET	-
38	10	15.01	180	ET	-
20	11	15.01	180	ET	-
54	12	16.01	300	ET+H2O	-
39	13	16.01	180	ET	-
10	14	14.01	180	ET+H2O	-
6	15	16.01	280	ET	-
13	16	14.01	280	ET+H2O	-
4	17	14.01	280	ET	-
37	18	14.01	180	ET	-
51	19	16.01	280	ET+H2O	-
30	20	16.01	180	ET+H2O	-
46	21	14.01	180	ET+H2O	-
43	22	14.01	300	ET	-
34	23	14.01	300	ET+H2O	-
29	24	15.01	180	ET+H2O	-
1	25	14.01	180	ET	-
27	26	16.01	300	ET	-
17	27	15.01	300	ET+H2O	-

Orden corrida	# Corridas	Muestra (g)	Volumen (mL)	Solvente	Peso final (g)
7	28	14.01	300	ET	-
14	29	15.01	280	ET+H2O	-
28	30	14.01	180	ET+H2O	-
31	31	14.01	280	ET+H2O	-
9	32	16.01	300	ET	-
40	33	14.01	280	ET	-
5	34	15.01	280	ET	-
26	35	15.01	300	ET	-
24	36	16.01	280	ET	-
32	37	15.01	280	ET+H2O	-
47	38	15.01	180	ET+H2O	-
2	39	15.01	180	ET	-
35	40	15.01	300	ET+H2O	-
18	41	16.01	300	ET+H2O	-
45	42	16.01	300	ET	-
21	43	16.01	180	ET	-
41	44	15.01	280	ET	-
44	45	15.01	300	ET	-
42	46	16.01	280	ET	-
22	47	14.01	280	ET	-
12	48	16.01	180	ET+H2O	-
25	49	14.01	300	ET	-
53	50	15.01	300	ET+H2O	-

Orden corrida	# Corridas	Muestra (g)	Volumen (mL)	Solvente	Peso final (g)
8	51	15.01	300	ET	-
49	52	14.01	280	ET+H2O	-
36	53	16.01	300	ET+H2O	-
23	54	15.01	280	ET	-

Nota. La tabla indica los tratamientos adecuados para la eliminación de extractivos presentes en los residuos del tallo de tomate, usando etanol.

Diseño para la obtención de hemicelulosa

Para obtener el tratamiento que genere mayor cantidad de hemicelulosa se aplicó el diseño factorial por duplicado entre dos factores y tres niveles diferentes como se muestra en la Tabla 3, en este proceso de extracción de hemicelulosa se mantiene constante, la concentración de 0.5 M de NaOH, el tiempo de refrigeración, el volumen de etanol y el tiempo de centrifugación, el pH se ajusta mediante la adición de 6M *HCl*.

Tabla 5

Diseño para la obtención de hemicelulosa

Orden corrida	# Corridas	Muestra (g)	pH	Cantidad Hemicelulosa (g)
2	1	5.01	3.5	-
13	2	4.01	4.5	-
12	3	6.01	3.5	-
17	4	5.01	5.5	-
4	5	4.01	4.5	-

Orden corrida	# Corridas	Muestra (g)	pH	Cantidad Hemicelulosa (g)
15	6	6.01	4.5	-
18	7	6.01	5.5	-
1	8	4.01	3.5	-
8	9	5.01	5.5	-
6	10	6.01	4.5	-
10	11	4.01	3.5	-
7	12	4.01	5.5	-
5	13	5.01	4.5	-
9	14	6.01	5.5	-
14	15	5.01	4.5	-
3	16	6.01	3.5	-
11	17	5.01	3.5	-
16	18	4.01	5.5	-

Nota. La tabla indica los tratamientos adecuados para la extracción de hemicelulosa presentes en los residuos del tallo de tomate, mediante el ajuste de pH con *6M HCl*.

Diseño experimental para la obtención de lignina

Para evaluar el mejor tratamiento en la obtención de lignina, se mantuvo constante la concentración de la solución de ácido sulfúrico al 72% al igual que el volumen de agua destilada aumentada, con el objetivo de aplicar un diseño factorial por duplicado entre dos factores y tres niveles.

Tabla 6*Diseño en la extracción de lignina*

Orden corridas	# Corridas	Muestra (g)	Volumen H ₂ SO ₄ (ml)	Cantidad Lignina (g)
14	1	3.5	20	-
11	2	3.5	15	-
1	3	3	15	-
13	4	3	20	-
4	5	3	20	-
18	6	4	25	-
10	7	3	15	-
15	8	4	20	-
9	9	4	25	-
8	10	3.5	25	-
3	11	4	15	-
17	12	3.5	25	-
16	13	3	25	-
6	14	4	20	-
2	15	3.5	15	-
12	16	4	15	-
7	17	3	25	-
5	18	3.5	20	-

Nota. La tabla indica los tratamientos adecuados para la extracción de lignina de los residuos del tallo de tomate, usando hidrólisis ácida H_2SO_4 .

Diseño experimental en la obtención celulosa

Para identificar el mejor tratamiento en la obtención de celulosa se realizó un diseño experimental factorial de tres factores con tres niveles, mientras el volumen del ácido empleado en el lavado se mantuvo constante al igual que la temperatura.

Tabla 7

Diseño extracción de celulosa

Orden corridas	# Corridas	Concentración NaOH %	Volumen NaOH (mL)	Muestra (g)	Peso celulosa (g)
6	1	17.5	90	1	-
19	2	10	80	2	-
9	3	17.5	100	1	-
24	4	17.5	90	2	-
15	5	17.5	90	1.5	-
14	6	12.5	90	1.5	-
22	7	10	90	2	-
18	8	17.5	100	1.5	-
7	9	10	100	1	-
8	10	12.5	100	1	-
10	11	10	80	1.5	-
20	12	12.5	80	2	-
4	13	10	90	1	-
13	14	10	90	1.5	-
25	15	10	100	2	-

Orden corridas	# Corridas	Concentración NaOH %	Volumen NaOH (mL)	Muestra (g)	Peso celulosa (g)
17	16	12.5	100	1.5	-
27	17	17.5	100	2	-
2	18	12.5	80	1	-
11	19	12.5	80	1.5	-
16	20	10	100	1.5	-
21	21	17.5	80	2	-
26	22	12.5	100	2	-
3	23	17.5	80	1	-
5	24	12.5	90	1	-
12	25	17.5	80	1.5	-
23	26	12.5	90	2	-
1	27	10	80	1	-

Nota. La tabla indica los tratamientos adecuados para la extracción de celulosa de los residuos del tallo de tomate, usando hidrólisis alcalina con *NaOH*.

Diseño en el blanqueamiento de celulosa

Para la obtención de una celulosa más blanquecina, las muestras se sometieron a un proceso de blanqueamiento, mediante la adición de diferentes concentraciones de *NaClO*, para lo cual se aplicó un diseño factorial entre dos factores y tres niveles de estudio.

Tabla 8*Diseño para obtener el mejor blanqueamiento de celulosa*

Orden corridas	# Corridas	Concentración NaClO %	Cantidad Celulosa (g)	Peso Celulosa (g)	Color
14	1	2.5	1.5	-	-
9	2	5	2	-	-
2	3	2.5	1	-	-
4	4	1.5	1.5	-	-
6	5	5	1.5	-	-
18	6	5	2	-	-
3	7	5	1	-	-
8	8	2.5	2	-	-
17	9	2.5	2	-	-
10	10	1.5	1	-	-
15	11	5	1.5	-	-
11	12	2.5	1	-	-
5	13	2.5	1.5	-	-
1	14	1.5	1	-	-
7	15	1.5	2	-	-
12	16	5	1	-	-
13	17	1.5	1.5	-	-
16	18	1.5	2	-	-

Nota. La tabla representa los tratamientos para el blanqueamiento de la celulosa con hipoclorito comercial al 5%.

Diseño para la obtención de películas de celulosa

Con la finalidad de analizar la interacción que conlleva la mezcla del plastificante PVA con la celulosa, se seleccionó el diseño experimental factorial de 3 factores y 2 niveles como se observa en la tabla 7, dichos parámetros son los que tienen mayor influencia en la formación de la película, la temperatura de secado de 30 °C se mantuvo constante, adicionalmente se realizó un experimento de referencia empleando 5 g de PVA, con el objetivo de establecer las diferencias y mejoras de la adición de celulosa como compuesto de relleno.

El software empleado en la obtención del diseño experimental es Desing Expert versión 11 para estudiantes, el programa permitió la visualización, orden de corridas en los ensayos, además se verificó el estimado de fuerza al cual se trabaja, siendo este del 99.6%, significa que es un buen diseño.

Tabla 9

Diseño para obtener la mejor película

Orden corridas	# Corridas	Cantidad PVA (g)	Cantidad Celulosa (g)	Tiempo secado (Días)	Rpe so	Esfuerzo Tracción	Permeabilidad
4	1	5	0.5	1	-	-	-
9	2	2.5	0.75	1	-	-	-
7	3	2.5	0.75	1	-	-	-
14	4	2.5	0.5	2	-	-	-
5	5	5	0.5	1	-	-	-
10	6	5	0.75	1	-	-	-
18	7	5	0.5	2	-	-	-

Orden corridas	# Corridas	Cantidad PVA (g)	Cantidad Celulosa (g)	Tiempo secado (Días)	Rpe so	Esfuerzo Tracción	Permeabilidad
21	8	2.5	0.75	2	-	-	-
16	9	5	0.5	2	-	-	-
12	10	5	0.754	1	-	-	-
20	11	2.5	0.75	2	-	-	-
19	12	2.5	0.75	2	-	-	-
24	13	5	0.75	2	-	-	-
8	14	2.5	0.75	1	-	-	-
6	15	5	0.5	1	-	-	-
3	16	2.5	0.5	1	-	-	-
15	17	2.5	0.5	2	-	-	-
13	18	2.5	0.5	2	-	-	-
22	19	5	0.75	2	-	-	-
17	20	5	0.5	2	-	-	-
11	21	5	0.75	1	-	-	-
2	22	2.5	0.5	1	-	-	-
1	23	2.5	0.5	1	-	-	-
23	24	5	0.75	2	-	-	-

Nota. La tabla representa el diseño experimental, para evaluar que tratamiento genera mejores películas.

Elaboración de la película

La matriz polimérica se preparó a través de la disolución de PVA en agua destilada, seleccionando un volumen de 150 mL, añadiendo respectivamente la cantidad de celulosa requerida para cada experimento, la solución formada por el PVA, celulosa y agua se sometió a agitación constante a temperatura ambiente durante 30 min, después de ello se calienta la solución a una temperatura de 90 °C durante 1.5 h, con la finalidad de que el PVA se disuelva completamente y la mezcla se homogenice, posteriormente las mezclas se dejan enfriar al ambiente y se trasvasan al recipiente de vidrio para ser llevadas a la estufa de convección forzada a 35°C durante 1 o 2 días según el diseño de la Tabla 7, luego las películas se llevaron a la estufa al vacío, con la finalidad de eliminar los gases en cada muestra, como parte final del proceso las películas se almacenan a una humedad relativa del 65% hasta realizar las pruebas según la norma ASTM E96 y ASTM D638.

Pruebas fisicoquímicas

Solubilidad

Para determinar qué tan soluble son las películas formadas a base de PVA y celulosa es necesario aplicar tratamientos químicos, en los cuales se exponen muestras de 2x2 cm previamente acondicionadas en un desecador, para ser expuestas a soluciones ácidas o básicas, en este trabajo se analizó el parámetro de solubilidad mediante la aplicación de agua destilada y acetona, durante un rango de tiempo de 24 h, con el fin de observar los cambios que se efectúan en las películas, a través de esta metodología se identificó la solubilidad o insolubilidad de las diferentes muestras, para ello se considera la relación entre los pesos de la muestra seca antes de introducirse en los líquidos y el peso al final después del tratamiento, sin embargo para eliminar el exceso de humedad las muestras se sometieron a secado en estufa aproximadamente 1 h a 50 °C. El porcentaje de solubilidad se calculó mediante la Ecuación 4.

$$\text{Solubilidad (\%)} = \frac{[\text{peso inicial} - \text{peso final}]}{\text{peso inicial}} * 100$$

Ecuación 4 Porcentaje de solubilidad

Permeabilidad al vapor de Agua

La medición del parámetro de la permeabilidad al vapor de agua se desarrolló de acuerdo a la Norma ASTM E 96-95, dicho factor permite evaluar con qué facilidad se transmite el vapor de agua a través del área de las películas de determinado espesor, para la cual se realizó el control de condiciones como la temperatura y la humedad, para ello se emplea desecadores acondicionados a 70% y 100% de humedad relativa, se empleó sal de sodio del ácido acético y de agua destilada respectivamente.

Se recortan círculos de 46 mm de diámetro, se usó teflón para generar una mejor unión entre la película y el recipiente que contiene sílica gel, la transferencia de vapor de agua se determina a través de la pérdida de peso de las muestras, la cual se cuantificó en diferentes rangos de tiempo, mediante la Ecuación 5.

$$\text{WVP} = \frac{\text{WVTR} * Z}{S * (\text{HR}_2 - \text{HR}_1)}$$

Ecuación 5 Porcentaje de permeabilidad al vapor de agua

Donde:

WVP: permeabilidad al vapor de agua en $\frac{g}{s * m * MPa}$

WVTR: pendiente de la curva $\frac{g}{h}$ sobre área de la película en $\frac{g}{s * m^2}$

S: presión de vapor de agua a la temperatura de ensayo en *MPa*

T: temperatura de ensayo en °C.

HR₂: humedad relativa de la cámara (0%)

HR₁: humedad relativa en el interior de la celda

Z: espesor (m)

Contenido de humedad

La evaluación de la humedad que contienen las películas se analizó con la ayuda del analizador de humedad del tipo HB43-S METTLER TOLEDO, el cual permite identificar la pérdida de peso después del calentamiento, el analizador permitió la configuración de la cantidad de muestra en un rango de 0.5 y 0.7 g y la temperatura deseada de 105 °C, el contenido de humedad se reflejó en la pantalla durante la pérdida de humedad.

Espesor

El espesor de las películas se determinó a través de mediciones aleatorias por triplicado de las diferentes películas, mediante el uso de un calibrador digital, finalmente se realizó el promedio de las medidas hasta obtener una media que refleje el espesor de las películas.

Ensayos mecánicos

Para determinar el esfuerzo máximo a la tracción, se realizaron probetas de las películas en base a la norma ASTM D-882, para ello se cortaron muestras de 150 mm de longitud por 20 mm de ancho, luego se delimitó una longitud de 90 mm entre mordazas, para los ensayos se empleó una máquina universal en la cual se controlaron parámetros como velocidad de cruceta, espesor y área, las mediciones se realizaron por duplicado, la máquina de ensayo muestra las curvas entre la fuerza y el desplazamiento.

Técnicas de análisis térmico

Análisis Termogravimétrico TGA

El equipo empleado en el análisis termogravimétrico es el modelo Pyris 1 TGA de PerkinElmer, en el cual se configuró las condiciones según la norma ASTM E1131-08, en la cual se establece la cantidad de muestra según el material, la velocidad de flujo de 50 ml/min para termoplásticos, el tiempo de purga de 2 min, una temperatura inicial de 25 °C y una final de 600 °C según la norma y una velocidad de calentamiento de 10 °C/min y un cambio de gas de nitrógeno a oxígeno, evaluando la carbonización del material.

Características estructurales

Espectrómetro infrarrojo de transformada de Fourier FTIR

Para identificar la interacción de los componentes de las películas se utilizó un espectrómetro infrarrojo de transformada de fourier de PerkinElmer versión 10.5.2, pudiendo evaluar las estructuras compuestas por PVA y celulosa obtenida mediante el trabajo, las películas se acondicionaron en un desecador durante 2 días antes de la medición.

Capítulo IV

Análisis de resultados

Investigación bibliográfica de porcentajes de componentes lignocelulósicos

En el presente apartado se describen los componentes que se generaron en la producción y post producción del tomate con base en la revisión bibliográfica, también se evaluó el rendimiento de cada componente lignocelulósico que puede ser extraído en mayor proporción mediante métodos físicos y químicos. Siendo la celulosa el compuesto que se presenta en mayor proporción. La Tabla 10, indica un valor promedio de 40.71 % correspondiente para la celulosa, seguido por un 11.66 % de Hemicelulosa y un 8.74 % de lignina, mientras que se generaron alrededor de 8.50 % correspondientes a cenizas. El porcentaje residual pertenece a componentes extractivos, Alrededor del 2.7-23.32 % corresponden a extractivos (Cabrera & Chamba, 2022).

Se seleccionó a la celulosa como el componente principal para ser empleada en la elaboración de biopelículas, mediante la adición de PVA. Las cuales pueden actuar como recubrimiento de alimentos con humedades bajas, a causa de que el PVA se solubiliza fácilmente en agua, mientras que, en solventes derivados del petróleo como la acetona, el porcentaje de solubilidad es inferior, por lo tanto, estas películas pueden ser empleadas como membranas en el tratamiento de agua, debido a la superficie irregular, en la cual la celulosa actúa como componente capilar, además de ser un componente que mejora las propiedades mecánicas del polímero biodegradable.

Componentes lignocelulósicos generados por los residuos de la planta de tomate

Tabla 10

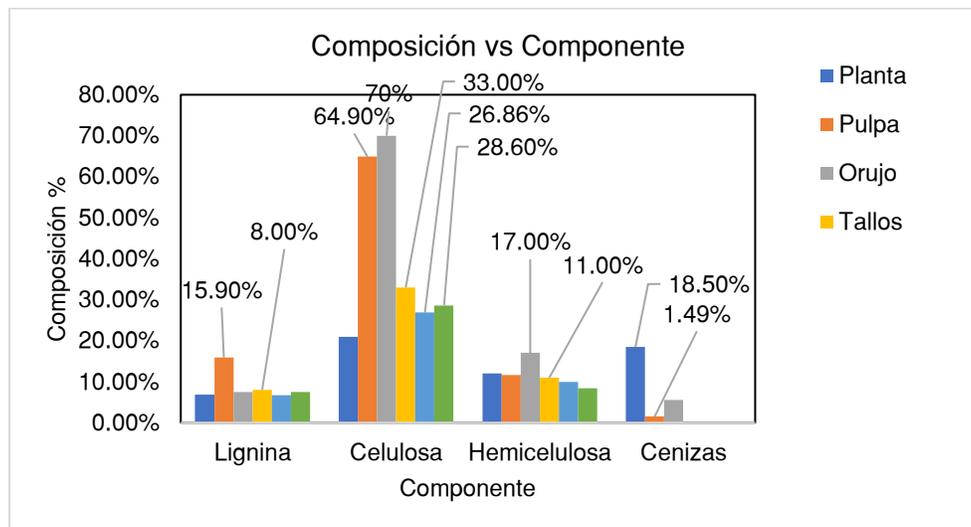
Composición de los residuos de la planta de tomate

Tipo de residuo	Lignina	Celulosa	Hemicelulosa	Cenizas	Bibliografía
Planta tomate	6.85%	20.90%	11.98%	18.50%	(Bascón et al., 2020)
Pulpa	15.90%	64.90%	11.65%	1.49%	(Bascón et al., 2020)
orujo tomate	7.50%	70%	17.00%	5.50%	(Sarria et al., 2018)
tallos de tomate	8.00%	33.00%	11.00%		(Manrriquez et al., 2021)
bio residuos de tomate	6.69%	26.86%	9.90%		(Szilágyi et al., 2021)
Tallos y hojas	7.50%	28.60%	8.40%		(Camarena et al., 2020)
Promedio	8.74%	40.71%	11.66%	8.50%	

Nota. La tabla representa las concentraciones de componentes lignocelulósicos de la planta de tomate registrados en diferentes investigaciones.

