

Revisión prospectiva del aprovechamiento de fracciones lignocelulósicas residuales en la
obtención de biomateriales

María Paula Aguilar Ballesteros y Yuri Nathalya Jaimes Bermúdez

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Químico

Modalidad de investigación

Director

Debora Alcida Nabarlantz

Doctor en Ingeniera Química

Codirector

Rolando Andrés Acosta Fernández

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2022

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de grado a Dios y a mi madre que siempre estuvo presente dándome las fuerzas para nunca desfallecer. Ella quien de manera incansable siempre me motivó a salir adelante, me ha entregado lo más importante que alguien puede regalar, dedicación, comprensión y paciencia.

A ti madre que nunca dejaste de orar por mí, hoy quiero que sepas que eres la mujer que más admiro, hoy tus oraciones y esfuerzo dieron frutos.

Yuri Nathalya Jaimes Bermúdez

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por siempre acompañarme en este proceso y motivarme a luchar por mis sueños.

Agradezco a mi directora de tesis, la profesora Debora Nabarlatz y al Doctor Rolando Acosta por brindarme todos sus conocimientos y depositar su confianza en mí para realizar este proyecto, son una parte fundamental del mismo.

Yuri Nathalya Jaimes Bermúdez

Especialmente doy las gracias a mi familia por el apoyo que me brindo en el transcurso de toda mi carrera universitaria, por fortalecerme y por darme la motivación para culminar esta etapa.

Agradezco a la profesora Debora por su orientación, disposición y el acompañamiento que nos brindó en la realización de este proyecto.

María Paula Aguilar Ballesteros

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
1 ESTADO DEL ARTE	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo general	15
2.2 Objetivos específicos.....	15
3 DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA.....	16
3.1 Etapa de búsqueda.....	16
3.2 Organización y selección de la información	17
3.3 Síntesis y análisis de resultados	17
4 RESULTADOS	19
4.1 Hemicelulosa.....	19
4.1.1 Xilano.....	19
4.2 Tipos de residuos lignocelulósicos.....	20
4.3 Residuos lignocelulósicos en el departamento de Santander	22
4.4 Métodos de extracción de hemicelulosa para biomateriales	24
4.4.1 Extracción alcalina.....	24
4.4.2 Explosión de vapor	24
4.4.3 Extracción asistida por microondas	25
4.4.4 Parámetros de extracción y su efecto sobre el aislamiento de xilanos	25

4.5	Modificaciones químicas del xilano para la síntesis de biomateriales.....	30
4.6	Hidrogeles a partir de xilano	33
4.6.1	Métodos de síntesis	34
4.6.1.1	Polimerización por radicales libres	34
4.6.1.2	Redes Semi interpenetrantes	36
4.6.2	Proceso de síntesis de hidrogeles.....	36
4.6.3	Aplicaciones de hidrogeles de xilano	37
4.6.3.1	Biomedicina: sistemas de liberación de fármacos.....	37
4.6.3.2	Biomedicina: ingeniería de tejidos.....	38
4.6.3.3	Adsorción de colorantes y metales pesados	38
4.6.3.4	Hidrogeles para la sorción de gases	39
4.6.3.4.1	Hidrogeles infundados con aminas (AIHs).....	39
4.7	Películas a partir de xilano	40
4.7.1	Método de síntesis para películas: fundición por solvente	42
4.7.2	Aplicaciones de películas de xilano.....	43
4.7.2.1	Embalaje de alimentos	43
4.8	Desafíos en la obtención de hidrogeles y películas.....	44
5	CONCLUSIONES	46
	RECOMENDACIONES	48
	BIBLIOGRAFÍA.....	49
	APÉNDICES.....	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición lignocelulósica de varios tipos de biomasa reportados en la literatura.	22
Tabla 2. Composición lignocelulósica presente en residuos característicos del departamento de Santander.....	23
Tabla 3. Tipos de pretratamientos para la extracción de xilano, condiciones de operación y resultados de parámetros analizados	28
Tabla 4. Reacciones de modificación química para el xilano.....	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo de las etapas de la revisión bibliográfica.....	18
Figura 2. Categorización de residuos agroindustriales.	21
Figura 3. Esquema de reacción de la eterificación por carboximetilación de hemicelulosas..	30
Figura 4. Esquema de reacción de la esterificación de hemicelulosas	31
Figura 5. Etapas de la reacción de polimerización por radicales libres	35
Figura 6. Proceso de síntesis de un hidrogel.....	37

LISTA DE APÉNDICES

Apéndice A. Ecuaciones de búsqueda y resultados	69
Apéndice B. Cultivos permanentes y transitorios en el departamento de santander.....	70
Apéndice C. Resultados del análisis cuantitativo- hidrogeles a partir de xilano.....	72
Apéndice D. Resultados del análisis cuantitativo- películas a partir de xilano.....	75
Apéndice E. mezclas reportadas en la literatura para la síntesis de hidrogeles a partir de xilano	77
Apéndice F. Síntesis de hidrogeles de xilano	80
Apéndice G. Sistemas de liberación de fármacos estudiados utilizando hidrogeles obtenidos a partir de xilano	82
Apéndice H. Adsorción de colorantes y metales pesados estudiados utilizando hidrogeles obtenidos a partir de xilano	83
Apéndice I. Hidrogeles para la sorción de gases.....	84
Apéndice J. Mezclas y condiciones de operación para la síntesis de películas obtenidas a partir de xilano	85

RESUMEN

Título: Revisión prospectiva del aprovechamiento de fracciones lignocelulósicas residuales en la obtención de biomateriales

Autores: María Paula Aguilar Ballesteros – Yuri Nathalya Jaimes Bermúdez

Palabras claves: biomateriales, hemicelulosa, xilano, hidrogeles, películas

Descripción:

En Colombia se generan alrededor de 71.943.813 ton de biomasa residual cada año por lo que el aumento en el uso y la producción de materiales renovables a partir de ésta se ha convertido en una de las estrategias para el desarrollo sostenible de la sociedad moderna. La hemicelulosa, el segundo polisacárido más abundante de la biomasa lignocelulósica ha sido foco de diversas investigaciones en la búsqueda de su valorización. Con el propósito de establecer cuáles son los usos actuales de la hemicelulosa de tipo xilano para biomateriales, se realizó una revisión de la literatura que incluyó la revisión de 44 artículos que permitieron observar los avances en las siguientes áreas: métodos de extracción de la biomasa, aplicaciones y síntesis de materiales. Se estableció que existe una tendencia en los estudios sobre elaboración de biomateriales tales como hidrogeles y películas para biomedicina, adsorción de colorantes y metales pesados, y embalaje de alimentos. Además, se observó que a partir de residuos típicos del departamento de Santander como el pergamino de café y el bagazo de la caña panelera se puede extraer hemicelulosa compuesta mayormente por xilano y que para obtenerla la extracción alcalina es el método más predominante. La modificación química del xilano se establece como una alternativa para mejorar las propiedades del biomaterial, mientras que la polimerización por radicales libres y el método de fundición por solvente son las rutas más sobresalientes para la síntesis de biomateriales.

ABSTRACT

Title: Prospective review of the use of residual lignocellulosic fractions to obtain biomaterials.