Figura 12

Representación gráfica de componentes lignocelulósicos



Nota. La Figura 12 representa la concentración de los componentes lignocelulósicos para diferentes residuos de la planta de tomate.

El aprovechamiento de los componentes lignocelulósicos se basó en el uso de los productos derivados contenidos en la celulosa y hemicelulosa, los cuales se extrajeron mediante diferentes procesos Tabla 9, extrayendo azúcares como la glucosa, celobiosa y maltosa, productos empleados en la producción de bioplásticos, bioetanol, obtención de ácidos orgánicos o edulcorantes, aun así, la eficiencia de extracción y uso de estos azúcares dependen de los métodos de procesamiento. Según la información de la Tabla 8 y 9, se determinó a la celulosa como el componente principal mayoritario y con mejores rendimientos.

Acondicionamiento de residuos

La extracción de componentes celulósicos se generó mediante el tratamiento de los residuos del tallo de tomate, a través de pretratamientos, físicos y químicos, el proceso de pretratamiento con agua, el proceso de secado, tamizaje, pretratamiento con solvente para eliminar la mayor cantidad de

compuestos lipídicos, seguido de un pretratamiento ácido para la eliminación de hemicelulosa y alcalino para la precipitación de lignina, la figura 13 indican el aspecto de los residuos antes y después de cada proceso.

Figura 13

Cambios de apariencia en los diferentes procesos



Nota. Representación gráfica del cambio de apariencia de los residuos de tallo de tomate en cada proceso, a) lavado con NaClO a 50°C, b) secado a 105 °C, c) tamizaje 450 um, d) extraíbles (etanol al 96%), e) precipitación de hemicelulosas (etanol y ajuste de pH a 6M), f) lignina tratada con H_2SO_4 al 72%, g) celulosa tratada con NaOH al 17.5%, seca 65 °C durante 24h, h) celulosa blanqueada con NaClO durante 2h, i) celulosa triturada.

Rendimiento de materia prima en los diferentes procesos.

La preparación de los residuos se realizó mediante proceso de lavado, trituración y secado de la materia prima proveniente de los tallos de tomate, con la finalidad de obtener muestras con tamaños de partículas adecuadas para los procesos de obtención de componentes libres de extraíbles para ser empleados en la obtención de compuestos lignocelulósicos. Para ello se cortaron tallos de aproximadamente 3 cm de longitud, los cuales son secados y triturados hasta obtener un polvo fino, por lo cual se zarandea a través de un tamiz de cocina N° 40, partículas de alrededor 420 μm , mientras los recortes de un tamaño superior se descartaron, en la Tabla 10 se sintetizó el rendimiento de materia prima en cada proceso.

Para evaluar el rendimiento de materia prima se realizó sumatoria de valores muestrales iniciales y finales en cada proceso, se tomó en cuenta el valor total de la materia prima que es ocupada en los diferentes procesos, en la Tabla 11, se observó que la primer pérdida de materia prima se debe a procesos de disminución de humedad, generando un rendimiento del 48% y un porcentaje de merma de 52%, en el proceso de extracción Soxhlet se recuperaron alrededor del 68.27 % de materia libre de extraíbles, finalmente en los procesos de obtención de componentes lignocelulósicos se recuperaron alrededor del 90.36 % de materia útil, mientras que el rendimiento general fue del 22.332 %, consecuentemente se desarrolla una pérdida del 77,668 % en función de la materia prima inicial, las pérdidas de materia y diferencias son alrededor del 2.7-23.32 % corresponden a componentes extractivos (Cabrera & Chamba, 2022).

Tabla 11*Rendimiento de la materia prima en los diferentes procesos*

Materia prima	Cantidad (g)	Cantidad materia pérdida (g)	Porcentaje perdido	Rendimiento
Cantidad inicial	2000			
Triturada	960	1040	52.00%	48.00%
al inicio de Extracción	810.54			
Soxhlet		257.18	31.73%	68.27%
Libres de extraíbles	553.36			
Usados en extracción	63			
de lignina				
Empleados en		53.36	9.64%	90.36%
extracción de	437			
Hemicelulosa y				
Celulosa				

Nota. La tabla describe los rendimientos obtenidos en los procesos de extracción de componentes lignocelulósicos, respecto a la materia prima inicial.

Tabla 12*Rendimiento de la materia prima en los diferentes procesos*

Componente	Cantidad inicial (g)	Cantidad Final (g)	Rendimiento
Celulosa	293.23	92.31	31.48%
Hemicelulosa	90.41	10.02	11.08%
Lignina	63.00	3.57	5.66%

Nota. Alrededor del 2.7-23.32 % corresponden a extractivos (Cabrera & Chamba, 2022).

Proceso extracción Soxhlet

En este tratamiento se desarrolló 54 corridas en base al Diseño experimental 1, tomando en cuenta los factores y niveles de la Tabla 13, se generó un análisis de varianza Tabla 14, identificando que los valores de probabilidad de diferencias significativas en contra de la hipótesis nula, representados por p son inferiores al nivel de significancia 0.05, por lo tanto se determinó que los factores son determinantes en el proceso, entonces se realizó una comparación entre los factores como se observa en la Tabla 15, consecuentemente se identificó que la agrupación de A genera un valor medio superior a las agrupaciones B, C, D, E, F, G, H e I, es decir el tratamiento que generó mayor cantidad de materia prima libre de extraíbles es la combinación de 16.01 g de muestra inicial con 300 mL de solvente del tipo Etanol, mientras que la agrupación de I generó valores medios inferiores.

Tabla 13*Información del factor extracción Soxhlet*

Factor	Tipo	Niveles	Valores
Muestra inicial(g)	Fijo	3	14.01; 15.01; 16.01
Volumen Solvente (mL)	Fijo	3	180; 280; 300
Tipo Solvente	Fijo	2	ET; ET+H2O

Nota. Descripción de los factores y niveles que participan en el diseño para la eliminación de extractivos.

Tabla 14*Análisis de Varianza extracción Soxhlet*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Muestra inicial(g)	2	15.5862	7.7931	2446.67	0
Volumen Solvente (ml)	2	2.6359	1.31797	413.78	0
Tipo Solvente	1	1.1441	1.14407	359.18	0
Muestra inicial(g)*Volumen Solvente (ml)	4	0.775	0.19375	60.83	0
Muestra inicial(g)*Tipo Solvente	2	4.0665	2.03327	638.35	0
Volumen Solvente (ml)*Tipo Solvente	2	0.2302	0.11511	36.14	0
Muestra inicial(g)*Volumen Solvente (ml)*Tipo Solvente	4	1.1132	0.27831	87.38	0
Error	36	0.1147	0.00319		
Total	53	25.6658			

Nota. Descripción del ANOVA en el diseño para la eliminación de extractivos.

Tabla 15

Comparación de tratamientos extracción Soxhlet por Tukey a un nivel de confianza del 95%

F1*F2*F3	N	Media	Agrupación
16.01 300 ET	3	11.9867	A
16.01 280 ET	3	10.8867	B
15.01 300 ET	3	10.7333	B C
15.01 280 ET	3	10.7200	B C
16.01 300 ET+H2O	3	10.7133	C
16.01 180 ET	3	10.6667	C
16.01 280 ET+H2O	3	10.6000	C
15.01 180 ET	3	10.5633	C D
16.01 180 ET+H2O	3	10.4267	D
14.01 300 ET+H2O	3	10.1367	E
15.01 300 ET+H2O	3	10.0467	E F
14.01 280 ET+H2O	3	10.0067	E F
15.01 280 ET+H2O	3	9.9333	F G
15.01 180 ET+H2O	3	9.7767	G
14.01 300 ET	3	9.5067	H
14.01 280 ET	3	9.3067	I

F1*F2*F3	N	Media	Agrupación
14.01 180 ET+H2O	3	9.2767	I
14.01 180 ET	3	9.1667	I

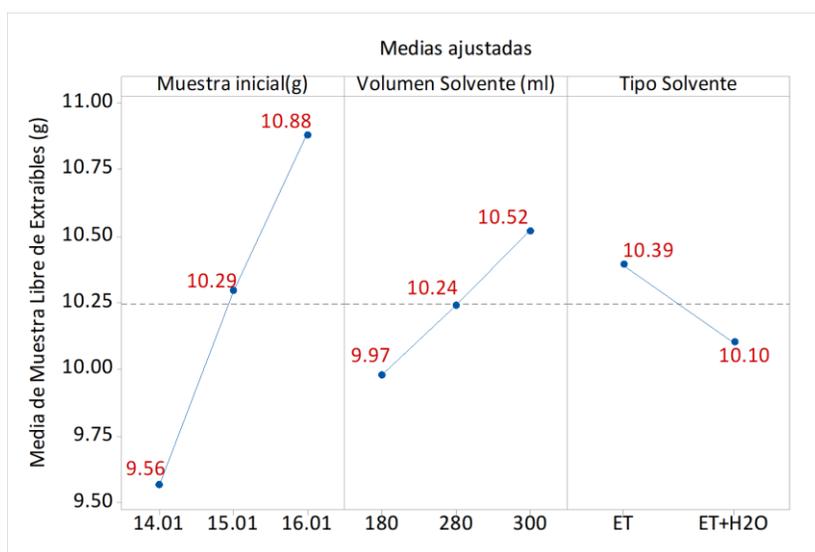
Nota. Descripción de la comparación de factores por el método Tukey que participan en el diseño para la eliminación de extractivos.

Efectos principales que intervienen en la eliminación de extractivos

El desarrollo del trabajo permitió encontrar los efectos principales que resultaron significativos en el análisis de varianza, debido a que la finalidad es identificar el tratamiento que genere la mayor cantidad de muestra o residuos sólidos libres de extraíbles, en función de las variables cómo: muestra inicial de residuos en gramos, cantidad de solvente medido en ml y la variación de solvente puro y mezclado con agua Figura 14.

Figura 14

Diagrama de efectos principales para residuos libres de extraíbles



Nota. La imagen representa los valores de las medias para cada factor que interviene en el diseño.

En la Figura 14, se observó, para el factor muestral inicial de 14.01 g el valor de la media es de 9.56 g, mientras que para 15.01 g es de 10.29 g y finalmente para el valor de 16.01 g se obtiene un valor medio de 10.88 g; se verifica que a mayor cantidad de muestra se obtiene mayor cantidad de residuos libres de extraíbles. El parámetro de la cantidad de solvente indicó que por cada 180 ml generan 9.97 g de residuos, mientras que para un volumen de 280 ml se obtuvo una media de 10.24 g y para un volumen de 300 ml se obtuvo valores medios de aproximadamente 10.52 g, es decir a mayor cantidad de solvente se obtuvo valores superiores de muestras libres de extraíbles, además el factor solvente muestra que es mejor el tratamiento en el que actúa el etanol obteniendo un valor medio de 10.39 g a diferencia de la mezcla de etanol con agua, la cual produce un valor medio de 10.10 g de muestra extraída.

Los resultados obtenidos mediante el proceso soxhlet son significativamente comparables con fuentes bibliográficas presentando porcentajes similares, valores que se reflejan en la Tabla 6.

Tabla 16

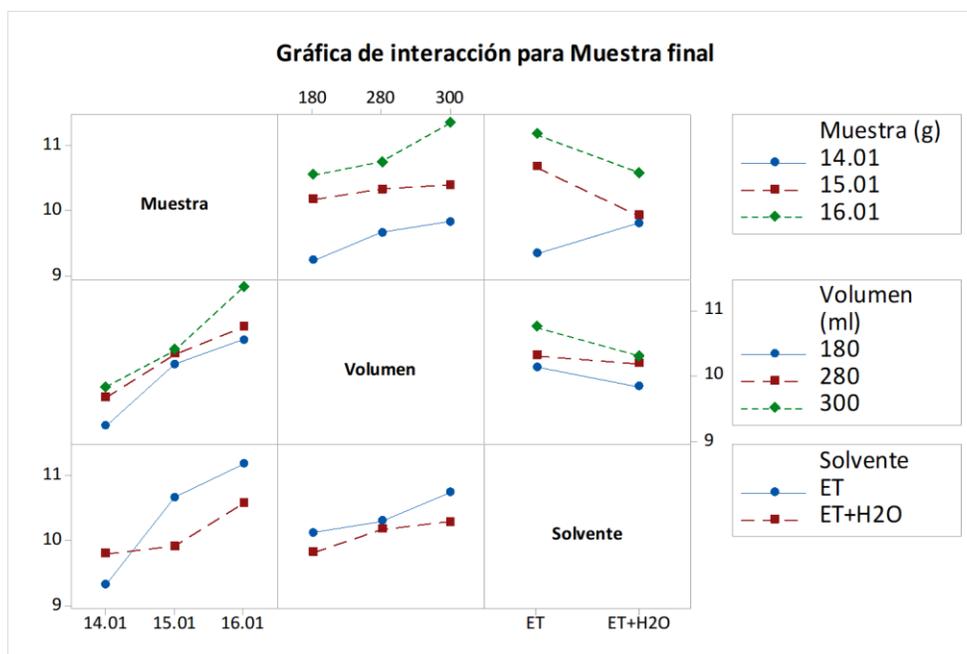
Comparación datos experimentales con el bibliográfico

Muestra inicial (g)	Muestra final (g)	Extractivos	Bibliografía
16.01	11.98	25.17%	29.20%
15.01	10.73	28.51%	(Cabrera & Chamba,
14.01	9.5	32.19%	2022)

Nota. Descripción de cantidades libres de extraíbles y porcentajes de compuestos grasos.

Figura 15

Interacción de Factores que intervienen en la extracción Soxhlet



Nota. Representación gráfica de la interacción de valores medios entre factores principales.

La figura 15, muestra la interacción entre las tres variables principales, se observan los valores medios para cada rango de parámetros, para la interacción entre AB, BC, AC, tomando en cuenta las combinaciones se determinó que el mejor tratamiento para generar mayor cantidad de muestras libres de extraíbles es la mezcla de etanol al 96% a un volumen de 300 ml y una muestra inicial de 16.01 g, mientras que la combinación menos factible es la mezcla de etanol con agua a un volumen de 180 ml y muestras iniciales de 14.01 g.

Humedad y contenido de cenizas en residuos

A través de la diferencia de pesos se determinó el porcentaje de humedad para muestras de residuos entre 1 y 2 gramos, obteniendo un valor promedio de 45% de humedad relativa y un 55 %

representando a la absorción de agua, además de que el contenido porcentual promedio de cenizas analizado a 600 °C en la mufla es del 96%.

Tabla 17

Porcentaje de humedad y cenizas que contienen los residuos del tallo de tomate

Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Humedad (%)	Peso inicial muestra (g)	Peso muestra calcinada (g)	Cenizas (%)
1	0.54	46.00%	23.58	22.71	96.31%
1	0.56	44.00%	24.05	23.25	96.67%
1	0.55	45.00%	23.27	22.71	97.59%
2	1.08	46.00%	23.58	22.71	96.31%
2	1.12	44.00%	24.05	23.25	96.67%
2	1.1	45.00%	23.27	22.71	97.59%
Promedio		45.00%	Promedio		96.86%

Nota. Descripción del porcentaje de humedad y cenizas presentes en los residuos del tallo de tomate.

Obtención de componentes lignocelulósicos

Obtención de Hemicelulosa

En el proceso de obtención de hemicelulosa se emplea el diseño factorial de 2 factores y tres niveles descritos en la Tabla 19, los mismos que permitieron evaluar la significancia de los factores, con ello se verifica que los parámetros causan efectos característicos en el proceso de extracción al igual que la interacción de los dos factores debido a que el valor de p es 0, inferior al nivel de significancia, es decir el valor de las medias para los tratamientos difieren entre sí. Por tal motivo se realizó una comparación de tratamiento mediante el método Tukey. El cual, evaluó los intervalos de confianza presente en las

diferencias obtenidas de valores medios de diferentes tratamientos, además controlar un cierto rango de error en base a cada agrupación.

Tabla 18

Información del factor para la obtención de hemicelulosa

Factor	Niveles	Valores
Muestra Inicial (g)	3	4.01; 5.01; 6.01
Valor de pH	3	3.5; 4.5; 5.5

Nota. La Tabla representa los factores y niveles presentes en el diseño para la extracción de hemicelulosa.

Tabla 19

Análisis de varianza en la obtención de hemicelulosa

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	0.081500	0.010188	261.96	0.000
Lineal	4	0.006200	0.001550	39.86	0.000
Muestra Inicial (g)	2	0.003100	0.001550	39.86	0.000
Valor de pH	2	0.003100	0.001550	39.86	0.000
Interacciones de 2 términos	4	0.075300	0.018825	484.07	0.000
Muestra Inicial (g)*Valor de pH	4	0.075300	0.018825	484.07	0.000

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Error	9	0.000350	0.000039		
Total	17	0.081850			

Nota. La Tabla describe el análisis de varianza referente al diseño de la extracción de hemicelulosa.

Mediante la ANOVA se obtuvieron valores medios entre la interacción de los efectos principales, consecuentemente se generaron agrupaciones de las mismas, generando tratamientos agrupados por las letras A, B, C, D, E y F, en dónde el conjunto A reflejó el valor de la media superior, correspondiente a 5.01 g de muestra inicial tratado a un valor de pH ácido de 3.5, siendo el mejor tratamiento para obtener mayor cantidad de celulosa, seguido de los conjuntos B, C y D, mientras que la agrupación de E y F generan cantidades inferiores de hemicelulosa, es decir las combinaciones menos viables fueron de 5.01 g a un pH de 5.5, 4.01 g a un pH de 4.5 y finalmente el tratamiento menos favorable fue la interacción de 6.01 g a un pH de 3.5.