Authors: María Paula Aguilar Ballesteros - Yuri Nathalya Jaimes Bermúdez

Keywords: biomaterials, hemicellulose, xylan, hydrogels, films

Description:

In Colombia, about 71,943,813 tons of residual biomass are generated each year, so the increase in the use and production of renewable materials from it has become one of the strategies for the sustainable development of modern society. Hemicellulose, the second most abundant polysaccharide of lignocellulosic biomass, has been the focus of several investigations in the search for its valorization. In order to establish which are the current uses of xylan-type hemicellulose for biomaterials, a literature review was carried out that included the review of 44 articles that allowed observing the advances in the following areas: biomass extraction methods, applications and synthesis of materials. It was established that there is a trend in studies on the elaboration of biomaterials such as hydrogels and films for biomedicine, adsorption of dyes and heavy metals, and food packaging. In addition, it was observed that hemicellulose composed mainly of xylan can be extracted from typical waste from the department of Santander, such as coffee parchment and bagasse from sugarcane, and that alkaline extraction is the most predominant method to obtain it. The chemical modification of xylan is established as an alternative to improve the properties of the biomaterial, while free radical polymerization and the solvent casting method are the most outstanding routes for the synthesis of biomaterials.

INTRODUCCIÓN

Colombia es un país que se destaca por su actividad económica en el sector agrícola, alcanzando una producción de 32,6 millones de toneladas en el 2018 (Minagricultura, 2019). El departamento de Santander cuenta con un área de 507 mil hectáreas destinadas a la agricultura (CÁMARA DE COMERCIO DE BUCARAMANGA, 2018), por lo que genera una gran cantidad de residuos principalmente del sector agroindustrial. Cultivos como palma de aceite, caña panelera, cacao y café han sido ya estudiados por sus beneficios en la generación de residuos lignocelulósicos y fácil acceso (Sanabria, 2016). Como ejemplo, se generan alrededor de 457.841 y 368.297 ton respectivamente de residuos como el bagazo de la caña panelera y el raquis de la palma de aceite (Agronet, 2019; Escalante et al., 2010).

La biomasa lignocelulósica ha sido de gran interés debido a que constituye la fuente renovable más abundante y económica disponible en la tierra (Qian, 2013). Está constituida por celulosa entre el 30-50% p/p, hemicelulosa entre el 15-35% p/p y lignina entre el 10-15% p/p (Naidu et al., 2018).

En el marco del proyecto 1881, titulado “Valorización de residuos agroindustriales para la producción de oligosacáridos con potencial prebiótico”, financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander, y desarrollado por el grupo INTERFASE, se han realizado diferentes investigaciones en torno a la extracción de hemicelulosas para la producción de xilooligosacáridos (XOs) mediante tratamientos de autohidrólisis y su posterior purificación y secado (Sandoval & Viviescas, 2017; Guerrero Serrano, 2018; Chacón & Herrera, 2018; Acosta, Sanabria, et al., 2018; Hernández, 2019; Acosta, 2019; Cobos, 2021). Los XOs se consideran compuestos con potencial prebiótico debido a sus múltiples beneficios para la salud, dado que se caracterizan por su actividad

biológica y antioxidante, acciones antibacterianas y mejoras en la función intestinal y el sistema inmunológico (C. Aragon et al., 2018).

Dentro de estas investigaciones se incluyó una evaluación del potencial de los principales residuos lignocelulósicos del departamento de Santander para la producción de oligosacáridos no digeribles, para posteriormente centrar los estudios en materias primas como la cadena agroindustrial del café (Leal, 2017) y el bagazo de caña panelera (Quintero & Riaño, 2019).

En este sentido y con el fin de avanzar aún más en esta investigación surge la necesidad de indagar acerca de nuevas alternativas de aprovechamiento de estos residuos y de los polisacáridos que se generan, por lo cual se plantea una revisión bibliográfica para la producción de biomateriales como hidrogeles y películas a partir de estos materiales lignocelulósicos.

1 ESTADO DEL ARTE

Si bien los biomateriales inicialmente solo obtuvieron atención en aplicaciones médicas, sus propiedades han provocado una utilización más amplia en la industria, especialmente en lo que respecta a la sostenibilidad y la protección del medio ambiente.

Entre los diversos tipos de biomateriales, los hidrogeles han sido ampliamente estudiados debido a sus propiedades únicas permitiéndoles ganar una gran participación en diferentes aplicaciones (Madduma-Bandarage & Madihally, 2021) utilizándose en sistemas de administración de fármacos, ingeniería de tejidos, biosensores, vendaje para heridas, aditivos alimentarios, sorción de gases, colorantes y metales pesados e incluso en aplicaciones electrónicas para la fabricación de supercapacitores (Bahram et al., 2016; Ahmed, 2015). El campo de la biomedicina ha logrado establecer este tipo de biomaterial a nivel comercial. Por ejemplo, se han presentado apósitos para úlceras, heridas posquirúrgicas y abrasiones los cuales actúan como “donantes de humedad” para promover la cicatrización, además de inducir el crecimiento de las células epiteliales (Aswathy et al., 2020).

La sorción de gases principalmente de CO₂ es una de las aplicaciones más recientes y ha surgido como una alternativa a los inconvenientes que generalmente presentan los procesos convencionales utilizando soluciones acuosas de aminas, que son el alto consumo de energía y la corrosión de los equipos (Yue et al., 2014). En su mayoría se ha informado de hidrogeles infundidos con aminas, formados añadiendo soluciones de aminas como la DEA, MEA, entre otras en hidrogeles comerciales (Xu et al., 2018).

Los hidrogeles producidos a base de polímeros sintéticos se destacan por su resistencia mecánica, convirtiéndolos en materiales con una tasa de degradación más lenta pero mayor durabilidad (Ahmed, 2015); dentro de éstos se incluyen la poliacrilamida (PAM), alcohol polivinílico (PVA), polietilenglicol (PEG) entre otros. Por otro lado, los hidrogeles producidos

a partir de polímeros naturales se caracterizan por su biodegradabilidad y abundancia, pero sin embargo tienen deficientes propiedades mecánicas (Kondiah et al., 2020). La carboximetilcelulosa, el alginato, el colágeno, el quitosano, la gelatina son algunos de los ejemplos de este tipo de polímeros.

Por otro lado, las películas, materiales delgados y continuos que presentan un grosor de hasta 200 μm han encontrado aplicaciones en el envasado, bolsas, etiquetas tanto en la industria automotriz y eléctrica (Drobny, 2020). En el campo de la medicina, han sido utilizadas para la liberación localizada en el colon de ácido 5-aminosalicílico (5-ASA) por medio de cápsulas recubiertas de una película de Nutriose (derivado del almidón) y etilcelulosa, que se adaptan a las condiciones del sitio de destino como el pH y la microflora (Karrout et al., 2009).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Revisar de forma prospectiva el aprovechamiento de xilanos presentes en fracciones lignocelulósicas residuales para la obtención de biomateriales.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar los diferentes tipos de biomateriales que se pueden producir a partir de xilanos extraídos de diferentes residuos lignocelulósicos y sus respectivas aplicaciones.
- Identificar las fracciones lignocelulósicas que se pueden aprovechar a partir de residuos agroindustriales típicos de la región de Santander, y las técnicas adecuadas de pretratamiento descritas en la literatura para la producción de biomateriales
- Determinar las rutas de síntesis para la producción de diferentes tipos de biomateriales a partir de xilanos extraídos de recursos lignocelulósicos.

3 DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

3.1 Etapa de búsqueda

Para la búsqueda de la información se utilizaron diferentes bases de datos incluyendo Google Académico, Web of Science y Scopus, la cual se centró en 3 tópicos principales: i) biomateriales fabricados a base de hemicelulosa y su aplicación, ii) materia prima y métodos de extracción de la hemicelulosa y iii) síntesis de biomateriales a base de hemicelulosa. La recopilación de datos se estableció para un periodo de tiempo 2010-2021. Las ecuaciones de búsqueda utilizadas se presentan en el Apéndice A con los respectivos resultados. Se encontraron 1056 artículos los cuales se sometieron a filtros de selección con el objetivo de eliminar aquellos que no tengan relevancia para el trabajo, los cuales se detallan a continuación:

- Filtro por título: se consideraron dos relaciones de términos presentes en el título: i) que se mencionara el tipo de biomaterial a estudiar y la hemicelulosa de tipo xilano para su síntesis y ii) que se mencionara el método de extracción o residuo lignocelulósico y la hemicelulosa como componente a extraer.
- Filtro por resumen: para este filtro se seleccionaron los estudios en los cuales se discutiera acerca de las propiedades del biomaterial o los resultados de la aplicación, además de que se mencionara el método de síntesis y los componentes utilizados. Para los artículos enfocados en la extracción se tuvo en cuenta que el resumen expresara un análisis de las condiciones de operación y las propiedades del xilano.
- Filtro por biomaterial: dado que al revisar el resumen de los artículos se encontró que en la mayoría los hidrogeles y las películas eran el biomaterial de estudio, se realizó un filtro seleccionando solo estas dos clases.

- Filtro por aplicación: finalmente se realizó un filtro por el tipo de aplicación ya que se encontró que la mayoría de artículos estaban enfocados en biomedicina y adsorción de colorantes y metales pesados para hidrogeles y embalaje de alimentos para películas.

Adicionalmente se realizó un análisis cuantitativo (ver Apéndice C) con la ayuda de la herramienta Lens.org que permitiera observar las tendencias de publicaciones por año, país, autor y aplicación de los biomateriales a partir de hemicelulosa de tipo xilano.

3.2 Organización y selección de la información

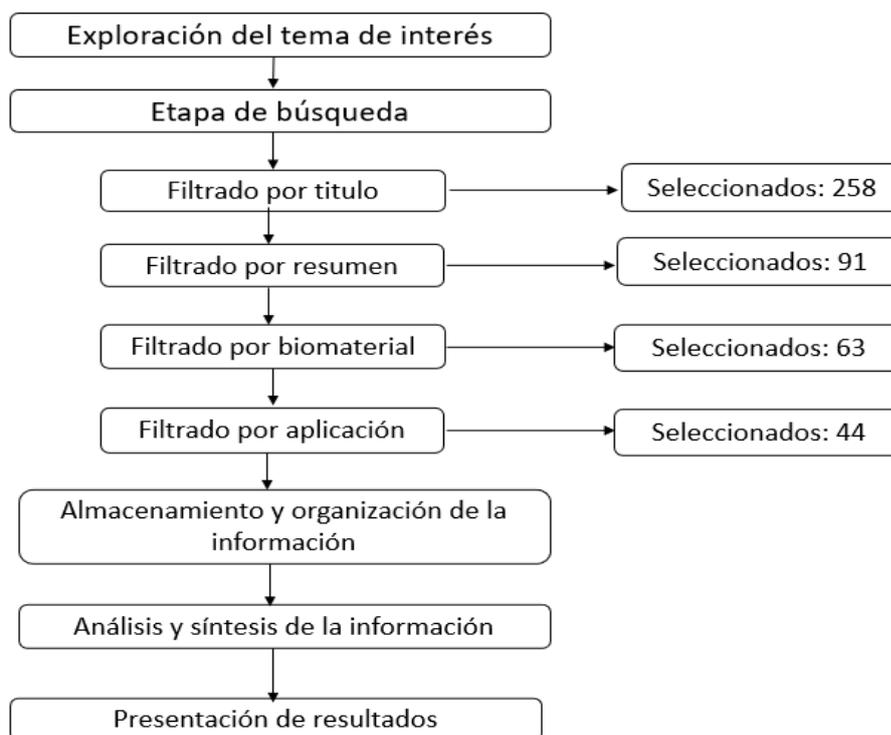
La información de cada documento se condensó en matrices designadas para cada uno de los objetivos de la revisión. Por ejemplo, para los biomateriales se consideraron como importantes los datos de las mezclas de xilano con otros componentes, sus propiedades, el tipo de aplicación, los resultados de pruebas y ensayos del material. En el caso de los métodos de extracción y síntesis, se tuvieron en cuenta las condiciones del proceso, el rendimiento de extracción y la fracción lignocelulósica aislada.

3.3 Síntesis y análisis de resultados

En esta etapa se realizó un análisis completo de la información recopilada. En una primera instancia se identificaron las materias primas para la obtención de xilano, y de acuerdo a su composición lignocelulósica se compararon con las procedentes de la región de Santander. En segundo lugar, se determinaron los principales componentes y propiedades de un hidrogel y una película, seguido de un análisis de la relación que existe entre estos y sus respectivos efectos. Además, con base en las aplicaciones se analizaron cuáles eran los principales desafíos en la síntesis de un biomaterial para asegurar buenos resultados en las etapas de prueba. Finalmente se realizó la escritura de los resultados encontrados en el informe que se presenta a continuación.

Figura 1

Diagrama de flujo de las etapas de la revisión bibliográfica



4 RESULTADOS

La biomasa lignocelulósica es el tipo de materia orgánica más abundante del planeta con excelente potencial para su transformación en biomateriales, químicos y biocombustibles (Bhatia et al., 2019). Este material biológico es un subproducto residual de las actividades industriales como la silvicultura, fabricación de papel, cosecha, poscosecha, y procesamiento (exprimido, pelado, molido, etc.) de frutas, cereales y verduras para producción de alimentos. Las paredes celulares de esta biomasa se componen principalmente de tres polímeros, celulosa, hemicelulosa y lignina (Afanasjeva et al., 2017).

4.1 Hemicelulosa

La hemicelulosa es un polímero no lineal de pentosas, hexosas y ácidos gluco y galacturónico (Bhatia et al., 2019). Las proporciones en las que se encuentra pueden variar en las plantas, sin embargo, la hemicelulosa constituye aproximadamente entre el 15 y 35 % p/p de la biomasa total, siendo el segundo componente más abundante después de la celulosa. Los principales monosacáridos que la conforman son xilosa, manosa, glucosa, galactosa, arabinosa, ácido glucurónico, ácido 4-O-metilglucurónico y ácido galacturónico (Zumárraga J., 2012). Las hemicelulosas más abundantes se clasifican en: xilanos, xiloglucanos y mananos.