Tabla 20

Comparaciones de tratamientos obtención de hemicelulosa al 95% de nivel de confianza

Muestra Inicial (g)*Valor de pH	N	Media	Agrupación
5.01 3.5	2	0.305	A
4.01 5.5	2	0.285	A B
6.01 5.5	2	0.270	B C
4.01 3.5	2	0.265	B C

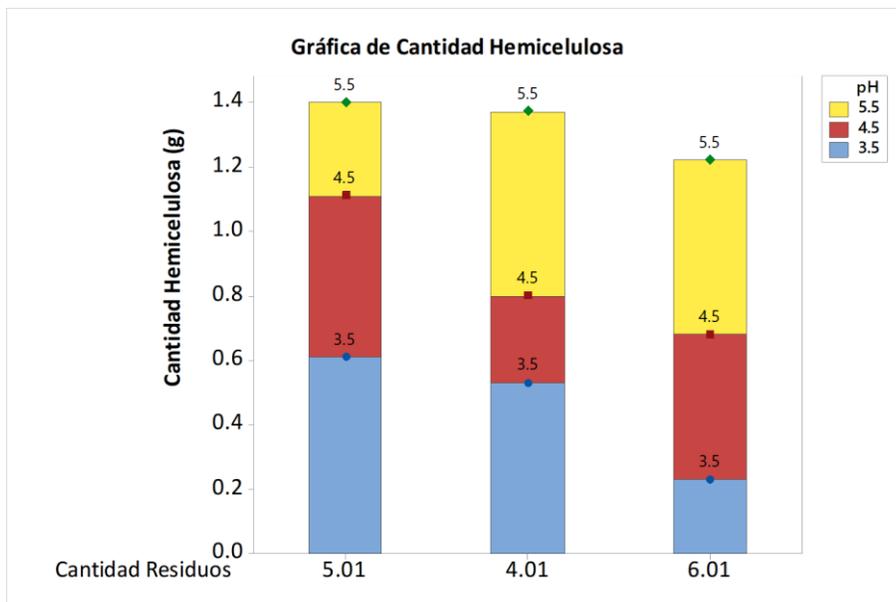
Muestra Inicial (g)*Valor de pH	N	Media	Agrupación
5.01 4.5	2	0.250	C
6.01 4.5	2	0.225	D
5.01 5.5	2	0.145	E
4.01 4.5	2	0.135	E F
6.01 3.5	2	0.115	g F

Nota. La tabla describe las comparaciones de tratamientos en la obtención de hemicelulosa al 95% de confianza según la agrupación de factores y niveles.

El análisis realizado permitió la identificación de los efectos principales y el mejor tratamiento para obtener cantidades considerables de hemicelulosa, en la Figura 16, se observa el gráfico de barras en el cual se representa las regiones en función del pH y la cantidad de materia prima inicial empleada en el proceso, es decir, para las réplicas de muestras de 5.01 gramos se obtuvo mayor cantidad de celulosa, principalmente a un pH de 3.5, mientras que para muestras de 4.01 g el área con mayor cantidad de celulosa es a un pH de 5.5, finalmente para muestras de 6.01 g, la mayor cantidad de hemicelulosa se presentó en un pH de 5.5, resultados comparados con la tabla 12.

Figura 16

Representación gráfica del contenido la hemicelulosa



Nota. Representación gráfica de la hemicelulosa obtenida en función del pH.

Obtención de lignina

Mediante la evaluación de 18 réplicas en el diseño experimental correspondiente a la lignina se evaluó la cantidad de lignina extraída después de la precipitación de lignina generada por la acidificación de las soluciones en función del tiempo de agitación, mientras que la temperatura de 105 °C empleada en la disminución de humedad se mantuvo constante al igual que el tiempo de secado de 2 h, para identificar la intervención de los factores en el proceso de extracción de lignina se emplea ANOVA como se observa en la Tabla 22, el parámetro correspondiente al tiempo tiene un valor de p igual a 0 por lo cual se determina que es significativo en el proceso, al igual que el parámetro de volumen, mientras que la interacción entre los factores presentaron un valor de 0.8 superior al nivel de significancia, es decir, el valor de las medias no difieren en mayor proporción.

Tabla 21*Información del factor extracción de lignina*

Factor	Tipo	Niveles	Valores
Tiempo (h)	Fijo	3	3.0; 3.5; 4.0
Volumen mL (H ₂ O ₄)	Fijo	3	15; 20; 25

Nota. La Tabla representa los factores y niveles presentes en el diseño para la extracción de lignina.

Tabla 22*Análisis de Varianza extracción de lignina*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tiempo (h)	2	0.033233	0.016617	27.95	0.000
Volumen (H ₂ O ₄)	2	0.010300	0.005150	8.66	0.008
Tiempo (h)*Volumen mL (H ₂ O ₄)	4	0.000967	0.000242	0.41	0.800
Error	9	0.005350	0.000594		
Total	17	0.049850			

Nota. La Tabla describe el análisis de varianza referente al diseño de la extracción de lignina.

Comparación de tratamientos según Tukey

Se aplicó la comparación de tratamientos con el objetivo de identificar el mejor tratamiento para obtener mejores rendimientos de lignina, en la Tabla 23, se aprecia el conjunto A como el grupo de

tratamientos con un mejor rendimiento, para una media de 0.25 g de lignina se empleó la combinación de 3.5 h y 25 mL de ácido, al igual que el tratamiento que empleó 4 h y un volumen de 25 mL, confirmando que a mayor permanencia de la muestra en agitación se genera mayores cantidades de lignina, aun así el conjunto de datos pertenecientes a la agrupación C, son aquellos que presentan valores medios de lignina menores a los conjuntos A y B, por lo cual se determina menor viabilidad.

Tabla 23

Comparación de tratamientos en la extracción de lignina

Tiempo (h)*Volumen H ₂ O ₄ (mL)	N	Media	Agrupación		
3.5 25	2	0.255	A		
4.0 15	2	0.255	A		
4.0 25	2	0.250	A	B	
3.5 15	2	0.220	A	B	
4.0 20	2	0.205	A	B	
3.5 20	2	0.185	A	B	C
3.0 15	2	0.155	B		C
3.0 25	2	0.155	B		C
3.0 20	2	0.105	C		

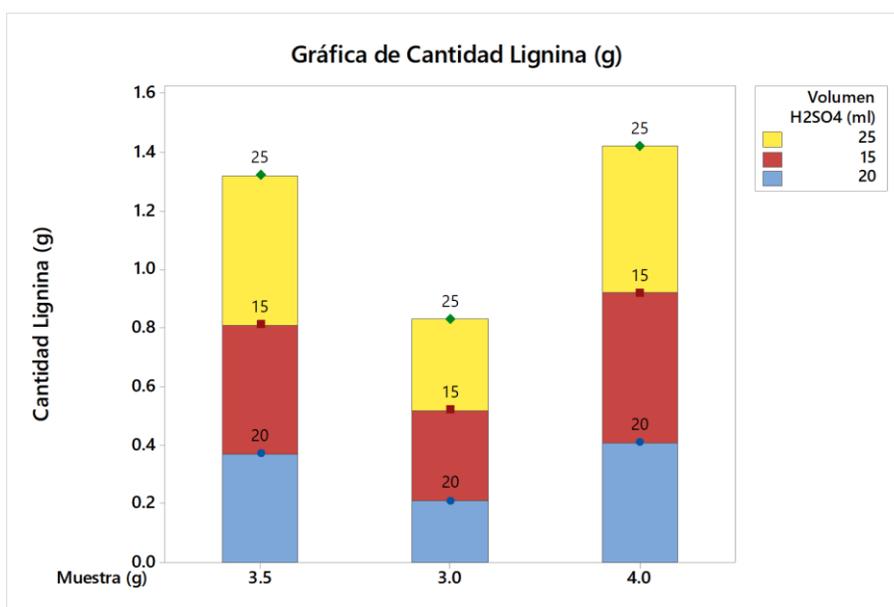
Nota. La tabla describe las comparaciones de tratamientos según Tukey en la obtención de lignina.

El gráfico de barras de la Figura 17, permitió observar las regiones en las cuales se genera mayor cantidad de lignina en función de los parámetros de tiempo de agitación y volumen de ácido,

observando que para un tiempo de 4 h se obtiene un valor promedio de 1.4 g de lignina, sin embargo, las regiones de mayor representatividad son aquellas en las que se emplearon volúmenes de 25 mL y 15 mL. Para un tiempo de 3.5 h se alcanzó alrededor de 1.35 g de lignina, mientras que para un tiempo menor de agitación y permanencia del residuo en ácido se logró valores de aproximadamente 0.8 g de lignina, siendo el tratamiento con mayor deficiencia.

Figura 17

Representación gráfica de la cantidad de lignina



Nota. La Figura representa la cantidad de lignina que se obtiene según los tratamientos empleados en la extracción de lignina.

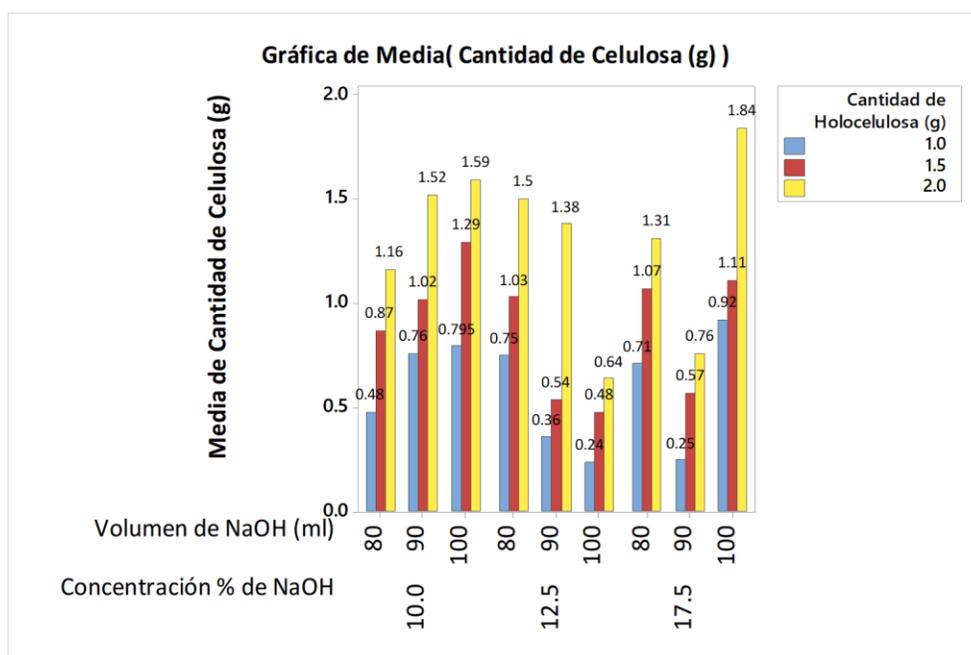
Obtención de Celulosa

Mediante los datos generados por el diseño experimental se obtiene el diagrama de efectos principales Figura 18, y el diagrama de representación de barras agrupa en función de la concentración del hidróxido de sodio, los diferentes ml de base empleada y la cantidad de holocelulosa como materia prima principal, en la Figura 18 se observa que el mejor rendimiento de celulosa es determinado por el

tratamiento que empleó una concentración de NaOH de 17.5 %, con un volumen de 100 mL y la cantidad inicial de holocelulosa de 2 g, el segundo mejor tratamiento fue la combinación del 10% de NaOH con 2 g de muestra y 100 mL de volumen, mientras que los tratamientos que generaron mínimas cantidades de celulosa corresponden a la interacción de 1 g de muestra con 17.5% de concentración y un volumen de 100 mL.

Figura 18

Representación gráfica de la cantidad de celulosa extraída



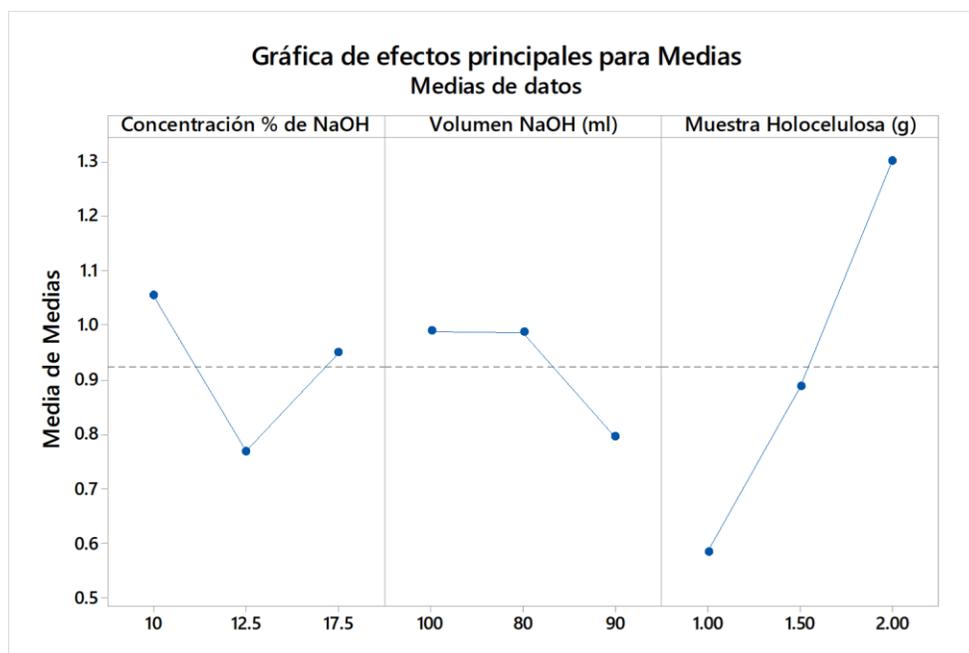
Nota. Representación gráfica de la cantidad de celulosa obtenida en función de los factores y niveles representativos.

En la figura 19, de efectos principales se puede observar que para concentraciones de NaOH del 10%, 12.5% y 17.5% se consiguieron alrededor de 1.07 g, 0.75 g y 0.95 g de celulosa respectivamente, mientras que la relación de cantidad de celulosa y volumen indicó que los valores de 100 y 80 mL son los más adecuados para obtener valores superiores al tratamiento que emplea 90 mL, en tanto el rango

superior de muestra inicial de holocelulosa generó mayores cantidades de celulosa, aproximadamente de 1.3 g, en cambio al emplear una muestra inicial de 1 g se alcanzan cantidades de 0.4 g.

Figura 19

Representación gráfica de los efectos principales



Nota. Representación gráfica de los factores principales que intervienen en la obtención de celulosa.

Obtención de películas

Se decidió emplear al PVA y al *Caesalpinia spinosa* en la formación de películas a base de celulosa, debido a que el PVA es un homopolímero con buenas características de biodegradabilidad y biocompatibilidad, además de ser un compuesto que presenta valores considerables de elongación, además de ser un componente hidrófilo, es decir de fácil solubilización de agua, mientras que la *Caesalpinia* aporta rigidez a las películas, sin embargo la combinación del PVA y la tara generaron películas más solubles y más rígidas, inclusive la tonalidad de las películas fue amarillenta, además tiende a degradarse en menor tiempo estos efectos se observan en la figura 21, también en los ensayos

se observa la formación de espuma en las mezclas, lo que generó películas no homogéneas, debido a la falta de distribución de la celulosa en la mezcla de PVA y *Caesalpinia* .

Tabla 24

Pruebas obtención de películas previas al diseño experimental

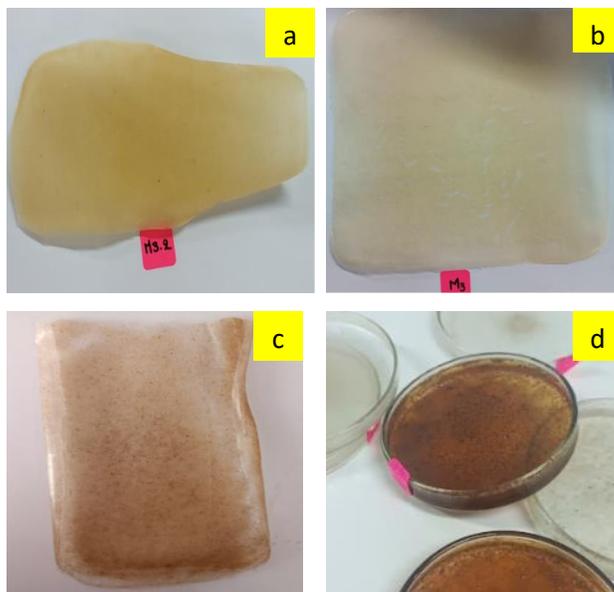
Tiempo de agitación (h)	Temperatura de calentamiento (°C)	Volumen de Agua (ml)	Cantidad de PVA (g)	Cantidad de Celulosa (g)	Cantidad de Tara (g)
1	70	150	5	0.5	1.5
1	70	150	2.5	0.5	1
2	70	150	5	0.75	1.5
2	70	150	2.5	0.75	1

Nota. La tabla describe los tratamientos aplicados en la obtención de las primeras películas a base de celulosa, glicerol y tara como componentes modificantes.

En la Figura 20, se observó el color amarillento, a causa de que la Tara tiende a quemarse, a causa de su rápida absorción de agua, formando una mezcla gelatinosa, impidiendo la homogeneización entre el PVA y la celulosa, también los ensayos demostraron que la tara aportó rigidez al secarse, por ello las películas se volvieron quebradizas, con tendencia a romperse fácilmente.

Figura 20

Representación gráfica de las películas obtenidas

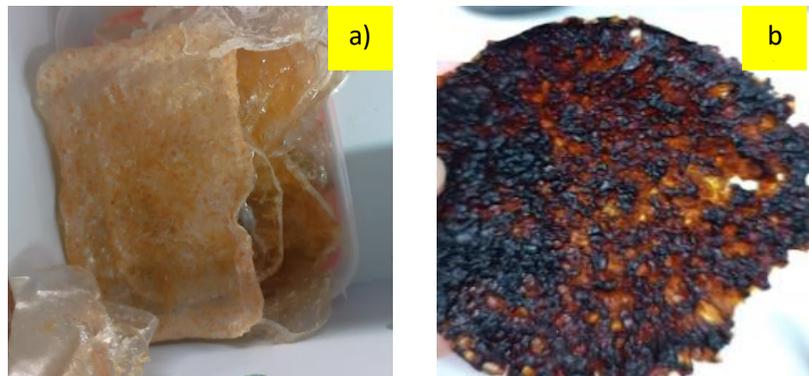


Nota. Apariencia de las películas según la composición, a) 5 g PVA + 0.5 Celulosa+ 1.5 g Tara, b) 2.5 g PVA + 0.5 Celulosa+ 1 g Tara, c) 5 g PVA + 0.75 Celulosa+ 1.5 g Tara, d) 2.5 g PVA + 0.75 Celulosa+ 1 g Tara.

Para prevenir la fragilidad de las películas se agregó 2mL de glicerol, el cual aporta con elasticidad, sin embargo, la adición de este componente, generó películas con superficies más irregulares, esto se debe a que la tara tiende a hidratarse de manera rápida y no logró solubilizarse en su totalidad, en la Figura 21, se apreció la apariencia de dicho tratamiento, en dónde se observó mayor elasticidad, pero la celulosa no se distribuyó de manera uniforme, generando áreas vacías.

Figura 21

Representación gráfica de la apariencia de las películas previas



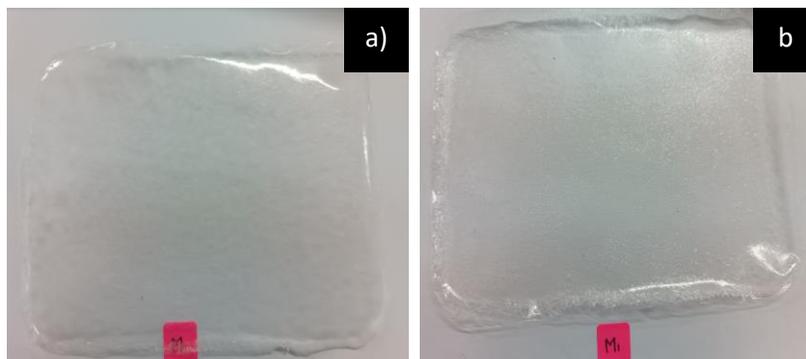
Nota. Apariencia de las películas según con 2 mL glicerol a) 2.5 g PVA + 0.75 Celulosa + 1 g Tara, b) 5 g PVA + 0.75 Celulosa + 1.5 g Tara.

Formación de películas mejoradas

Las películas se obtuvieron mediante la celulosa extraída de los residuos libres de extraíbles, previamente tratados con $NaOH$ a concentraciones entre 10, 12.5 y 17.5 % durante 1 h y acidificados con ácido al 6% durante 1 h, con la finalidad de eliminar lignina y hemicelulosa, finalmente la celulosa se blanqueó con hipoclorito comercial a concentraciones de 2.5 % durante 2 h a temperaturas menores a 40 °C para evitar la evaporación del $NaClO$, consecuentemente se prepararon películas mediante la disolución de alcohol polivinílico y la mezcla de celulosa en polvo en 150 mL de agua destilada, a través del diseño experimental se identificó el efecto y la interacción de los factores y sus respectivos niveles indicados en la Tabla 25, mientras que la temperatura de secado se mantuvo constante en 35°C, este proceso permitió obtener películas más homogéneas y menos amarillentas.

Figura 22

Representación gráfica de la apariencia de las películas mejoradas



Nota. Apariencia física según el diseño de la Tabla 22, a) película con 0.5 g celulosa y b) película con 0.75 g celulosa.

Tabla 25

Información del factor en la fabricación de películas mejoradas

Factor	Tipo	Niveles	Valores
Cantidad PVA (g)	Fijo	2	2.5; 5.0
Cantidad Celulosa (g)	Fijo	2	0.50; 0.75
tiempo secado (días)	Fijo	2	1; 2

Nota. La tabla representa los factores y niveles aplicados en el diseño experimental, para obtener películas en mejores condiciones.

En la Tabla 26, se reflejó los resultados del ANOVA, en el cual se observaron los valores de p, los factores correspondientes a la cantidad de PVA, cantidad de celulosa y su interacción presentaron un

valor de p inferior a 0.05 es decir, son factores significativos en el proceso, al igual que la variable de tiempo y la interacción con la cantidad de PVA, por lo tanto, el valor medio del peso de las películas difiere, mientras que la combinación de tiempo de secado y cantidad de celulosa presentaron un valor de p igual a 0.285 mayor a 0.05 es decir que el valor de las medias correspondientes al peso final de las películas no difiere en gran proporción.

Tabla 26

Análisis de Varianza fabricación de películas mejoradas

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Cantidad PVA (g)	1	32.2248	32.2248	9852.18	0
Cantidad Celulosa (g)	1	0.2542	0.2542	77.72	0
tiempo secado (días)	1	0.0155	0.0155	4.74	0.045
Cantidad PVA (g)*Cantidad Celulosa (g)	1	0.1027	0.1027	31.4	0
Cantidad PVA (g)*tiempo secado (días)	1	0.0287	0.0287	8.78	0.009
Cantidad Celulosa (g)*tiempo secado (días)	1	0.004	0.004	1.22	0.285
Cantidad PVA (g)*Cantidad Celulosa (g)* tiempo secado (días)	1	0.026	0.026	7.95	0.012
Error	16	0.0523	0.0033		
Total	23	32.7083			

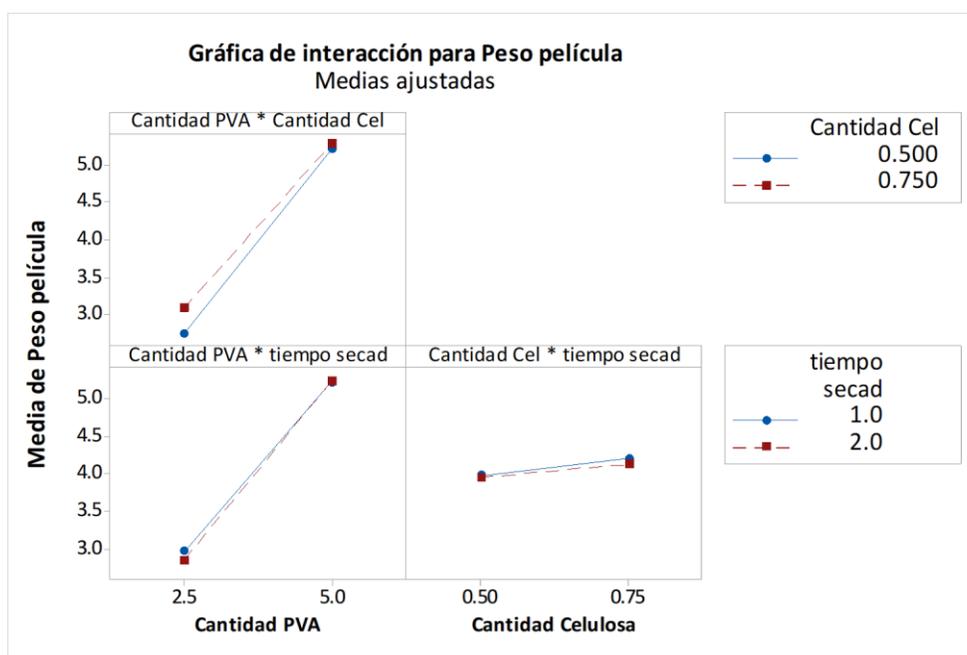
Nota. Análisis de varianza, de los factores que intervienen en la generación de películas a base de celulosa mejoradas con PVA.

Interacción de factores entre el PVA y la celulosa

La Figura 23, indicó la interacción entre los efectos principales, reflejando que los tratamientos son proporcionales, al desear películas con pesos de alrededor de 5 g es necesario emplear los rangos superiores de cada nivel, mientras que para obtener películas más livianas, es necesario emplear cantidades inferiores de PVA y celulosa, mientras que el tiempo de secado no presenta mayor significancia, al saber que el proceso presentó una probabilidad normal, pudiendo evaluar características de solubilidad y permeabilidad en las películas.

Figura 23

Gráfica de interacción entre el PVA y la celulosa



Nota. Representación gráfica de la interacción de PVA y celulosa en las películas, según el tiempo de secado.

Pruebas Físicas

Solubilidad

Para encontrar las películas menos solubles en solvente acetona al 99 % y al 50%, se realizó un ANOVA, en el cual se identificaron si los parámetros del diseño tuvieron efecto en el proceso de solubilización, para ello se evaluó la pérdida de peso de las películas en cada tratamiento, además se empleó el método Tukey al 95 % de confianza para identificar los tratamientos con menor pérdida de peso en las películas.

Análisis de varianza para pérdida de peso de la película con acetona al 99%

Tabla 27

Información del factor prueba de solubilidad

Factor	Niveles	Valores
Cantidad PVA (g)	2	2.5; 5.0
Cantidad Celulosa (g)	2	0.50; 0.75
Tiempo secado (días)	2	1; 2

Nota. La tabla representa la cantidad de PVA, Celulosa y el tiempo de secado tomados en cuenta para la prueba de solubilidad.

EL ANOVA para evaluar la pérdida de peso de las películas respecto a la permanencia en acetona al 99% durante 24 h muestra que, el tiempo de secado y la interacción entre los factores de cantidad de celulosa y tiempo de secado presentaron valores de p iguales a 0.057 y 0.239 respectivamente, por lo tanto son números superiores al valor de significancia de 0.05, por ello se determinó que son factores insignificantes, debido a que el valor de las medias respecto a la pérdida de masa no difieren, entre

tanto para los factores restantes el valor de p igual a 0 o menor a 0.05 indicaron la significancia de ellos en el proceso, es decir, el valor de las medias respecto a la reducción de peso en las películas son diferentes, por ello se realiza una comparación de tratamientos mediante el método Tukey identificando las agrupaciones en las cuales las películas son menos solubles.

Tabla 28*Análisis de Varianza prueba de solubilidad*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	31.3543	4.4792	1613.88	0
Lineal	3	30.2921	10.0974	3638.15	0
Cantidad PVA (g)	1	30.119	30.119	10852.08	0
Cantidad Celulosa (g)	1	0.1614	0.1614	58.14	0
tiempo secado (días)	1	0.0117	0.0117	4.22	0.057
Interacciones de 2 términos	3	1.0394	0.3465	124.83	0
Cantidad PVA (g)*Cantidad Celulosa (g)	1	1.0102	1.0102	364	0
Cantidad PVA (g)*tiempo secado (días)	1	0.025	0.025	8.99	0.008
Cantidad Celulosa (g)*tiempo secado (días)	1	0.0042	0.0042	1.5	0.239
Interacciones de 3 términos	1	0.0228	0.0228	8.22	0.011
Cantidad PVA (g)*Cantidad Celulosa (g)*tiempo secado (días)	1	0.0228	0.0228	8.22	0.011
Error	16	0.0444	0.0028		
Total	23	31.3987			

Nota. El análisis de varianza según la solubilidad de las películas.

Comparaciones que intervienen en el peso perdido con Acetona al 99%

La tabla 29, permite identificar las agrupaciones con diferentes valores de pérdida de peso en las películas, de ese modo el conjunto de tratamientos que pertenece a la letra A indicó una mayor pérdida de peso, lo cual indicó una mayor solubilidad en acetona al 99%, seguidos por los tratamientos de las agrupaciones de B y C, mientras que el conjunto de tratamientos de D indicaron una media inferior, con ello se determinó que la combinación de niveles del conjunto fue la más viable, debido a que las películas pierden menos peso, por ello son más resistentes a la pérdida de peso mediante el proceso de solubilización.

Tabla 29

Comparación de tratamientos solubilidad en acetona al 99%

Cantidad de PVA (g)*Cantidad de Celulosa(g)* Tiempo de secado (Días)	N	Media	Agrupación
5.0 0.75 1	3	0.396000	A
5.0 0.75 2	3	0.390333	A
2.5 0.50 1	3	0.282333	B
2.5 0.50 2	3	0.266333	B
5.0 0.50 2	3	0.072667	C
5.0 0.50 1	3	0.071000	C
2.5 0.75 1	3	0.040000	D
2.5 0.75 2	3	0.033333	D

Nota. Comparación de tratamientos de solubilidad con acetona al 99% en función de la cantidad de celulosa, PVA en el correspondiente tiempo de secado

Análisis de varianza para pérdida de peso de la película con acetona al 50 %

El ANOVA para evaluar la pérdida de peso de las películas respecto a la permanencia en acetona al 50 % durante 24 h mostró que, el tiempo de secado y la interacción entre los factores de cantidad de celulosa y tiempo de secado presentan en la Tabla 30, donde valores de p iguales a 0.39 y 0.303 respectivamente, son números superiores al valor de significancia de 0.05, por ello se determinó que son factores insignificantes, al igual que para el tratamiento con acetona al 99%, entre tanto para los factores restantes el valor de p igual a 0 o menor a 0.005 indican la significancia de ellos en el proceso.

Tabla 30

Análisis de Varianza solubilidad en acetona al 99%

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	28.0397	4.0057	1458.2	0
				2	
Lineal	3	27.7652	9.2551	3369.2	0
				1	
Cantidad PVA (g)	1	27.7501	27.7501	10102.	0
				1	
Cantidad Celulosa (g)	1	0.0021	0.0021	0.78	0.39
tiempo secado (días)	1	0.013	0.013	4.74	0.045

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Interacciones de 2 términos	3	0.2506	0.0835	30.41	0
Cantidad PVA (g)*Cantidad Celulosa (g)	1	0.221	0.221	80.45	0
Cantidad PVA (g)*tiempo secado (días)	1	0.0265	0.0265	9.64	0.007
Cantidad Celulosa (g)*tiempo secado (días)	1	0.0031	0.0031	1.13	0.303
Interacciones de 3 términos	1	0.0239	0.0239	8.69	0.009
Cantidad PVA (g)*Cantidad Celulosa (g)*tiempo secado (días)	1	0.0239	0.0239	8.69	0.009
Error	16	0.044	0.0027		
Total	23	28.0836			

Nota. Análisis de Varianza para los tratamientos de solubilidad con acetona al 99% en función de la cantidad de celulosa, PVA en el correspondiente tiempo de secado.

Comparaciones que intervienen en el peso perdido con Acetona al 50%

La tabla 31, permitió identificar las agrupaciones con disímiles valores de pérdida de peso en las películas, de ese modo el conjunto de tratamientos que pertenece a la letra A indican una mayor pérdida de peso superiores a 0.5 g, lo cual indica una mayor solubilidad en acetona al 99%, seguidos por los tratamientos de las agrupaciones de B y C, mientras que el conjunto de tratamientos de D indicaron una media inferior, pérdidas menores a 0.15, con ello se determinó que la combinación de niveles del conjunto es la más viable, debido a que las películas pierden menos peso, por ello son más resistentes a la pérdida de peso mediante el proceso de solubilización.

Tabla 31

Comparación de tratamientos solubilidad en acetona al 50%

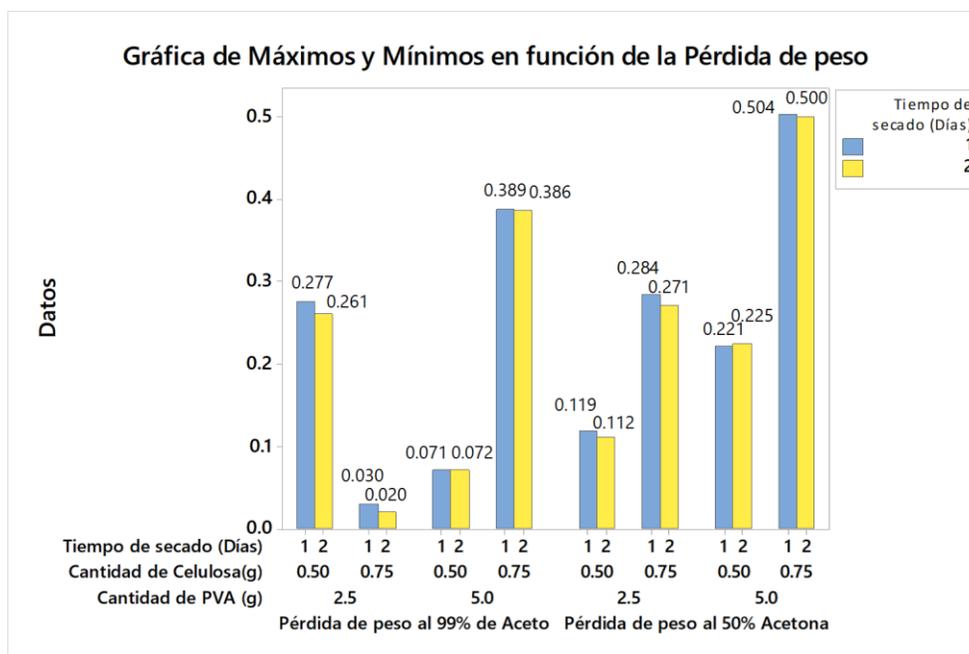
Cantidad de PVA(g)*Cantidad de celulosa(g) * Tiempo de secado (Días)	N	Media	Agrupación
5.0 0.75 1	3	0.513000	A
5.0 0.75 2	3	0.505667	A
2.5 0.75 1	3	0.285000	B
2.5 0.75 2	3	0.277667	B
5.0 0.50 2	3	0.225667	C
5.0 0.50 1	3	0.221333	C
2.5 0.50 1	3	0.121000	D
2.5 0.50 2	3	0.114333	D

Nota. Comparación de tratamientos de solubilidad con acetona al 50% en función de la cantidad de celulosa, PVA en el correspondiente tiempo de secado

En la Figura 24 se observa las pérdidas de peso, cuando las películas se sometieron en acetona al 99 y 50 % de concentración, la mayor pérdida de peso se observó en la agrupación referente al tratamiento con acetona al 50 %, la solubilización es mayor debido a que absorben mayor contenido de agua de la disolución preparada, en cambio las películas tratadas con acetona al 99 % generaron una menor pérdida de masa, a causa de que el PVA y la celulosa son insolubles en componentes derivados de petróleo.

Figura 24

Representación gráfica de la pérdida de peso por la solubilización en acetona al 99%



La tabla 32, indica los porcentajes de solubilidad para películas recortadas en áreas de $2\text{ cm} \times \text{cm}$, las cuales se dejaron reposar en acetona al 99 % y 50 % durante 24 h, para finalmente cuantificar la pérdida de peso, además de estudiar regiones de películas estándar a 5 g de PVA y la combinación de 2.5 g de PVA con 1 g de Tara. Además, de indicar la solubilidad de muestras promedio del diseño experimental correspondiente a la obtención de películas, las películas que presentaron mayor porcentaje de solubilidad tratadas con acetona al 99 % son aquellas en la que actuaron 2.75 g de PVA y 0.75 g de celulosa, mientras que las películas con una solubilidad de 26.633 % son aquellas en las cuales se agregó la Tara, es decir que es un componente que se diluye fácilmente en agua.

Tabla 32*Comparaciones de la solubilidad en acetona al 99 y 50%*

Tratamientos	Acetona 99 %			Acetona 50 %		
	Wo	Wf	Solubilidad %	Wo	Wf	Solubilidad %
	0.132	0.131	0.758	0.114	0.111	2.632
5gPVA+0.5cel	0.102	0.100	1.961	0.133	0.127	4.511
	0.128	0.126	1.563	0.125	0.118	5.600
Peso medio D5	5.192	5.120	1.381	5.192	4.968	4.301
	0.159	0.146	8.176	0.178	0.169	5.056
5gPVA+0.75cel	0.156	0.145	7.051	0.131	0.111	15.267
	0.195	0.181	7.179	0.136	0.122	10.294
Peso medio D5	5.267	4.874	7.451	5.267	4.758	9.663
	0.112	0.107	4.464	0.096	0.092	4.167
2.5gPVA+0.5cel	0.118	0.113	4.237	0.146	0.142	2.740
	0.070	0.050	28.571	0.086	0.080	6.977
Peso medio D5	2.743	2.469	9.989	2.743	2.626	4.268
	0.117	0.107	8.547	0.116	0.105	9.483
2.5gPVA+0.75cel	0.182	0.166	8.791	0.170	0.156	8.235
	0.131	0.119	9.160	0.131	0.118	9.924
Peso medio D5	2.980	2.450	17.785	3.080	2.799	9.113
	0.281	0.266	5.338	0.137	0.131	4.380
5gPVA	0.167	0.159	4.790	0.271	0.265	2.214
	0.276	0.262	5.072	0.240	0.235	2.083

Tratamientos	Acetona 99 %			Acetona 50 %		
	Wo	Wf	Solubilidad %	Wo	Wf	Solubilidad %
Peso medio D5	4.337	4.115	5.119	4.337	4.223	2.623
	0.151	0.132	12.583	0.14	0.091	35.000
2.5gPVA+1Tara+0.5cel	0.13	0.101	22.308	0.111	0.090	18.919
	0.165	0.145	12.121	0.132	0.100	24.242
Peso medio	3.233	3.122	3.433	3.238	2.376	26.632

Nota. Comparación de tratamientos de solubilidad con acetona al 99% y el 50 % en función de la cantidad de celulosa, PVA en el correspondiente tiempo de secado.