4.1.1 Xilano

Es el tipo de hemicelulosa más abundante, su estructura tiene una columna lineal de residuos de xilosa con enlaces β - (1 \rightarrow 4) (Scheller & Ulvskov, 2010) que puede tener ramificaciones cortas y grupos sustituyentes lo que conlleva a una subcategorización del xilano como: glucuronoxilanos (GX), (arabino) glucuronoxilanos (AGX), arabinoxilanos (AX) y glucuronoarabinoxilanos (GAX). El número de unidades de xilosa puede variar en la molécula

de xilano, dando origen a diferentes grados de polimerización, donde por lo general el xilano presenta grados de polimerización de hasta 200 unidades (Brienzo et al., 2016). Dentro de las fuentes más abundantes de xilanos se incluyen el bagazo de caña de azúcar, tallos y tusas de maíz, así como productos de desecho forestal tales como maderas duras donde se encuentran xilanos acetilados y un pequeño porcentaje de mananos (Matavire, 2018).

Arabinoxilanos: es el polisacárido predominante en la familia de plantas gramíneas como el sorgo, cebada, arroz, trigo, entre otros. La columna de residuos de xilosa se encuentra sustituida con residuos de arabinosa en la posición C(O)-2 y/o C(O)-3 (Butardo & Sreenivasulu, 2016).

Arabinoglucuronoxilanos: la arabinofuranosa y el ácido glucurónico están unidos en las posiciones C(O)-2 y C(O)-3 de la columna vertebral de la xilosa (Naidu et al., 2018).

Glucuronoxilanos: es el principal polisacárido de hemicelulosa de la madera dura que representa del 15 al 30% en peso. Tiene una columna de xilano unida a un ácido 4-O-metilglucurónico y ácido glucurónico como grupos laterales primarios unidos en la posición 2 de las unidades de xilosa (Zhou et al., 2016).

Glucuronoarabinoxilanos: es el principal polisacárido de las hemicelulosas no leñosas, presenta una columna vertebral de arabinoxilano sustituida por ácido 4-O-metilglucurónico. Se caracteriza por la mayor cantidad de unidades de arabinosa presentes, siendo esta diez veces mayor en número que los residuos de ácido urónico (G.-Q. Fu et al., 2019).

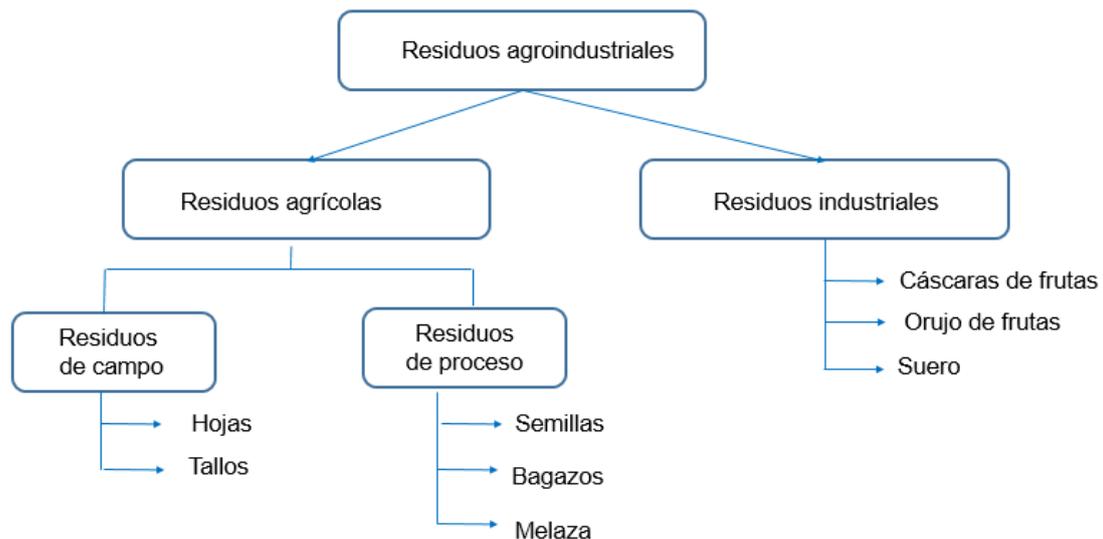
4.2 Tipos de residuos lignocelulósicos

La materia prima que se explota actualmente para la obtención de la hemicelulosa se puede clasificar en 2 categorías: i) residuos agroindustriales (agrícolas e industriales) tales

como semillas, cáscaras y pulpas (Figura 1) (Brodin et al., 2017) y ii) residuos forestales, los cuales comprenden maderas, astillas de madera, ramas de madera, aserrín de madera, etc (Philippini et al., 2020).

Figura 2

Categorización de residuos agroindustriales.



Nota. Adaptado de “Agroindustrywastes: biofuels and biomaterials feedstocks for sustainable rural development” por Hiloidhari et al., 2020, *Refining Biomass Residues for Sustainable Energy and Bioproducts*, 357-388.

Existen varios ejemplos disponibles en la literatura sobre la composición química de los polisacáridos en los residuos previamente mencionados. En la Tabla 1 se presentan algunos de los más estudiados como es el aserrín de abeto, con una composición aproximada de hemicelulosa de 22,9% p/p, paja de trigo con composiciones que varían desde el 23 al 36% p/p y la tusa de maíz con un porcentaje entre 28 y 36% p/p (Moncada & Castro, 2016).

Tabla 1*Composición lignocelulósica de varios tipos de biomasa reportados en la literatura.*

Residuo	Celulosa [%p/p]	Hemicelulosa [%p/p]	Lignina [%p/p]	Otros [%p/p]	Referencia
Bagazo de caña de azúcar	36	28	20	16	(Moncada & Castro, 2016)
	30,2	56,7	13,4	1,9	(Hiloidhari et al., 2020)
Paja de maíz	36	28	29	7	(Moncada & Castro, 2016)
Tusa de maíz	36	28	0	36	(Moncada & Castro, 2016)
	33,7–41,2	31,9–36	6,1–15,9	-	(Naidu et al., 2018)
Paja de trigo	39	36	10	15	(Moncada & Castro, 2016)
	35–39	23–30	12–16	-	(Naidu et al., 2018)
Paja de arroz	33	26	7	34	(Moncada & Castro, 2016)
	39,2	23,5	36,1	12,4	(Hiloidhari et al., 2020)
	29,2–34,7	23–25,9	17–19	-	(Naidu et al., 2018)
Aserrín	45,1	28,1	24,2	1,2	(Moncada & Castro, 2016)
Madera de abeto	45,5	22,9	27,9	-	(Naidu et al., 2018)
Madera de pino	44	26	29	1	(Moncada & Castro, 2016)
	42,0–50	24–27	20	-	(Naidu et al., 2018)
Madera de álamo	50,8–53,3	26,2–28,7	15,5–16,3	-	(Naidu et al., 2018)
Madera de roble	40,4	35,9	24,1	-	(Naidu et al., 2018)

4.3 Residuos lignocelulósicos en el departamento de Santander

La actividad agrícola cumple un papel importante para la economía y el desarrollo del departamento de Santander y del país. Santander cuenta con un área destinada a la agricultura de 507 mil hectáreas (superficie que equivale al 26,1% del total del territorio departamental), de la cual el 92% está cultivada (CÁMARA DE COMERCIO DE BUCARAMANGA, 2018). En el departamento se destacan como principales elementos de producción agrícola la palma de aceite, cacao, café, caña panelera, aguacate, los cítricos como el limón, mandarina y naranja. Entre otros productos agrícolas de importancia considerados como cultivos transitorios se

encuentran cebolla (bulbo y rama), yuca, maíz (amarillo, blanco), frijol, arveja, papa y tabaco rubio (ver Apéndice B).

La caracterización química de los residuos generados de algunos de los cultivos previamente mencionados fue realizada en el estudio “*Caracterización de biomasa residual agrícola para la evaluación de su uso como materia prima en la producción de oligosacáridos*” por Sanabria, (2016). En este estudio se seleccionaron 10 residuos en base a factores como la producción total agrícola, el área cultivada, la generación de residuos lignocelulósicos y facilidad de acceso; en la Tabla 2 se muestran los que presentaron mayor contenido de hemicelulosa: semilla de aguacate, tallos de tabaco, bagazo de caña panelera, borra de café, pergamino de café y raquis de palma.

Tabla 2

Composición lignocelulósica presente en residuos característicos del departamento de Santander.

Residuo lignocelulósico	Generación residuo [ton]	Celulosa [%p/p]	Hemicelulosa [%p/p]	Lignina [%p/p]	Referencia
Semillas de aguacate	14.865,75	14,20	41,04	12,35	(Sánchez et al., 2017)
Tallos de tabaco	8.343	34,54	35,91	18,67	(Acosta, Sanabria, et al., 2018)
Bagazo de caña panelera	457.841,45	36,72	33,53	16,02	(Escalante et al., 2010)
Borra de café	5.279,9	18,29	31,15	14,95	(Sanabria, 2016)
Pergamino de café	6.335,88	48,70	22,82	29,29	(Manals-Cutiño et al., 2018)
Raquis de palma	368.297	29,85	29,79	13,11	(Escalante et al., 2010)

Si bien cada uno de estos residuos presentan contenidos de hemicelulosa altos en comparación con los reportados en la literatura (Tabla 1), Sanabria, (2016) encontró que la hemicelulosa presente en la borra de café y la semilla de aguacate contienen 0% p/p y 3,06%

p/p respectivamente de xilosa, por lo cual es clave resaltar que, aunque el contenido de hemicelulosa de un residuo es alto es importante conocer la composición de este azúcar para evaluar su potencial para la producción de biomateriales a partir de xilano.

4.4 Métodos de extracción de hemicelulosa para biomateriales

La hemicelulosa está unida a la celulosa a través de enlaces puente de hidrógeno y a la lignina a través de enlaces covalentes de tipo éster y éter (Jin et al., 2019). Para la extracción de fracciones lignocelulósicas ricas en xilano polimérico se requiere aislar la hemicelulosa de los demás componentes de la biomasa con métodos que permitan obtener fracciones de cadena larga con alto peso molecular. Dentro de estos métodos se incluyen la extracción alcalina, explosión de vapor y extracción asistida por microondas.

4.4.1 Extracción alcalina

Es un método eficaz para la obtención de hemicelulosa de tipo xilano (Svärd et al., 2015). Durante este tratamiento la pared celular se hincha y los enlaces de hidrógeno y éster se escinden abriendo así la estructura de la matriz lignocelulósica (Flórez et al., 2018). Además, debido a las condiciones básicas del medio se genera la saponificación de los grupos acetilo.

Para este proceso se utilizan diferentes álcalis acuosos pero debido a su alto rendimiento y a su popularidad los más utilizados son NaOH y KOH (G.-Q. Fu et al., 2019). Además, este proceso suele contar con una etapa previa que consiste en la deslignificación con clorito de sodio acidificado con ácido acético glacial para la obtención de holocelulosa (Chadni, Bals, et al., 2019).

4.4.2 Explosión de vapor

Se basa en dos etapas que involucran tanto métodos físicos como químicos. En una primera etapa se hace pasar vapor a alta presión y temperatura a través de la matriz

lignocelulósica, el cual posteriormente se condensa hidrolizando la hemicelulosa. En una segunda etapa se despresuriza el sistema causando una degradación rápida del material (Chadni, Grimi, et al., 2019; Sabiha-Hanim et al., 2015).

Dentro de los inconvenientes de este proceso se encuentra la producción de oligómeros y monómeros debido a la degradación del polímero provocada por las fuertes condiciones de operación (G.-Q. Fu et al., 2019).

4.4.3 Extracción asistida por microondas

Es una alternativa a los métodos convencionales ya que utiliza un mecanismo de calentamiento que permite entregar de forma directa la energía de las microondas al material (Chadni, Bals, et al., 2019; S. Panthapulakkal et al., 2014).

Dentro de sus ventajas se ha reportado su bajo costo y altas tasas de extracción. Asimismo, puede evitar la degradación de la hemicelulosa producida generalmente en la extracción alcalina ya que los mecanismos de transferencia de energía (conducción, convección y radiación) utilizados requieren de un tiempo de exposición más largo en comparación con la irradiación por microondas (S. Panthapulakkal et al., 2014).

4.4.4 Parámetros de extracción y su efecto sobre el aislamiento de xilanos

El tiempo, la temperatura y el pH del medio de extracción son los parámetros más influyentes en el proceso de extracción de hemicelulosas ya que dependiendo de estos puede variar el tipo de fracción lignocelulósica aislada, el rendimiento y el peso molecular.

Dependiendo del tipo de método, las condiciones de operación pueden variar ampliamente. La extracción alcalina generalmente se lleva a cabo a temperaturas bajas (temperatura ambiente) y largos tiempos de extracción que varían en el rango de 1-24 h. Asimismo se han reportado tiempos de extracción más cortos que requieren de temperaturas

más altas (ver Tabla 3). Sin embargo, estas condiciones de operación no son muy utilizadas ya que pueden conducir a la degradación molecular del polímero (S. Panthapulakkal et al., 2014).

En comparación con la extracción alcalina, la explosión de vapor requiere de altas temperaturas que varían en el rango de 160-240 °C y presiones en el rango de 0,7-4,8 MPa (Naidu et al., 2018). Los tiempos cortos de residencia los cuales oscilan en el rango de 10-15 min (ver Tabla 3), permiten mantener la estructura de la hemicelulosa sin cambios notables.

Para la extracción asistida por microondas no se ha reportado un rango específico de temperaturas. Inicialmente se realizaron estudios en los cuales se utilizaron valores superiores a 120°C (Roos et al., 2009). Sin embargo, este rango de operación no es del todo favorable ya que puede conducir a la degradación y despolimerización del polímero (F. S. Panthapulakkal, 2014). Para superar estos inconvenientes, Panthapulakkal, (2014) y Chadni et al., (2019) plantearon un pretratamiento a condiciones moderadas (100°C y presión atmosférica) demostrando ser eficaz para la obtención de xilanos con alto peso molecular (ver Tabla 3).