Análisis de la permeabilidad al vapor de agua

La permeabilidad se calculó para 9 muestras que predominan en el diseño de obtención de películas, en la selección se tomó en cuenta los mejores pesos de las películas, al igual que se revisó la homogeneidad y distribución de la celulosa en el PVA, los datos para el cálculo se muestran en la Tabla 33.

Tabla 33

Datos del tiempo y la masa prueba de permeabilidad

Muestras (Kg)	Tiempo (s)				Masa recipiente (kg)
	0	64800	86400	151200	
M1	0.099462	0.100083	0.100232	0.100634	0.078678
M2	0.099169	0.099809	0.099907	0.100361	0.078393
M3	0.099701	0.10029	0.100372	0.100748	0.07876

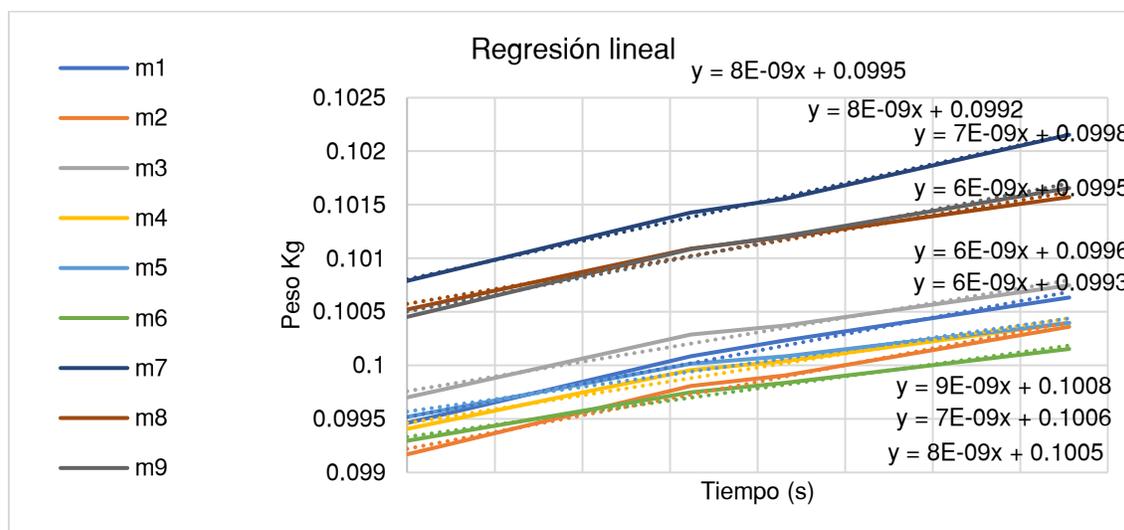
Muestras (Kg)	Tiempo (s)				Masa recipiente (kg)
	0	64800	86400	151200	
M4	0.099407	0.099958	0.100043	0.100396	0.078209
M5	0.099519	0.100014	0.100086	0.100397	0.078328
M6	0.099296	0.09975	0.099837	0.100154	0.078274
M7	0.100789	0.101427	0.101556	0.102154	0.079221
M8	0.100522	0.101093	0.1012	0.101572	0.079047
M9	0.100453	0.101086	0.101212	0.101656	0.079049

Nota. Descripción del peso de los frascos que contienen la sílica y las películas en función del tiempo.

Para determinar la permeabilidad al vapor de agua se realizó una regresión lineal entre la masa inicial del recipiente en función del tiempo, con la finalidad de obtener una ecuación de primer grado, en la cual se obtuvo el valor de las pendientes para cada tratamiento, como se observa en la Figura 25, parámetro que interviene en la determinación de la permeabilidad.

Figura 25

Representación gráfica de las líneas de tendencia



Nota. Representación gráfica de la pendiente obtenida respecto al peso y el tiempo de permeabilidad de las películas.

La Tabla 34, permite observar los cambios de la permeabilidad en función de las humedades relativas controladas para los diferentes tratamientos, la muestra 7 a HR de 70% se permeabilizaron con mayor rapidez, también M8 y M3 absorben menor cantidad de agua, mientras que en una humedad controlada del 100 %, En cambio M7 tiende absorber más humedad, M4, M5 y M6 son menos permeables.

Tabla 34

Permeabilidad en función de los tratamientos y humedades relativas controladas

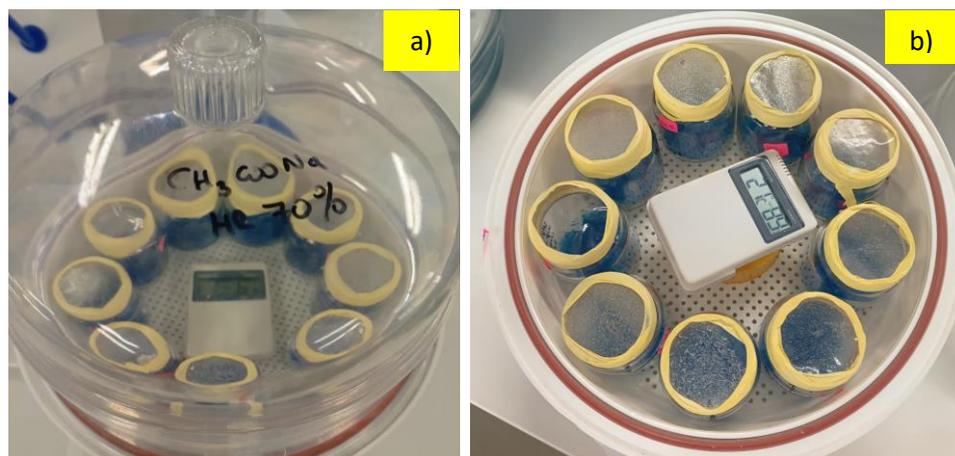
Muestra	Tratamiento	Ensayo HR a 100%	Ensayo a HR 70%	Unidades
M1	2.5+0.5	3.06325E-20	1.02108E-19	Kg/Pa*m*s
M2	2.5+0.5	3.06325E-20	1.02108E-19	Kg/Pa*m*s

Muestra	Tratamiento	Ensayo HR a 100%	Ensayo a HR 70%	Unidades
M3	5+0.75	2.68034E-20	8.93448E-20	Kg/Pa*m*s
M4	5+0.75	2.29744E-20	7.65812E-20	Kg/Pa*m*s
M5	2.5+0.75	2.29744E-20	7.65812E-20	Kg/Pa*m*s
M6	5+0.5	2.29744E-20	7.65812E-20	Kg/Pa*m*s
M7	5+0.5	3.44616E-20	1.14872E-19	Kg/Pa*m*s
M8	2.5+0.75	2.68034E-20	8.93448E-20	Kg/Pa*m*s
M9	2.5Pva	3.06325E-20	1.02108E-19	Kg/Pa*m*s

Nota. Descripción de la permeabilidad en función de los tratamientos y humedades relativas controladas.

Figura 26

Figura Tratamientos de permeabilidad al vapor de agua



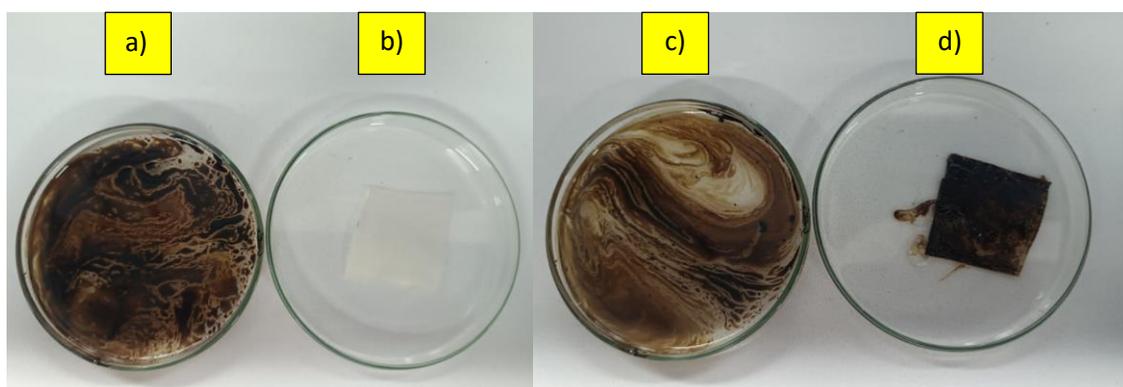
Nota. Prueba de permeabilidad a) humedad relativa del 70%, b) humedad relativa del 100 %

Ensayo de posible aplicación (película como adsorbente)

Se recortaron fragmentos de las películas con mejores propiedades físicas, con la finalidad de probar los efectos en agua contaminada con petróleo, en dónde se observó la adherencia de la sustancia orgánica a la superficie de la película, esto se debe a que la porosidad y la estructura de la película formada por la celulosa permite la adherencia del combustible a la película los efectos se observaron en la siguiente figura.

Figura 27

Ensayo posible aplicación de la película como membrana de adsorción



Nota. a) agua contaminada con petróleo, b) fragmento de película antes de la prueba, c) agua contaminada después del ensayo, d) fragmento de película después del ensayo.

Pruebas mecánicas

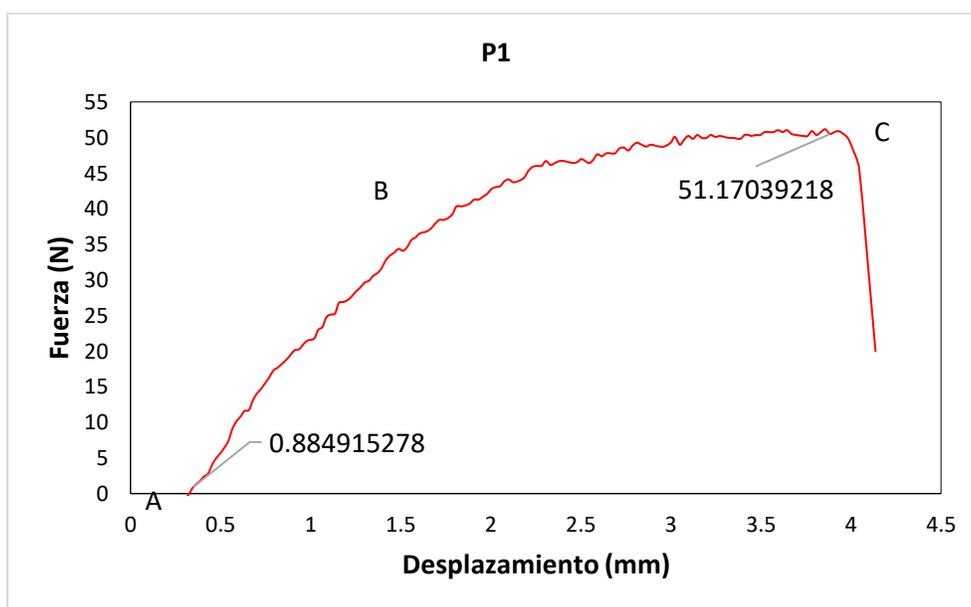
Ensayo de resistencia a la tracción

El ensayo se realizó por duplicado en las películas que presentaron menor solubilidad y pérdida de peso al someterse a solventes derivados del petróleo o compuestos que contengan agua en mayor proporción, en la Figura 28, se visualiza el comportamiento de la película 1 frente a la acción de una fuerza, a medida que asciende el valor de la fuerza la película tiende a estirarse, la curva de Fuerza vs

desplazamiento presenta 3 secciones principales, la región lineal representada por la letra A indica la proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación, es decir zona elástica, mientras que la región B representa la zona plástica, en la cual la película va endureciendo debido a la ruptura de las cadenas poliméricas hasta llegar a la zona de estricción, a una fuerza equivalente de 51.17 N la película alcanza el punto de fractura, logrando un desplazamiento de 3.5 mm.

Figura 28

Representación gráfica de la Fuerza vs desplazamiento en P1

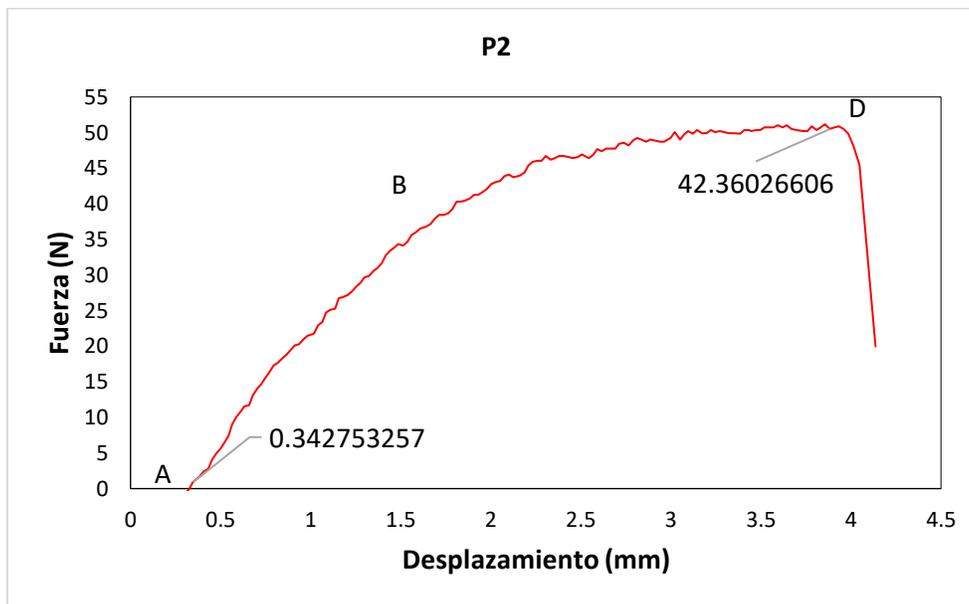


Nota. Ensayo de tracción para la película en base a 2.5 g PVA +0.75 g celulosa

En la Figura 29, se observó que la región lineal o elástica finaliza al aplicarse una fuerza de 0.34 N, en este punto la película no vuelve a su forma original, debido a que pasa a la región B la cual representa el endurecimiento de la película debido a la ruptura de las cadenas por el esfuerzo aplicado, finalmente la película alcanza el punto de fractura, cuando se sometió a una fuerza de 42.36 N.

Figura 29

Representación gráfica de la Fuerza vs desplazamiento en P2



Nota. Ensayo de tracción para la película en base a 2.5 g PVA +0.5 g celulosa.

En la figura 30, se observó que la película mantiene una zona elástica durante un desplazamiento considerable, es esta sección la película puede volver a su forma original, la zona plástica o de endurecimiento se mantuvo durante un periodo de desplazamiento más extenso, sin embargo alcanza el punto de fractura cuando se aplica una fuerza de 56.05 N, en comparación con P1, P2, esta película soporta mayor esfuerzo, mientras que P2 es la película que soporta menor fuerza, además P3 alcanza una mayor elasticidad, la fuerza que soporta las películas obtenidas son superiores a las reportadas por (Campaña, 2021, p.42) en donde la carga máxima es de 3 y 2.29 N y con esfuerzos máximos de 2.68 y 2.38 Mpa, mientras que P1, P2 y P3 presentan esfuerzos de 5.43, 4.60 y 5.48 respectivamente, por ello se infiere que la celulosa añade resistencia a las películas de PVA, debido a que actúa como refuerzo en la matriz polimérica .

Tabla 35

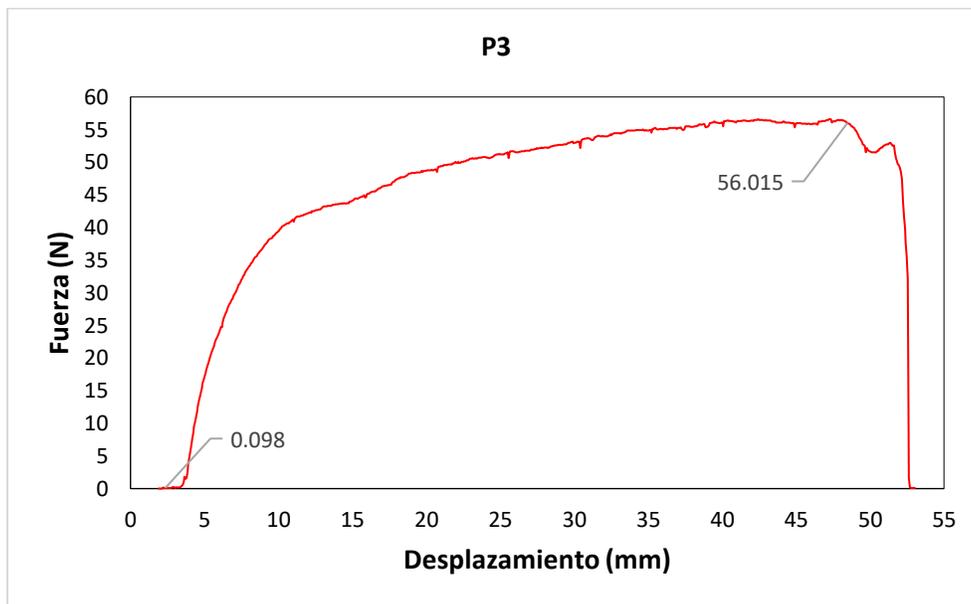
Resultados de las propiedades de tracción de las películas de PVA y celulosa

# películas	# Tratamiento	Especificación	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área de la probeta (mm^2)	Esfuerzo máximo (Mpa)
P1	2	2.5 g PVA +0.75 g celulosa	0.47	20.02	9.41	5.43
P2	16	2.5 g PVA +0.5 g celulosa	0.46	20.01	9.20	4.60
P3	20	5 g + 0.5 g celulosa	0.51	20.02	9.43	5.94
P4	1	5g+ 0.75 g celulosa	0.48	20.01	9.30	8.01

Nota. Descripción del esfuerzo máximo soportado respecto al ensayo de tracción.