Por otro lado, el medio de extracción es un parámetro clave en el aislamiento de fracciones lignocelulósicas ya que se ha demostrado que influye fuertemente en la selectividad de la extracción. Si bien, un pretratamiento en medio básico genera una fracción lignocelulósica rica en xilosa y arabinosa, un medio neutro conlleva a fracciones ricas en manosa, glucosa y galactosa (Chadni et al., 2020; Svärd et al., 2015; Chadni, Bals, et al., 2019; Chadni, Grimi, et al., 2019). Lo anterior se puede explicar debido a la fuerte relación entre la naturaleza del polisacárido extraído y el pH del medio de extracción ya que la solubilidad de las hemicelulosas se ve afectada por los sustituyentes de la cadena (Svärd et al., 2017).

Varios estudios han planteado una alternativa interesante al proceso de extracción por explosión de vapor convencional y extracción asistida por microondas que consiste en una combinación del método con una etapa previa de impregnación del material con NaOH o agua

destilada (Chadni et al., 2020; Chadni, Bals, et al., 2019; Chadni, Grimi, et al., 2019; Roos et al., 2009). El objetivo de esta pre- extracción además de influir en la selectividad, es abrir la matriz lignocelulósica con el fin de permitir una mejor accesibilidad a la hemicelulosa. En un estudio realizado para la caña de azúcar y madera de álamo, se ha informado que es una buena estrategia para la extracción de xilano con poca o ninguna formación de monosacáridos y productos de degradación (Mihiretu et al., 2019).

Ahora bien, el medio de extracción también influye sobre el peso molecular y el rendimiento. Se ha logrado demostrar que, en la mayoría de los casos, la impregnación del material con NaOH permite obtener un peso molecular más alto en comparación con una impregnación con agua (ver Tabla 3), lo cual se debe a que el medio neutro genera condiciones ácidas debido a los ácidos carboxílicos formados resultando finalmente en la hidrólisis de los enlaces glicosídicos de la hemicelulosa (Chadni et al., 2020). En cuanto al rendimiento se ha informado que las hemicelulosas suelen ser susceptibles a pH altos lo cual permite una mejor solubilización del material y por tanto generar mejores rendimientos.

Tabla 3

Tipos de pretratamientos para la extracción de xilano, condiciones de operación y resultados de parámetros analizados

Método	Materia prima	Fracción lignocelulósica	Condiciones	Rendimiento	PM	Referencia
Alcalino	Médula de bagazo de caña de azúcar	Xilano	Pretratamiento con 8% NaOH (p/p). Deslignificación y extracción con KOH al 10% a temperatura ambiente durante 12 h	62,23% (xilosa)	6 kDa	(Yousefi et al., 2020)
Alcalino	Pulpas kraft de abedul blanqueadas	Xilano	NaOH 1 M, temperatura ambiente durante 60 min	15-17%	26.750 Da	(Laine et al., 2013)
Alcalino	Pulpas kraft de abedul blanqueadas	Xilano	NaOH 0,5 M, temperatura ambiente durante 60 min	8-9%	26.750 Da	(Laine et al., 2013)
Alcalino	Tusa de maíz	Xilano	NaOH al 4% (v/v) durante 4 h, 25°C	64,65% mol (xilosa) BS	31.300 g/mol	(Da Costa Urtiga et al., 2020)
Alcalino	Paja de colza	GAX	NaOH al 0,5 M durante 20 min, 140°C	32% BS	24.710 g/mol	(Svård et al., 2017)
Alcalino	Madera de abeto	AGX	Deslignificación y extracción con KOH al 24% (p/p) durante 24 h a temperatura ambiente	80,5% p/p (xilosa)	12.700 Da	(García et al., 2018)
Alcalino	Salvado de trigo	AX	KOH al 24% (p/v) que contiene 1% de NaBH ₄ (p/v) a temperatura ambiente durante 3 h	12%	166.000 g/mol	(Y. Zhang et al., 2011)
Alcalino	Salvado de trigo	AX	NaOH 0,15 N y agitación durante 120 min a 300 rpm a 85°C	32,8 %	606.575 Da	(Li et al., 2021)

Método	Materia prima	Fracción lignocelulósica	Condiciones	Rendimiento	PM	Referencia
Explosión de vapor	Madera de álamo	Xilano	Impregnación con NaOH al 5% (p/p), y explosión a 204°C durante 10 min	23,6% p/p	-	(Mihiretu et al., 2019)
Explosión de vapor	Residuos de caña de azúcar	Xilano	Impregnación con NaOH al 5% (p/p), y explosión a 200°C durante 15 min	50,8% p/p	-	(Mihiretu et al., 2019)
Explosión de vapor	Aserrín de abeto	AGX	Impregnación con NaOH 1M y explosión a 190°C por 10 min	66 mg/g BS	52,4 kDa	(Chadni et al., 2020)
Explosión de vapor	Aserrín de abeto	GGM	Impregnación con agua y explosión a 190°C por 10 min	64 mg/g BS	20 kDa	(Chadni et al., 2020)
Explosión de vapor	Aserrín de abeto	AGX	Impregnación con NaOH 1 M. Factor de severidad: 3,94	43,57 mg/g BS	63,5 kDa	(Chadni, Grimi, et al., 2019)
Explosión de vapor	Aserrín de abeto	GGM	Impregnación con agua. Factor de severidad: 3,65	46,36 mg/g BS	14,05 kDa	(Chadni, Grimi, et al., 2019)
MAE	Madera de abeto	AGX	Impregnación con 1 M NaOH, 573 W, 100°C durante 1 h	32,3 mg/g BS	66.564 g/mol	(Chadni, Bals, et al., 2019)
MAE	Madera de abeto	GGM	Impregnación con agua, 573 W, 100°C durante 1 h	13 mg/g BS	56.300 g/mol	(Chadni, Bals, et al., 2019)
MAE	Cáscara de cebada	AX	Impregnación con 0,5% en peso de NaOH, 200°C durante 5 min	9% (xilano)	52.000 Da	(Roos et al., 2009)

Nota. GGM: galactoglucomanano, AX: arabinoxilano, AGX: arabinoglucuronoxilano, GAX: glucuronoarabinoxilano, MAE: extracción asistida por microondas, PM: peso molecular, BS: rendimiento reportado en base seca

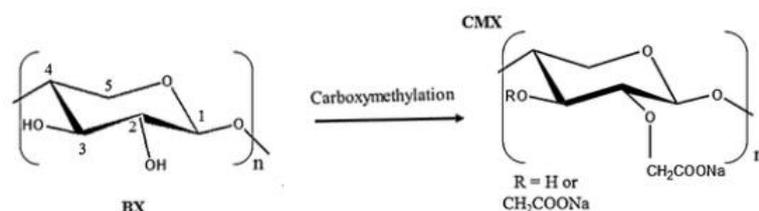
4.5 Modificaciones químicas del xilano para la síntesis de biomateriales

A causa de la necesidad de obtener xilanos con propiedades que permitan la síntesis de biomateriales funcionales con aplicación en diferentes áreas, se plantea la derivatización del xilano.

Las principales clases de modificación que existen son dos, mediante reacciones de eterificación y esterificación (ver Tabla 4). La eterificación es la reacción del alcohol con un agente alquilante en presencia de una base, donde destaca la carboximetilación. Mediante la carboximetilación, el xilano adquiere un grupo hidroxilo y un grupo carboxilo y obtiene una mejor solubilidad en el agua (ver Figura 3).