Figura 30

Representación gráfica de la Fuerza vs desplazamiento en P3

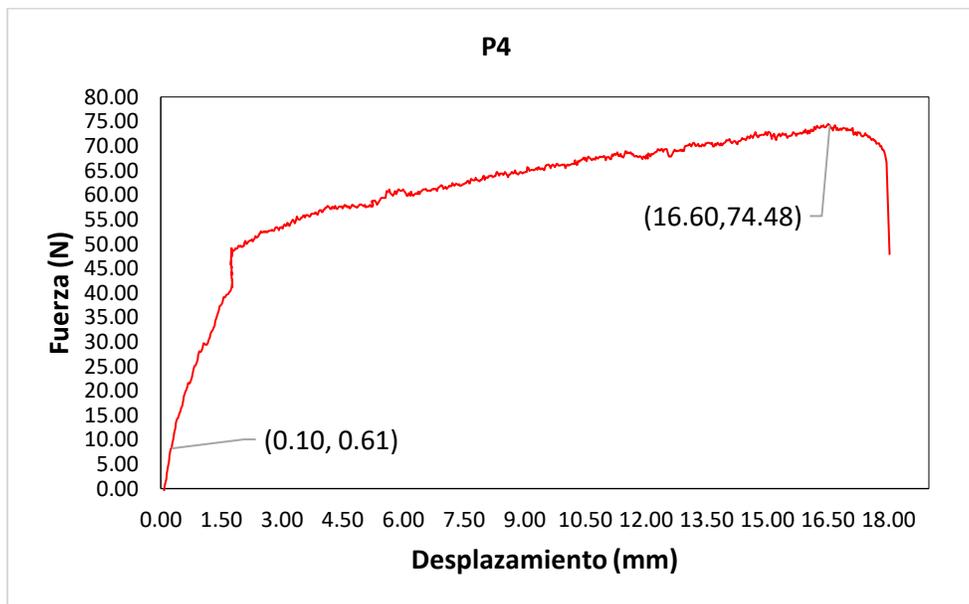


Nota. Ensayo de tracción para la película en base a 5 g de PVA + 0.5 g celulosa.

En la Figura 31, se aprecia que la región de elasticidad tiene mayor desplazamiento en comparación con las anteriores películas, además de presentar una región de endurecimiento por más tiempo, antes de el punto de fractura a 74.48 N, como se observa en la Tabla 35 y en las Figuras de P1, P2 y P3 y P4, la adición de fragmentos de celulosa aumentó la resistencia a la tracción, debido a que las muestras con mayor PVA y aumentan el alargamiento hasta la rotura, esto se debe a la interacción intermolecular entre la celulosa y el PVA, además de que la celulosa presenta considerables grupos hidroxilo, lo cual permite la unión fuerte con la matriz del polímero.

Figura 31

Representación gráfica de la Fuerza vs desplazamiento en P4



Nota. Ensayo de tracción para la película en base a 5 g PVA + 0.75 g celulosa

La película con 5 g de PVA y 0.75 g de celulosa es la que soportó una fuerza de 74.48 N, reflejando un esfuerzo máximo de 8.01 Mpa, valores semejantes a películas elaboradas en base a hemicelulosa extraída de caña de azúcar, las cuales dependen de la concentración, llegando a soportar esfuerzos máximos entre 9.2 y 22.3 MPa según el estudio de (da Silva Braga & Poletto, 2020a).

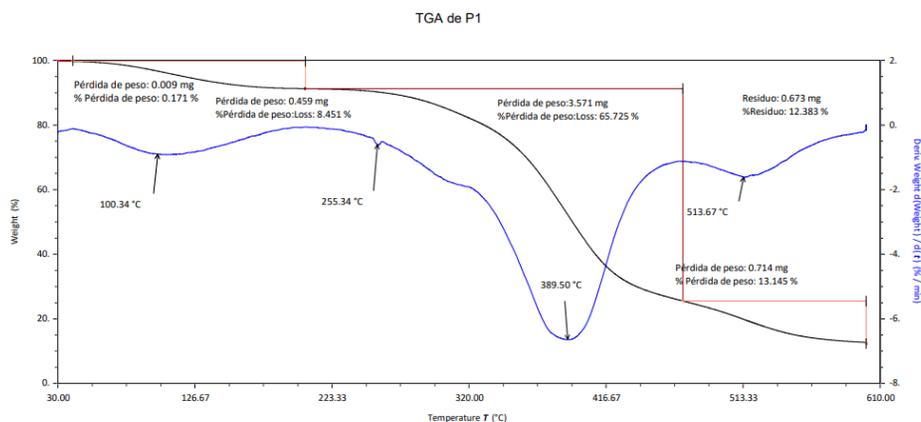
Sin embargo, las características de resistencia a la tracción dependen de las condiciones de las películas, como también el tipo de plastificante y las propiedades de elasticidad, llegando a soportar una resistencia a la tracción de 17.57 Mpa, efectos ocasionados por el glicerol, espesor y cantidades de muestra (Cazón et al., 2020).

Análisis de termogravimetría

En la figura 32, se ilustra la curva de TGA obtenida para P1, se visualiza 3 zonas de pérdida de masa, en la primer etapa la muestra tiende a degradarse en un porcentaje de 0.171 %, la disminución del peso se da entre los valores 30 a 100.34 °C, la pérdida de 0.09 mg se atribuye a la evaporación del agua absorbida por la película, en la segunda zona se pierde 8.451 % de la muestra en temperaturas de 220 y 255.34 °C, está degradación se genera por la ruptura de enlaces de hidrógeno presentes en la interacción entre el PVA y la celulosa, es decir la muestra pierde moléculas de agua y tiende a deshidratarse, mientras que el 65.72 % se genera en la tercer región alcanzando una temperatura 389.50 °C, generalmente se debe a la descomposición de compuestos orgánicos presentes, la cuarta región presenta un 13.14 % de pérdida de masa, se le atribuye la volatilización de componentes y la descomposición de la celulosa, alcanzando una temperatura de 513.67 °C, a temperaturas mayores a 500 °C los componentes lignocelulósicos tienden a descomponerse, finalmente se genera la carbonización completa de la muestra y se produce alrededor de 0.673 mg de cenizas.

Figura 32

Termograma TGA de P1

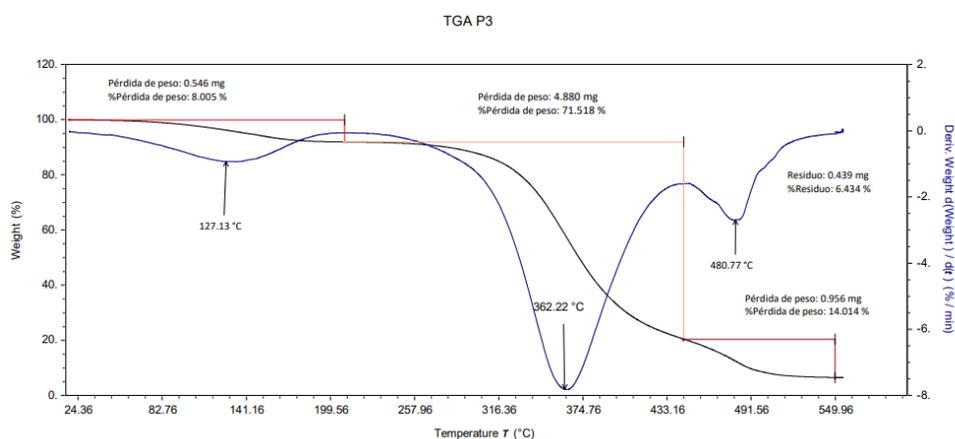


Nota. Análisis de termogravimetría para la película en base a 2.5 g PVA +0.75 g celulosa

El análisis termogravimétrico para P3 mostró la primer degradación a temperaturas de 24.36°C y 127.13 °C, generando una pérdida del 8.01 % de la muestra, a causa de la evaporación del agua ligada a la película, mientras que la segunda región presentó el mayor porcentaje de pérdida de materia correspondiente a 71.51 %, dicha descomposición se produce entre 200 y 362.22 °C , pérdidas que se atribuyen a la ruptura de enlaces covalentes entre el PVA y la celulosa y la tendencia de carbonización de los componentes orgánicos a temperaturas superiores a los 400 °C, la cuarta pérdida de masa se debe a la eliminación de todos los componentes lignocelulósicos presentes en los fragmentos de la celulosa añadida, dichas pérdidas se inician a una temperatura de 480.77 °C, y finalmente a una temperatura de 600 °C se generan alrededor de 6.43 % de cenizas menor cantidad en comparación con P1, debido a que el contenido de celulosa es de 0.75 g, es decir la celulosa desarrolla inestabilidad térmica por el aumento de residuos.

Figura 33

Termograma TGA de P3



Nota. Análisis de termogravimetría para la película en base a 5 g de PVA+ 0.5 g celulosa.

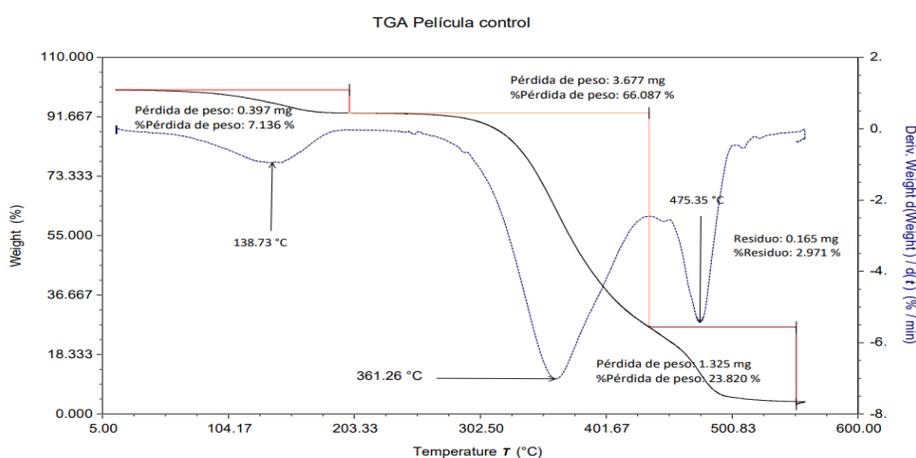
La Figura 34, representó el análisis termogravimétrico en la película de control, la cual contiene sólo 5 g PVA, es decir carece de celulosa, resulta que la primer pérdida de masa es de 7.13 % en rangos

de temperatura de 16 a 138.73 °C, debido a que el PVA posee carácter hidrofílico, lo que indica mayor estabilidad debido a que la deshidratación de la película tiende a generarse a mayor temperatura en comparación con P1 y P3, la zona entre 200 y 361.26 °C desarrolló una pérdida del 66.08 % de la materia, a causa de la eliminación de enlaces hidrógeno y la pérdida de las cadenas principales del polímero.

La descomposición de polisacáridos y aminoácidos se generaron a 400 °C, a diferencia de P1 y P3 los rangos en los que sucede la descomposición de grupos sulfatos generados en el proceso de acidificación de la celulosa empiezan a temperaturas tempranas, finalmente a temperaturas mayores a 400 °C se generó la carbonización de la muestra y la degradación del polieno y se obtuvieron alrededor de 2.97 % de cenizas, es decir presentó mayor estabilidad térmica en comparación con las muestras anteriormente analizadas.

Figura 34

Termograma TGA de la película de control



Nota. Análisis de termogravimetría para la película en base a 5 g de PVA

Tabla 36

Porcentajes de pérdida de masa en función de la temperatura

<i>Película</i>	ΔT °C	<i>Pérdida de masa %</i>	<i>Cenizas %</i>	<i>Descripción</i>
<i>P1</i>	30-100.34	0.0171		<i>Evaporación de agua</i>
	220-255.34	8.451		<i>Ruptura de enlaces hidrógeno</i>
	300-389.50	65.725	12.383	<i>Descomposición</i>
	450-513.67	13.145		<i>Volatilización</i>
<i>P3</i>	24.36-127.13	8.01		<i>Evaporación</i>
	200-362.22	71.51	6.43	<i>Descomposición</i>
	410-480.77	14.014		<i>Carbonización</i>
	16-138.73	7.13		<i>Absorción de agua</i>
<i>P control</i>	200-361.26	66.08	2.97	<i>Ruptura de cadenas</i>
	400-475.35	23.82		<i>Descomposición polisacáridos</i>

Nota. Descripción de las pérdidas de masa, según los rangos de temperatura.

Los datos de la tabla 36, referente a la pérdida de masa de las películas a base de PVA y celulosa reflejaron las primeras pérdidas de masa en un rango de temperaturas de 16-127.13 °C, generalmente las

mayores pérdidas de masa se generaron en rangos de 340 °C, mientras que la mayor cantidad de componentes lignocelulósicos se degradaron en rangos de 440-500°C según la bibliografía de (Cazón et al., 2020).

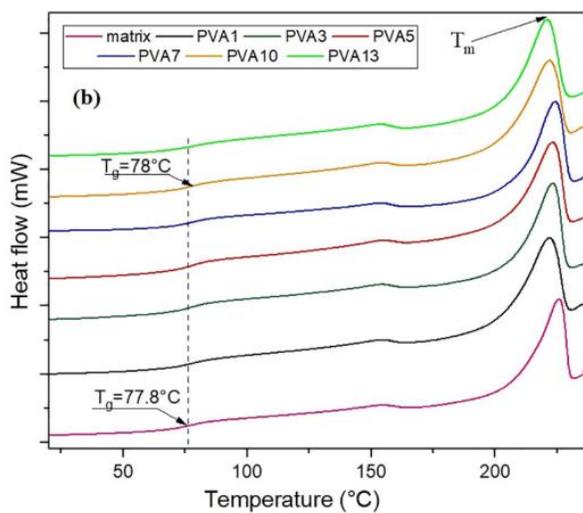
Según (Frag & Abdel, 2023) las películas con nano rellenos reflejan un primer pérdida de masa a temperaturas menores a 180 °C, la zona de inicio de degradación se genera en un rango de 222-238 °C, mientras la máxima está entre 322-329°C.

Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

La Figura 35, presenta el termograma típico, de películas de alcohol polivinílico, el cual reflejó una temperatura de transición vítrea entre 77.8-78°C, temperatura a la cuál la rigidez del polímero empieza a reducir. También presenta picos exotérmicos, referentes al máximo punto de fusión el cual se presenta alrededor de 250 °C, transformando el polímero sólido a líquido. En comparación con los termogramas de la Figura 36 y 37, los cuales presentaron un mayor ensanchamiento referente a la temperatura transición vítrea. La película P2 presenta un pico de transición vítrea a 105.6 °C, mientras que la película de control exhibió una temperatura de 95.52 °C, temperaturas mayores a las registradas por la película que contiene sólo PVA. Además los películas resultantes mostraron picos endotérmicos, presentando la temperatura de fusión.

Figura 35

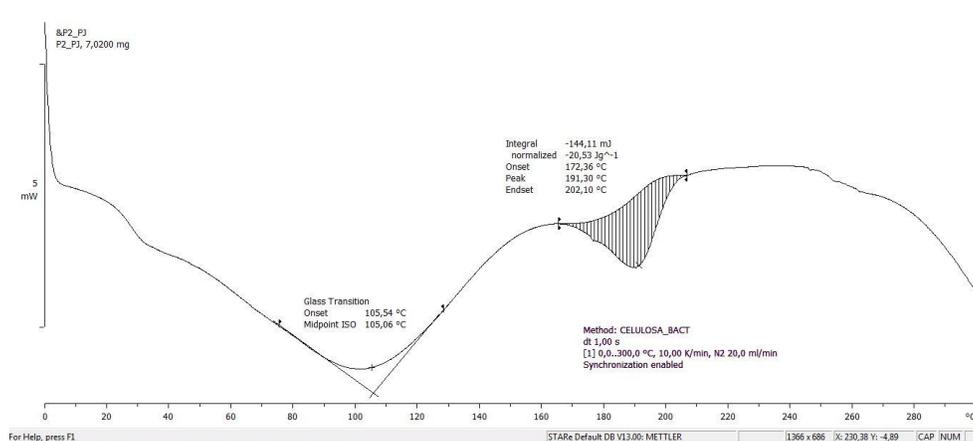
Termograma DSC de PVA



Nota. Temperatura de transición vítrea y máximo punto de fusión para PVA Tomado de Experimental Study of Polyvinyl Alcohol Nanocomposite Film Reinforced by Cellulose Nanofibers from Agave Cantala por (Yudhanto et al., 2021).

Figura 36

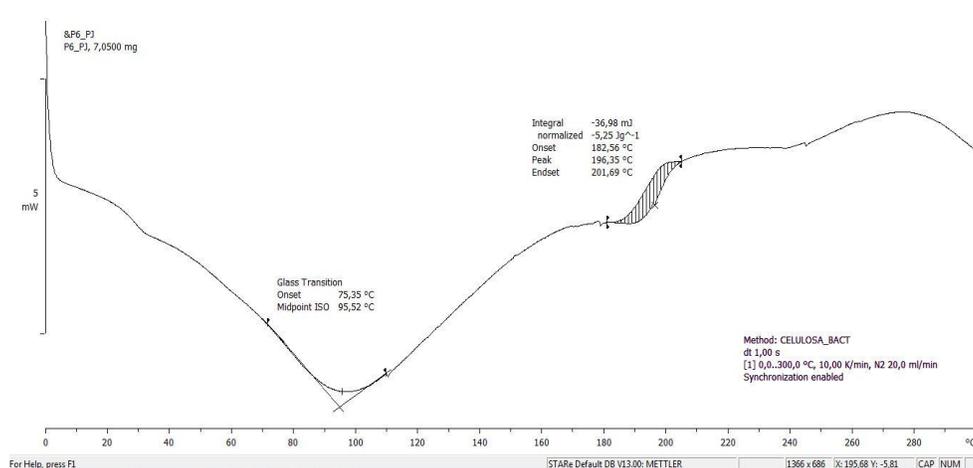
DSC película P2



Nota. La figura muestra los resultados del análisis DSC con respecto a la película 2.5 g PVA +0.5 g celulosa.

Figura 37

DSC película control



Nota. La figura muestra los resultados del análisis DSC con respecto a la película 2.5 g PVA +0.5 g celulosa + 1 g de Tara.

Según estudios, las películas formadas mediante nanocompositos llegan a presentar una T_g (77 ± 2) °C y T_m (227 ± 2) °C temperaturas similares a las del PVA puro, mientras que la adición de celulosa y tara genera un aumento en la temperatura de transición vítrea y una disminución de temperatura en la etapa de fusión, generando depreciación de cristalinidad (Kumar et al., 2020).

Análisis de FT-IR

La determinación estructural de las películas se realizó mediante la espectroscopia de infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR), técnica que admitió el análisis representativo de los grupos funcionales presentes en las muestras por la interacción entre el polímero PVA y la celulosa, además de la estructura molecular que presenta la adición de *Caesalpinia spinosa* a las películas, variable que

permitió evaluar los cambios debido a las interacciones de los componentes, también el análisis FTIR se realizó para los polvos correspondientes a lignina, hemicelulosa, celulosa y cenizas que se extrajeron previamente, con la finalidad de identificar los cambios característicos de las películas obtenidas bajo diseño y las películas de control.