Figura 3

Esquema de reacción de la eterificación por carboximetilación de hemicelulosas



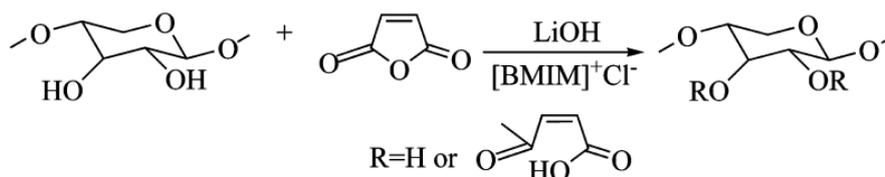
Nota. Adaptado de “Surface properties of xylan and xylan derivatives measured by inverse gas chromatography” por Sousa, Pedrosa, et al., 2016, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering*, 506, 600–606.

La esterificación de los grupos hidroxilo de xilano reduce su tendencia a formar una red de enlaces puente de hidrógeno (ver Figura 4). Esto resulta en un aumento en su hidrofobicidad, así como su solubilidad en disolventes orgánicos (Belmokaddem et al., 2011; Fundador et al., 2012). Los agentes de esterificación comunes de xilanos para biomateriales

son: anhídrido acético, anhídrido maleico, cloruro de acrilóilo y anhídrido (2-dodecen-1-il) succínico (ver Tabla 4).

Figura 4

Esquema de reacción de la esterificación de hemicelulosas



Nota. Adaptado de “Homogeneous Esterification of Xylan-Rich Hemicelluloses with Maleic Anhydride in Ionic Liquid” por X. W. Peng et al., 2010, *Biomacromolecules*, 11(12), 3519–3524.

La esterificación homogénea con anhídrido maleico permite obtener hemicelulosas que contienen dobles enlaces de carbono polimerizables; como resultado se obtiene una mayor reactividad de las moléculas de xilano que facilita la reacción con otros polímeros o monómeros (W. Q. Kong et al., 2017). Asimismo, la metacrilación es un tipo de reacción de transesterificación mediante la cual se introducen grupos alqueno en la estructura del xilano permitiendo obtener los mismos resultados. Se ha informado el uso de 4-dimetilaminopiridina (DMAP) como catalizador y dimetilsulfóxido (DMSO) como solvente para este método (ver Tabla 4) (Lin et al., 2019; C. Gao et al., 2015).

A diferencia de la eterificación y la esterificación en la cual los grupos hidroxilo primarios son los que reaccionan con los grupos funcionales, en la oxidación con periodato ocurre una escisión selectiva en las posiciones C2 y C3 en las unidades de xilosa formando un dialdehído (ver Tabla 4) (Börjesson et al., 2018; G. Q. Fu et al., 2020).

Tabla 4*Reacciones de modificación química para el xilano*

Método	Reacción	Agente de modificación	Disolvente	Catalizador	Hemicelulosa modificada	Referencia
Metacrilación	Transesterificación	Metacrilato de glicidilo (GMA)	Dimetilsulfóxido (DMSO)	4-dimetilamino-piridina (DMAP)	Xilano metacrilado	(Lin et al., 2019), (C. Gao et al., 2015), (X. Peng et al., 2012)
-	Esterificación homogénea	Anhídrido maleico	Líquido iónico, cloruro de 1-butil-3-metilimidazolio ([BMIM] Cl)	LiOH	Xilano modificado con anhídrido maleico	(W. Q. Kong et al., 2017), (X. W. Peng et al., 2010)
Carboximetilación	Esterificación	Monocloroacetato de sodio	Solución acuosa de NaOH	-	Carboximetil xilano	(Chang et al., 2018), (Tulain et al., 2018), (Li et al., 2021), (Queirós et al., 2017), (Alekhina et al., 2014), (Yousefi et al., 2020), (Ramos et al., 2017), (Sousa, Ramos, et al., 2016), (Rao et al., 2021)
Acetilación	Esterificación	Anhídrido acético	Piridina	-	Xilano acetilado	(Fonseca et al., 2011)
-	Oxidación	Periodato de sodio	-	-	Dialdehído xilano	(Börjesson et al., 2018), (G. Q. Fu et al., 2020)
Acroilación	Esterificación	Cloruro de acrilóilo	-	-	Hemicelulosa acrilóilada	(García et al., 2018)
-	Esterificación	Anhídrido (2-dodecen-1-il) succínico	Dimetilsulfóxido (DMSO)	-	Xilano modificado con anhídrido 2-dodecenil succínico (X-2-DSA)	(Ramos et al., 2017)
Hidroxiropilación	Esterificación	Óxido de propileno	Solución acuosa de NaOH	-	Hidroxiropil xilano (HPX)	(Sousa, Ramos, et al., 2016), (Mikkonen et al., 2015)
-	Esterificación	Butil glicidil éter, alil glicidil éter	Solución acuosa de NaOH	-	Xilanos butil-alilados	(Laine et al., 2013)

4.6 Hidrogeles a partir de xilano

Un hidrogel es un material polimérico con la capacidad de absorber grandes cantidades de agua (W. Wang et al., 2020) sin disolverse en ésta debido a su estructura tridimensional reticulada física o químicamente. En los últimos años la atención prestada hacia este material por sus posibilidades de uso ha incrementado, haciéndolo objeto de diversos estudios en donde se exploran las diferentes propiedades y cómo estas influyen en la aplicación final del material.

Si bien los hidrogeles deben cumplir con ciertas características que se ajusten a los requerimientos de su aplicación, las propiedades generales que destacan del polímero son: composición química, relación de hinchamiento, porosidad, y propiedades mecánicas.

Composición Química: es una de las propiedades que dicta el comportamiento que tendrá el hidrogel. Los componentes que constituyen en general un hidrogel, y en particular un hidrogel de xilano consisten en el uso de precursores (hemicelulosa, monómeros y polímeros naturales o sintéticos), un agente reticulante y otros componentes adicionales. Dentro de las principales mezclas para la preparación de hidrogeles de xilano (ver Apéndice E) que se encontraron destacan el ácido acrílico (AA), acrilamida, N-isopropilacrilamida (NIPAm) como monómeros, polímeros naturales como la gelatina, quitosano, y como reticulante N, N'-metilbisacrilamida (MBA) y Etilenglicol diglicidil éter (EDGE).

Relación de hinchamiento (SR): La relación de hinchamiento (SR) es el aumento fraccional en el peso del hidrogel debido a la absorción de agua (Park et al., 2009), la cual se encuentra condicionada a factores como la cantidad de hemicelulosa, reticulante y monómero presente en la red. La decisión de si es buena una alta o baja SR depende del tipo de aplicación (Khaleghi et al., 2020).

El contenido de hemicelulosa y de reticulante dentro del hidrogel ha demostrado tener un efecto sobre la SR. Gami et al., (2020) encontraron que la variación de la relación xilano:

carboximetilcelulosa (CMC) de 25:75, a 75:25 % mol ejercía un aumento en la capacidad de hinchamiento (Kundu & Banerjee, 2019). De igual forma los autores Fonseca et al., (2011), al mezclar xilano acetilado con metacrilato 2-hidroxietilo (HEMA) en proporciones 40:60 a 60:40 % peso obtuvieron como resultado una mayor cantidad de agua retenida dentro del hidrogel con mayor contenido de xilano; este comportamiento se le atribuye a los grupos hidroxilo presentes en el xilano que le confieren hidrofilia al hidrogel (Tulain et al., 2018). Siendo el agente reticulante el responsable de la densidad del hidrogel, altos contenidos de reticulante crean una red más densa y menos expandida que obstruye la absorción de agua y por lo tanto limitan la capacidad de hinchamiento (Zhong et al., 2013; C. Gao et al., 2016; Tulain et al., 2018; Lin et al., 2019).