En la Tabla 37, se muestra el valor de la onda de los picos generados por los espectros de las películas seleccionadas, además de la referencia de picos que generalmente se encuentra en este tipo de materiales, lo cual permitió la identificación de los grupos principales, en la lignina generalmente en el rango de 3328 cm^{-1} , se atribuye a grupos hidroxilo de estructuras fenólicas y alifática, a 2932 cm^{-1} , se presentan vibración -CH de grupo metoxilo y grupos como metilo y metileno, en la región de $1630\text{-}1418\text{ cm}^{-1}$, se identificó al grupo carbonilo y estiramiento C-O en grupos carboxilos y cetona, C=C en anillos aromáticos, naturaleza cíclica del éter y finalmente enlace glucosídico C-O-C como se reportó en la investigación de (Md Salim et al., 2021).

Los picos resultantes representados en la Tabla 37, se encuentran en el rango correspondiente a los encontrados en componente slignocelulósicos extraídos de la caña de azúcar, generalmente identificando al grupo hidroxilo presente en una banda entre 3340 cm^{-1} , grupo que representa glucosa presente generalmente en hemicelulosas, mientras que, en bandas entre 1510 cm^{-1} , se identificaron componentes aromáticos presentes en la lignina, además de la presencia de enlaces glucosídicos en bandas de $1038\text{-}1040\text{ cm}^{-1}$ (Da Silva Braga & Poletto, 2020).

Según estudios la celulosa tiende a presentar picos a 3450 cm^{-1} , pertenecientes a grupos hidroxilos, la celulosa extraída exhibe un pico a 3344 cm^{-1} , y grupos carbonilo en picos de 1650 cm^{-1} (Chen et al., 2018).

Tabla 37

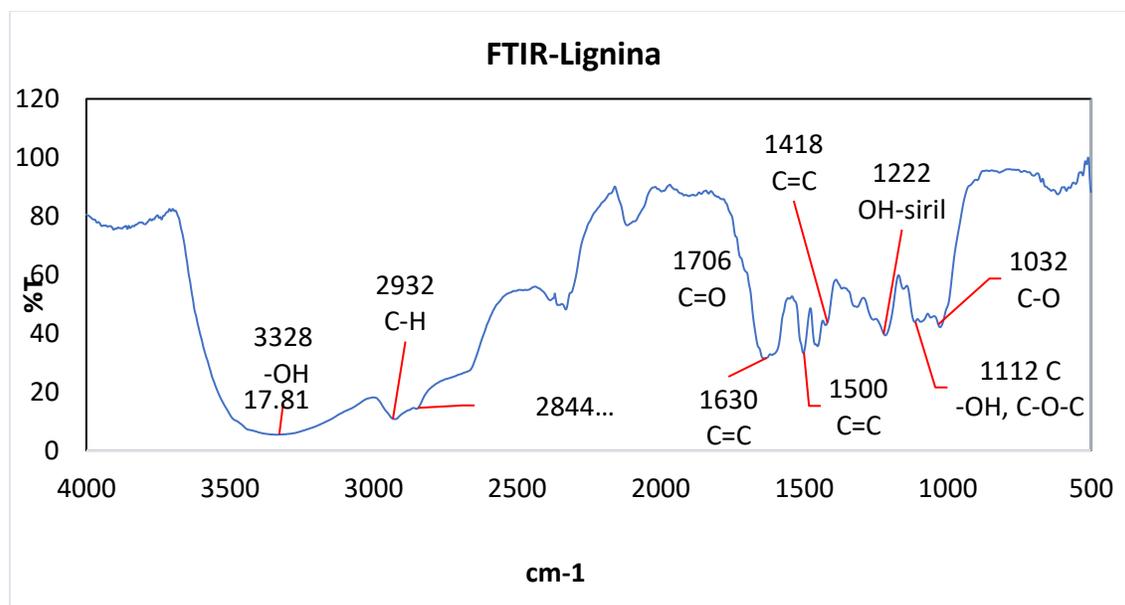
Grupos principales de la celulosa, hemicelulosa y lignina en función de la longitud de onda

Componente	Enlaces	Picos obtenidos cm^{-1}	Picos referenciales cm^{-1}	
Celulosa	-OH	3344	3334	
	=CH2	2904	-	
	C-H	2848	2919	
	-OH (H2O)	1632	1636	
	Cadenas aromáticas	1368-1376	-	
	=CH2, C-H	1422	1428	
	C-O-C	1026	1023	
	C-H	890	-	
	C-OH	656	-	
	Hemicelulosa	C-O-C	1038	-
		-CH3	1462	-
=CH2		1462	-	
C=O		1608	1716-1507	
C-O		1200	1234	
N-glicosídico		1558	1155	
Lignina	C=O	1706	1735	
	C=C	1500	1507	
	C-O	1222	1234	
	C-H	2932	-	

Nota. Comparación de picos obtenidos y picos referenciales por estudios de (Abdul Rahman et al., 2017), (Risite et al., 2022) y (Kumar et al., 2020).

Figura 37

Espectro FTIR de la lignina



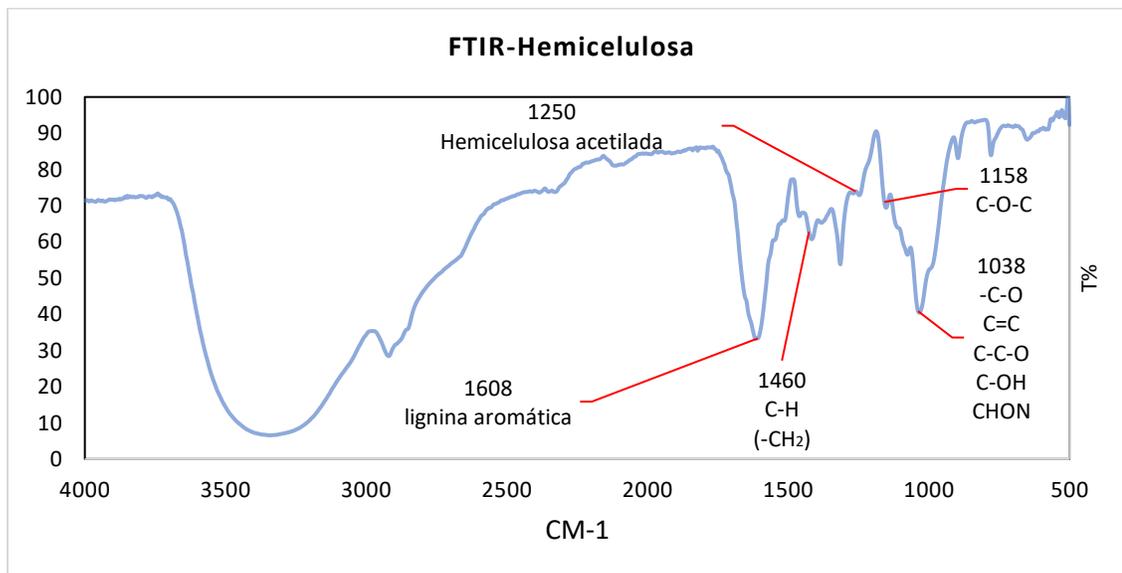
Nota. Identificación de grupos funcionales según FTIR para la lignina extraída del tallo de tomate.

Hemicelulosa

Los picos característicos de la hemicelulosa corresponden a bandas entre $1650-1600\text{ cm}^{-1}$, de modo que para una banda de 1600 cm^{-1} , se identificó lignina aromática, mientras que para picos de 1635 cm^{-1} , se observaron grupos carbonilo conjugados a anillos aromáticos, para una banda de 1462 cm^{-1} , los grupos característicos son el metilo y metileno, además se presentó hemicelulosa acetilada a un valor de 1250 cm^{-1} , también se presentan enlaces C-O débiles en longitud de onda entre $1250-1200\text{ cm}^{-1}$, finalmente en los rangos de $1160-1162\text{ cm}^{-1}$ se identifican enlaces glucosídico, finalmente en el rango de $1050-100\text{ cm}^{-1}$ se presentaron vibraciones entre los enlaces -C-O, C=C, además de la presencia de galactomanos, algunos de los picos descritos se observaron en la Figura 38.

Figura 38

Espectro FTIR de la hemicelulosa



Nota. Identificación de grupos funcionales según FTIR para la hemicelulosa extraída del tallo de tomate.

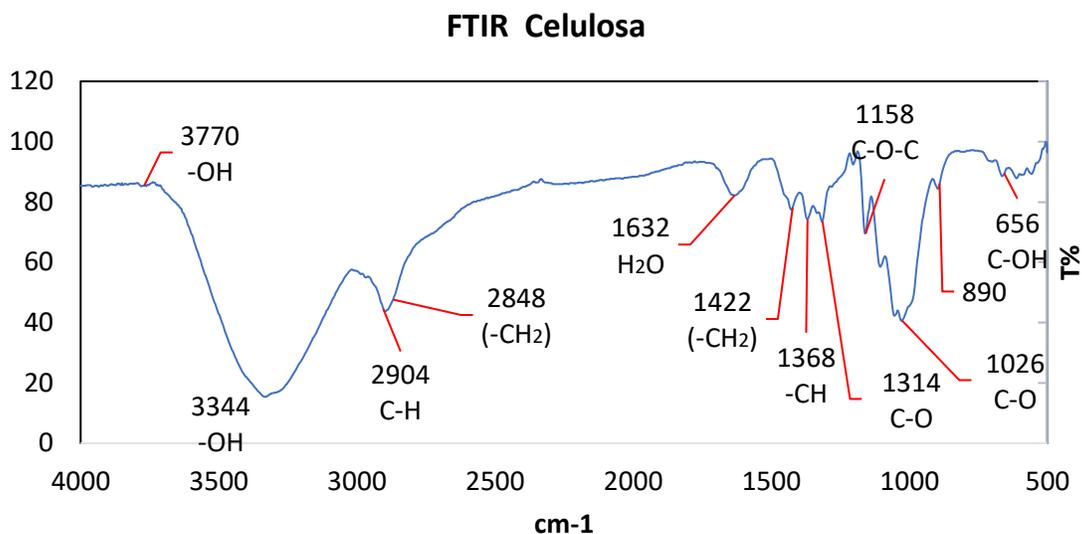
Celulosa

La Figura 39, indicó los picos principales que predominan en la celulosa en el rango de 3000-3750 cm^{-1} , generalmente se encuentran las vibraciones de los grupos hidroxilo, específicamente el pico de 3344 cm^{-1} se debe a los estiramientos del grupo hidroxilo en la alfa-celulosa, mientras que el pico de 2904 cm^{-1} se asignó a las celulosas amorfas en las cuales existen estiramientos C-H, mientras que para una onda de 2848 cm^{-1} se asoció a los grupos metileno presentes en la celulosa y hemicelulosa, también se observó un pico considerable de 1632 cm^{-1} , esta región representa el agua adsorbida por la materia, en los rangos de 1368-1376 cm^{-1} se presentaron picos representantes de cadenas aromáticas, mientras que para los picos entre 1422 y 1368 cm^{-1} se determinan grupos metileno y -CH pertenecientes a la celulosa, además de que los grupos C-O-C pertenecientes a la celulosa se observaron

en longitud de 1158 cm^{-1} , y los grupos C-H de la celulosa se identifican en la banda correspondiente a 890 cm^{-1} y finalmente grupos C-OH a una banda de 656 cm^{-1} (Md Salim et al., 2021).

Figura 39

Espectro FTIR de la celulosa



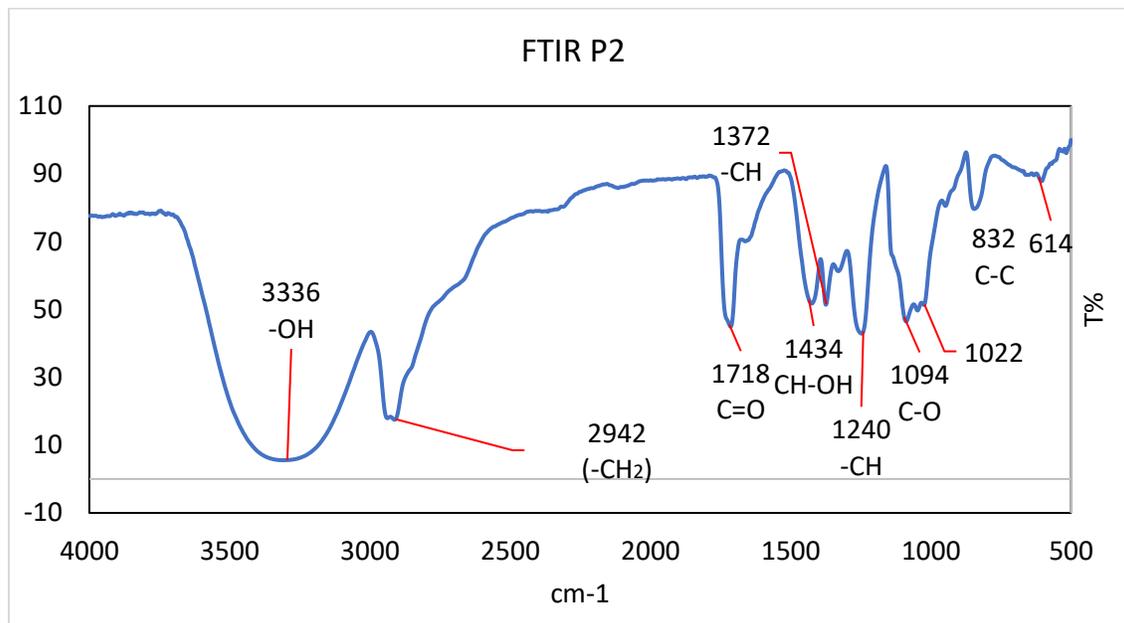
Nota. Identificación de grupos funcionales según FTIR para la celulosa extraída del tallo de tomate.

FTIR película

A través de la Figura 40, se pudo observar los picos principales, el pico a 3336 cm^{-1} representa la humedad absorbida, la cual se representa mediante enlaces hidroxilo, se verificó que la película contiene celulosa debido a la presencia del grupo C-H celulósico en la banda de 2918 cm^{-1} , también se observaron picos característicos de la lignina, la banda de 1718 cm^{-1} que generalmente representa al grupo aromático C=C en la celulosa, mientras que en el PVA representa al grupo acetilo, además se verificó la presencia de C-O del compuesto xiloglucano a una banda de 1240 cm^{-1} , al realizar la comparación de bandas entre la película de PVA puro y la película con celulosa, se determinó que las interacciones moleculares son compatibles, debido a la permanencia de la mayoría de los picos.

Figura 40

Espectro FTIR de la película P2



Nota. Identificación de grupos funcionales según FTIR para la película en base a 2.5 g PVA +0.5 g celulosa.

Tabla 38

Comparación de picos característicos

Enlaces	Picos referenciales de	Picos referenciales de	Picos obtenidos de
	Celulosa	PVA	P2
	cm-1	cm-1	cm-1
-OH	3344	3280	3336
=CH ₂	2904	2917	2918
C=O	-	1718	178

Enlaces	Picos referenciales de Celulosa cm-1	Picos referenciales de PVA cm-1	Picos obtenidos de P2 cm-1
H ₂ O	1632	-	-
Cadenas aromáticas	1368-1376	-	1372
=CH ₂ , C-H	1422-1368	1430	1434
	1158	-	-
C-O-C	1026	1081	1094
C-O	890	839	-
C-H	-	-	832
C-C	656	-	614
C-OH			

Nota. Picos característicos del PVA tomados de Structural, optical, opto-thermal and thermal properties of ZnS–PVA nanofluids synthesized through a radiolytic approach (p.531) por (Kharazmi et al., 2015)

Beilstein Journal Nanotechnology.

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Conforme los resultados recolectados por investigación bibliográfica acerca de los componentes útiles presentes en los residuos de la planta de tomate, la celulosa fue el material lignocelulósico en mayor proporción, generando un valor promedio de 40.71 %, mientras que para la hemicelulosa y la lignina los porcentajes promedio son 11.66 % y 8.74 % respectivamente.

El desarrollo del trabajo permitió identificar el aprovechamiento de los componentes en función de los tratamientos, usos y aplicaciones, después de su extracción, seleccionando a la celulosa como el componente principal a causa de ser la materia principal para ser usada como material de refuerzo y nanorelleno en películas poliméricas.

La selección de materia prima, seguido de tratamientos físicos y aplicación de procesos químicos como la hidrólisis ácida y básica, permitieron la extracción de celulosa, lignina y hemicelulosa con un rendimiento del 90.36 % referente a materia libre de extraíbles, mientras que el rendimiento general respecto a la materia prima inicial es de 22.33 %, lo que indicó una pérdida de 77.66 % de materia, a causa de los procesos de deshidratación en la primera fase, lavado, triturado y filtrado.

El análisis de espectroscopia por infrarrojo permitió evaluar los picos característicos de cada componente, observando las bandas típicas, en la celulosa se visibilizó el estiramiento de $-OH$ a 3344 cm^{-1} , el estiramiento de $-CH$ a 2094 y 2848 cm^{-1} ; mientras que a 890 cm^{-1} se observó estiramiento de $C-O-C$ de la celulosa presencia de enlaces glucosídicos, en la hemicelulosa se observa un pico a 1608 cm^{-1} referente a la presencia de lignina aromática y a una banda de 1250 cm^{-1} la presencia de hemicelulosa acetilada, finalmente el espectro de la lignina indica a grupos funcionales como OH de

grupos fenólicos, además grupos de metilo, metileno a 2932 cm^{-1} y anillos aromáticos en el rango de $1630\text{-}1418\text{ cm}^{-1}$.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos mediante análisis bibliográfico y experimental de los residuos, se optó por la elaboración de biopelículas a base de los componentes, el uso de la lignina en disolución permitió obtener películas de tonalidad oscura y de alta fragilidad, mientras que el bajo rendimiento de hemicelulosa impidió ser empleado en las biopelículas, por ello se selecciona a la celulosa como materia prima principal.

En cuanto al aprovechamiento de residuos como materia prima de valor agregado y contribución con el medio ambiente, se seleccionó al PVA y a la tara como posibles componentes biocompatibles y biodegradables con la celulosa en la formación de las películas como alternativa a plásticos sintéticos, aportando al buen uso de recursos y la preservación del medio ambiente.

Para la obtención de películas con buen aspecto y buenas características físicas y estructurales se empleó a la tara como componente aglutinante y al glicerol mejorando la elasticidad, sin embargo, estas modificaciones resultaron erróneas, debido a la presencia de espuma y a la no homogeneidad de las películas, además de fragilidad por la textura quebradiza.

El análisis de varianza para los procesos de extracción de cada componente permitió identificar los mejores tratamientos en base a la comparación de valores medios de pruebas físicas, mecánicas y estructurales, obteniendo películas de PVA y celulosa con buena solubilidad, resistencia a la tracción y buenas barreras de permeabilidad al vapor, inclusive se logró una mejor estética y homogeneidad, pudiendo ser empleadas en la fabricación de envases para alimentos de baja humedad.

Debido a que las películas presentaron solubilidad baja en componentes derivados de petróleo como la acetona y una estructura reticular por la celulosa, además de buena estabilidad térmica, se sometieron fragmentos de las películas en agua con petróleo, en dónde se observó la adhesión de los

compuestos al área superficial, lo que indicó una posible aplicación en el tratamiento de aguas contaminadas por componentes orgánicos.

Recomendaciones

- Se plantea realizar pruebas de adsorción en las películas con en compuestos orgánicos como el petróleo con la finalidad de analizar la eficiencia y retención de los compuestos en la superficie.
- Se propone emplear técnicas de ultrasonido para mejorar la homogeneización de la celulosa en la solución formadora de la película.
- Se recomienda realizar pruebas de degradación en el suelo y en el ambiente con la finalidad de probar la descomposición en los diferentes ambientes.
- Es aconsejable realizar pruebas de microscopía electrónica de barrido, con el objetivo de estudiar las características estructurales de la superficie formada por la celulosa y el PVA.

Bibliografía

- Aguiar, S., Uvidia, H., & Arboleda, L. (2021). Aprovechamiento de residuos agroindustriales como alternativa en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista de Investigación En Ciencias Agronómicas y Veterinarias*, 5(15), 649–660. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i15.145>
- Aguilar, E. (2021). Evaluación de la relación genotipo ambiente de seis cultivares de tomate (*Solanum Lycopersicum* L.) en el cantón Machala. In *Universidad Técnica de Machala*. Universidad Técnica de Machala.
- Ali, S., Elsamahy, T., Abdelkarim, E., Al-Tohamy, R., Kornaros, M., Ruiz, H. A., Zhao, T., Li, F., & Sun, J. (2022). Biowastes for biodegradable bioplastics production and end-of-life scenarios in circular bioeconomy and biorefinery concept. *Bioresource Technology*, 363, 127869. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127869>
- Amirah, N., Razali, M., Sohaimi, R. M., Nor, R., Raja, I., Abdullah, N., Zulaikha, S., Demon, N., Jasmani, L., Mohd, W., Wan, Z., Mohd, W., & Wan, H. (2022). Comparative Study on Extraction of Cellulose Fiber from Rice Straw Waste from Chemo-Mechanical and Pulping Method. *Polymers*, 14(3), 387. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/polym14030387>
- Aponte, G., & Soledad, B. (2022). Bioplásticos: Sustentabilidad Ambiental y Principales Tendencias. *TEKHNÉ*, 25(3), 88–100.
- Bascón, I., Espinosa, E., Sánchez, R., Tarrés, Q., Pérez, F., & Rodríguez, A. (2020). Horticultural plant residues as new source for lignocellulose nanofibers isolation: Application on the recycling paperboard process. *Molecules*, 25(14). <https://doi.org/10.3390/molecules25143275>
- Bermeo, A. (2021). *Evaluación del método químico con ácido sulfúrico para la extracción de goma de tara (Caesalpinia spinosa)*. Universidad Nacional de Loja.

Bonilla, A., Cobos, E., & Guamán, J. (2020). *Nuevos Aportes a la Economía* (1st ed.). Facultad de Economía PUCE.

Cabrera, E., & Chamba, K. (2022). *Evaluación de la efectividad de los solventes en la eliminación de extractivos y su relación con la caracterización química de bagazo de caña* [Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/37801>

CAF. (2021). *Caminos para la integración: Facilitación del comercio, infraestructura y cadenas globales de valor*.

Camarena, S., Martínez, J. H., Saldaña, A., Nuñez, H. G., Costilla, R., Valdez, I., Lovanli, N., & Ruiz, G. M. L. (2020). Effects of experimental parameters on methane production and volatile solids removal from tomato and pepper plant wastes. *BioResources*, *15*(3), 4763–4780. <https://doi.org/10.15376/biores.15.3.4763-4780>

Cazón, P., Velázquez, G., & Vázquez, M. (2020). Regenerated cellulose films combined with glycerol and polyvinyl alcohol: Effect of moisture content on the physical properties. *Food Hydrocolloids*, *103*, 105657. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105657>

Cevallos, K. (2018). *Universidad estatal del sur de Manabí*. Universidad Estatal del Sur de Manabí.

Chen, W., He, H., Zhu, H., Cheng, M., Li, Y., & Wang, S. (2018). Thermo-responsive cellulose-based material with switchable wettability for controllable oil/water separation. *Polymers*, *10*(6). <https://doi.org/10.3390/polym10060592>

Da Silva Braga, R., & Poletto, M. (2020). Preparation and Characterization of Hemicellulose Films from Sugarcane Bagasse. *Materials*, *13*(4). <https://doi.org/10.3390/ma13040941>

- Dhia, M. (2021). *Estudios de fuentes alternativas a la madera para la obtención de la celulosa*.
universidad Politécnica de Valencia.
- Echeverria, T. (2020). *Caracterización de películas poliméricas multi-capa y viabilidad de su reciclado en forma de mezclas de alta performance* [Universidad Nacional de Mar del Plata].
<http://rinfi.fi.mdp.edu.ar/bitstream/handle/123456789/483/TEcheverria-TFG-IM-2020.pdf?sequence=1&isAllowed=yhttps://www.astm.org/standards/e96>
- Farag, O., & Abdel, E. (2023). Synthesis and characterization PVA/plasma-functionalized MWCNTs nanocomposites films. *Journal of Polymer Research*, 30(5), 183. <https://doi.org/10.1007/s10965-023-03550-8>
- Fernández, J., Valls, C., Cusola, O., & Roncero, M. (2021). Improving Filmogenic and Barrier Properties of Nanocellulose Films by Addition of Biodegradable Plasticizers. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 9(29), 9647–9660. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c09109>
- Filian, W., Salinas, J., Arias, R., & Gómez, J. (2020). Evaluación físico-química de residuos agroindustriales para la alimentación animal. *Journal of Science and Research*, 5(1), 182–199.
<https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.4426474>
- Godoy, D., Daza La Plata, R., Fernández, L., Layza, A., Roque, R., Hidalgo, V., Gamarra, S., & Gómez, C. (2020). Caracterización del valor nutricional de los residuos agroindustriales para la alimentación de ganado vacuno en la región de San Martín, Perú. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 21(2), 1–14. https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num2_art:1374
- Guerrero, Y. (2021). *Extracción de la celulosa a partir de los residuos de pasto común (Festuca arundinacea) para la elaboración de acetato de celulosa* [Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21590>

- Huang, L.-Z., Ma, M.-G., Ji, X.-X., Choi, S.-E., & Si, C. (2021). Recent Developments and Applications of Hemicellulose From Wheat Straw: A Review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.690773>
- Inayati, I., Abdulloh, A., & Bagus R, Z. (2020). Fabrication of Bioplastic from Rice Straw. *Equilibrium Journal of Chemical Engineering*, 4(1), 17. <https://doi.org/10.20961/equilibrium.v4i1.43155>
- Kharazmi, A., Faraji, N., Hussin, R. M., Saion, E., Yunus, W. M. M., & Behzad, K. (2015). Structural, optical, opto-thermal and thermal properties of ZnS–PVA nanofluids synthesized through a radiolytic approach. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 6, 529–536. <https://doi.org/10.3762/bjnano.6.55>
- Kong, U., Mohammad Rawi, N. F., & Tay, G. S. (2023). The Potential Applications of Reinforced Bioplastics in Various Industries: A Review. *Polymers*, 15(10), 1–20. <https://doi.org/10.3390/polym15102399>
- Kumar, A., Singh Negi, Y., Choudhary, V., & Kant Bhardwaj, N. (2020). Characterization of Cellulose Nanocrystals Produced by Acid-Hydrolysis from Sugarcane Bagasse as Agro-Waste. *Journal of Materials Physics and Chemistry*, 2(1), 1–8. <https://doi.org/10.12691/jmpc-2-1-1>
- Liu, X., Wu, C., Su, D., Yang, Y., Xian, Z., Yu, C., Li, Z., Hao, Y., & Chen, R. (2021). The slhb8 acts as a negative regulator in stem development and lignin biosynthesis. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(24). <https://doi.org/10.3390/ijms222413343>
- Lizundia, E., Sipponen, M. H., Greca, L. G., Balakshin, M., Tardy, B. L., Rojas, O. J., & Puglia, D. (2021). Multifunctional lignin-based nanocomposites and nanohybrids. *Green Chemistry*, 23(18), 6698–6760. <https://doi.org/10.1039/d1gc01684a>

- López, A., Oré, R., & Miranda, C. (2020). Caesalpinia spinosa: protective effect against uv radiation in hepatic lipoperoxidation in rats and detection of phytoconstituents. *Rebiol*, *40*(1), 13–20.
<https://doi.org/10.17268/rebiol.2020.40.01.02>
- Lu, Y., He, Q., Fan, G., Cheng, Q., & Song, G. (2021). Extraction and modification of hemicellulose from lignocellulosic biomass: A review. *Green Processing and Synthesis*, *10*(1), 779–804.
<https://doi.org/doi:10.1515/gps-2021-0065>
- Ma, Q., Hu, D., Wang, H., & Wang, L. (2016). Tara gum edible film incorporated with oleic acid. *Food Hydrocolloids*, *56*, 127–133. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.11.033>
- Manríquez, A., Sierra, J., Muñoz, J., & Gabarrell, X. (2021). Identifying potential applications for residual biomass from urban agriculture through eco-ideation: Tomato stems from rooftop greenhouses. *Journal of Cleaner Production*, *295*, 126360.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126360>
- Mármol, J. (2022). *Descripción de los procesos existentes de la degradación de polímeros más utilizados, como también la biomasa disponible en el Ecuador*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Mautner, A. (2020). Nanocellulose water treatment membranes and filters: a review. *Polymer International*, *69*(9), 741–751. <https://doi.org/10.1002/pi.5993>
- Md Salim, R., Asik, J., & Sarjadi, M. S. (2021). Chemical functional groups of extractives, cellulose and lignin extracted from native *Leucaena leucocephala* bark. *Wood Science and Technology*, *55*(2), 295–313. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01258-2>
- Mendoza, S. (2021). Caracterización de residuos agroindustriales de algodón mediante espectrometría de emisión atómica de plasma por microondas. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, *47*(1), 71–75.

Mendoza, Y., Morales, P., Sánchez, J., & Patio, J. (2020). Componentes bioactivos del tomate y su posible poder antimicrobiano : estudio in vitro Bioactive Components of Tomato and their Possible Antimicrobial Power : An in vitro Study. *Revista Cubana de Medicina Natural y Tradicional*, 3(1), 1–15.

Ministerio del Ambiente y Agua del Ecuador. (2020). Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos municipales. In *Ministerio del Ambiente y Agua del Ecuador* (pp. 1–79). Centro de Artes Gráficas “El fuego y la palabra.”

Nanda, S., Patra, B. R., Patel, R., Bakos, J., & Dalai, A. K. (2022). Innovations in applications and prospects of bioplastics and biopolymers: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(1), 379–395.
<https://doi.org/10.1007/s10311-021-01334-4>

Ortega, G., Cevallos, K., Vera, R., Castro, C., Narváez, W., & Burgos, G. (2022). Evaluación y selección de híbridos de tomate *Solanum lycopersicum* L. (Mill.) en Puerto la Boca, Ecuador. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 10(1), 21–31. <https://doi.org/10.36610/j.jsab.2022.100100021>

Ortiz, B., González, R., Fernández, J., & García, V. (2021). Agricultura circular: una estrategia sostenible para impulsar el agro colombiano. *Revista Universidad de La Salle*, 1(87), 197–213.
<https://doi.org/10.19052/ruls.vol1.iss87.10>

Park, S., Oh, Y., Yun, J., Yoo, E., Jung, D., Park, K. S., Oh, K. K., & Lee, S. H. (2020). Characterization of blended cellulose/biopolymer films prepared using ionic liquid. *Cellulose*, 27(9), 5101–5119.
<https://doi.org/10.1007/s10570-020-03152-3>

Partanen, A., Carus, M., Piotrowski, S., Dammer, L., & Küppers, M. (2020). Bio-based products: Green premium prices and consumer perception of different biomass feedstocks. *Renewable Carbon*, 30.

- Peng, B., Yao, Z., Wang, X., Crombeen, M., Sweeney, D. G., & Tam, K. C. (2020). Cellulose-based materials in wastewater treatment of petroleum industry. *Green Energy & Environment*, 5(1), 37–49. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gee.2019.09.003>
- Pinto, E., Aggrey, W., Boakye, P., Amenuvor, G., Sokama, Y., Fokuo, M., Karimaie, H., Sarkodie, K., Adenutsi, C., Erzuah, S., & Dziedzorm, M. (2022). Cellulose processing from biomass and its derivatization into carboxymethylcellulose: A review. *Scientific African*, 15, e01078. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e01078>
- Rashwan, M., Naser, F., Abdel, H., Blaqueza, R., & Nagy, M. (2021). Maturity and stability assessment of composted tomato residues and chicken manure using a rotary drum bioreactor. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 71(5), 529–539. <https://doi.org/10.1080/10962247.2020.1859416>
- Rendón, J. R., Trujillo, C., Juárez, A., Toribio, J., García, S., & Solorza, J. (2020). The utilization of coconut wastes for bioplastic production. *Agricultural And Food Science*, 6(5), 20–29.
- Riera, M., Maldonado, S., & Palma, R. (2018). Agro-Industrial Residues Generated in Ecuador for the. *Ingeniería Industrial*, 17(3), 227–246. <https://doi.org/https://doi.org/10.22320/S07179103/2018.13>
- Risite, H., Salim, M. H., Oudinot, B. T., Ablouh, E., Joyeux, H. T., Sehaqui, H., Razafimahatratra, J. H. A., Qaiss, A. E. K., El Achaby, M., & Kassab, Z. (2022). Artemisia annua Stems a New Sustainable Source for Cellulosic Materials: Production and Characterization of Cellulose Microfibers and Nanocrystals. *Waste and Biomass Valorization*, 13(4), 2411–2423. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01658-w>

- Rojas, A., Flores, C., & López, D. (2019). Prospectivas de aprovechamiento de algunos residuos agroindustriales. *Revista Cubana de Química*, *31*, 30–52.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443558027003>
- Sadare, O. O., Yoro, K. O., Moothi, K., & Daramola, M. O. (2022). Lignocellulosic Biomass-Derived Nanocellulose Crystals as Fillers in Membranes for Water and Wastewater Treatment: A Review. *Membranes*, *12*(3). <https://doi.org/10.3390/membranes12030320>
- Sarria, R., Gallo, J., & Benítez, R. (2018). Condiciones óptimas de deslignificación del aserrín de Pinus patula como etapa crucial en la obtención de bioetanol. *Informador Técnico*, *82*(2), 160.
<https://doi.org/10.23850/22565035.1401>
- Silva, J., Peralta, W., & Medina, C. (2021). Agroindustrial Waste As Potential Source for Obtaining Nanocellulose. *The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M.*, *1*(2), 1033–1043.
<https://doi.org/10.18502/espoch.v1i2.9529>
- Skoczinski, P., Carus, M., Guzman, D. de, Käb, H., Chinthapalli, R., Ravenstijn, J., Baltus, W., & Raschka, A. (2021). Bio-based Building Blocks and Polymers – Global Capacities, Production and Trends 2020 – 2025. In *nova-Institute for Ecology and Innovation* (Issue January).
- Sonawane, J., Rai, A., Sharma, M., Tripathi, M., & Prasad, R. (2022). Microbial biofilms: Recent advances and progress in environmental bioremediation. *Science of The Total Environment*, *824*, 153843.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153843>
- Steven, S., Fauza, A. N., Mardiyati, Y., Santosa, S. P., & Shoimah, S. M. (2022). Facile Preparation of Cellulose Bioplastic from *Cladophora* sp. Algae via Hydrogel Method. *Polymers*, *14*(21).
<https://doi.org/10.3390/polym14214699>

- Szilágyi, Á., Bodor, A., Tolvai, N., Kovács, K. L., Bodai, L., Wirth, R., Bagi, Z., Szepesi, Á., Markó, V., Kakuk, B., Bounedjoum, N., & Rákhely, G. (2021). A comparative analysis of biogas production from tomato bio-waste in mesophilic batch and continuous anaerobic digestion systems. *PLOS ONE*, *16*(3), 1–17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248654>
- Taha, I., Elkafafy, M. S., & El Mously, H. (2018). Potential of utilizing tomato stalk as raw material for particleboards. *Ain Shams Engineering Journal*, *9*(4), 1457–1464. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.10.003>
- Tarique, J., Sapuan, S. M., & Khalina, A. (2021). Effect of glycerol plasticizer loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch biopolymers. *Scientific Reports*, *11*(1), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93094-y>
- Tepale, M. (2020). *Evaluación de dos especies leñosas de la Península de Yucatán como posibles Cultivos Dendroenergéticos*. Centro de Investigación Científica de Yucatán.
- Uribe, C., Acevedo, M. J., González, G., Redondo, R., Duque, G., & Peña, L. (2019). Ensayo de Tracción de Probetas Metálicas. ResearchGate, September. <https://www.researchgate.net/publication/331310495>
- Vallejo, F. (2021). Avances en la producción de líneas de tomate *Solanum lycopersicum* Mill. con resistencia genética al perforador del fruto *Neoleucinodes elegantalis* (Guenée 1854) (Lepidoptera: Crambidae). *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *45*(174), 136–146. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1205>
- Vallejos, M., & Area, M. (2019). *Nanocelia: Producción y usos de la celulosa nanofibrilada y microfibrilada* (M. Vallejos & M. Area, Eds.; 1ra ed.). Universidad Nacional de Misiones. Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales.

- Vargas, Y., Pazmiño, J., & Dávila, J. (2021). Potencial de Biomasa en América del Sur para la producción de bioplásticos: una revisión. *Revista Politécnica*, 48(2), 1–14.
- Vega, B., Carvajal, Y., Brenes, L., Gamboa, M., Venegas, J., Rodríguez, G., Jiménez, P., & Álvarez, V. (2022). Phytonutraceutical evaluation of five varieties of tomato (*Solanum lycopersicum*) during ripening and processing. *LWT*, 164, 113592.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113592>
- Viera, D. (2020). *Valorización de la actividad larvicida de extractos de solanina obtenidos a partir de residuos de Solanum lycopersicum L.* universidad Estatal Amazónica.
- Wang, Y., Gui, C., Wu, J., Gao, X., Huang, T., Cui, F., Liu, H., & Sethupathy, S. (2022). Spatio-Temporal Modification of Lignin Biosynthesis in Plants: A Promising Strategy for Lignocellulose Improvement and Lignin Valorization. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10.
<https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.917459>
- Whiteker, G. (2019). Applications of the 12 Principles of Green Chemistry in the Crop Protection Industry. *Organic Process Research and Development*, 23(10), 2109–2121.
<https://doi.org/10.1021/acs.oprd.9b00305>
- Xu, X., Long, Y., Li, Q., Li, D., Mao, D., Chen, X., & Chen, Y. (2019). Modified cellulose membrane with good durability for effective oil-in-water emulsion treatment. *Journal of Cleaner Production*, 211, 1463–1470. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.284>
- Yudhanto, F., Jamasri, Rochardjo, H. S. B., & Kusumaatmaja, A. (2021). Experimental study of polyvinyl alcohol nanocomposite film reinforced by cellulose nanofibers from agave cantala. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 34(4), 987–998.
<https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.04a.25>

Anexos