4.6.1 Métodos de síntesis

Existe una gran variedad de métodos para la producción de hidrogeles a partir de los cuales pueden variar sus características. Una de las clasificaciones principales de síntesis de hidrogeles es de acuerdo al tipo de reticulación, ya sea reticulación física o química. Esta sección se centrará en la reticulación química puesto que estos métodos fueron los más comúnmente reportados en los trabajos para hidrogeles de xilano.

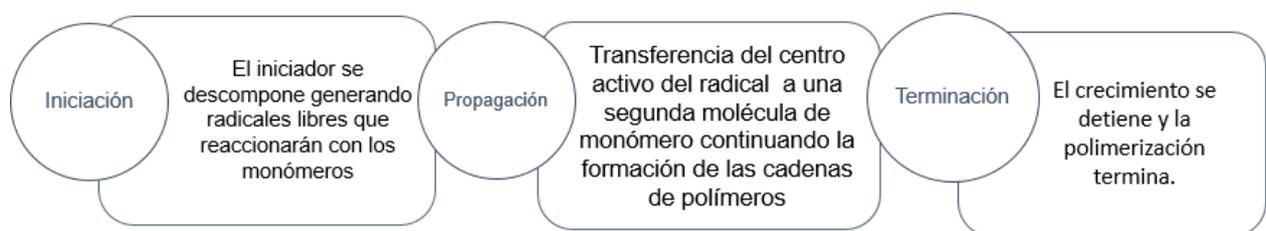
La reticulación química consiste en la formación de enlaces covalentes entre los diferentes monómeros o polímeros que compongan el hidrogel. Los hidrogeles reticulados químicamente se producen injertando monómeros funcionales en la red polimérica o cuando se dispone de dos cadenas poliméricas ya formadas se hace uso de un reticulante para acoplarlas (Ermis et al., 2018).

4.6.1.1 Polimerización por radicales libres. Este método permite el injerto de uno o más monómeros en los grupos funcionales de la cadena del xilano. Implica 3 etapas distintas: inicio,

propagación y terminación (Figura 5) (Lamaoui et al., 2021). La activación del iniciador en la etapa de iniciación se puede llevar a cabo por medio de radiación ultravioleta (UV), temperatura o un sistema iniciador redox (Madduma-Bandarage & Madihally, 2021). Los iniciadores típicos son persulfato de amonio (APS) y azobisisobutironitrilo (AIBN) (W. Wang et al., 2020) (ver Apéndice H).

Figura 5

Etapas de la reacción de polimerización por radicales libres



Los métodos de polimerización por radicales libres son la polimerización en bloque, en solución, suspensión y emulsión. Sin embargo, de los artículos revisados para hidrogeles de xilano se reporta la polimerización en solución y en emulsión.

Para la polimerización en solución se necesita una solución que contenga los monómeros, el agente reticulante y el iniciador, este tipo de polimerización es preferido para la producción de grandes cantidades de hidrogeles (Varghese et al., 2020), siendo el agua el disolvente más utilizado. En la polimerización por emulsión se tiene una fase acuosa que contiene un tensioactivo, el cual evita la reagregación de las gotas y estabiliza la emulsión (Gelman et al., 2008; Liu & García, 2016), una fase oleosa que contiene un monómero y un iniciador.

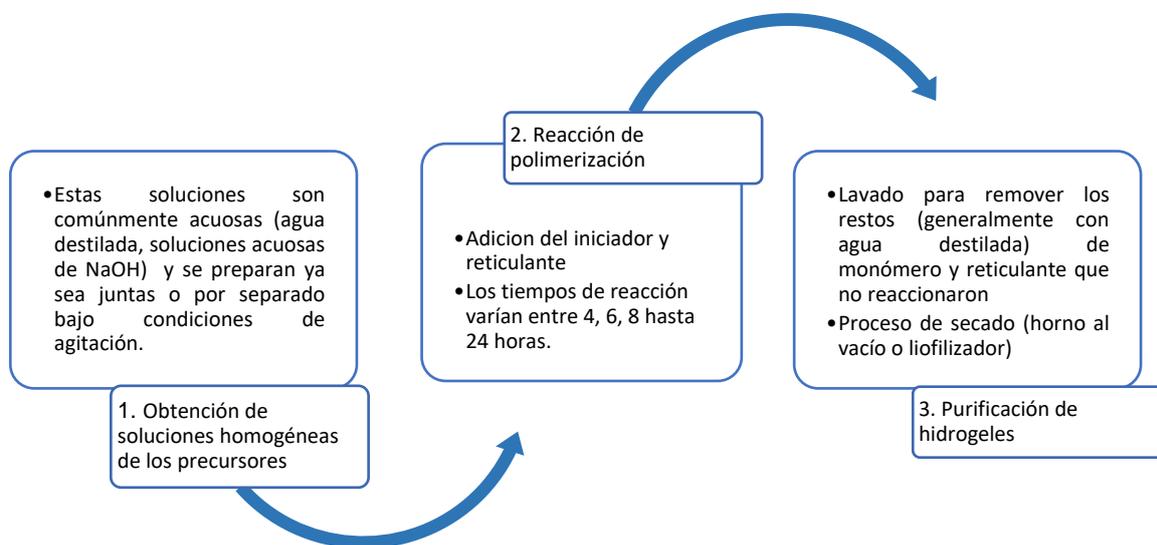
Una variante de esta técnica es la emulsión inversa, utilizada para la preparación de polímeros de alto peso molecular (Gelman et al., 2008); su diferencia radica en que aquí la fase acuosa es la que contendrá el monómero hidrofílico, mientras que el iniciador puede encontrarse en cualquiera de las dos fases (Liu & García, 2016).

La polimerización por emulsión es adecuada cuando el producto deseado es un hidrogel en forma de partículas o perlas, además que permiten un mejor control del tamaño, la forma y la distribución de las partículas del hidrogel (Mathur et al., 1996).

4.6.1.2 Redes Semi interpenetrantes. Un método que ha surgido en los últimos años son las redes semi interpenetrantes, esta técnica es una forma de mezclar dos polímeros y por lo tanto sus propiedades. Uno de los polímeros se sintetiza y reticula en la presencia del otro sin ningún enlace covalente. Esta estructura ha sido estudiada para dar solución a las desventajas de los hidrogeles como por ejemplo resistencia mecánica relativamente baja. Estas redes se forman por la asociación de dos polímeros, que pueden surgir de fuerzas electrostáticas, interacciones hidrofóbicas, enlaces puente de hidrógeno, fuerzas de Van der Waals o combinaciones de estas (Dash et al., 2012).

4.6.2 *Proceso de síntesis de hidrogeles*

El proceso de formación del hidrogel en general consiste en 3 pasos: i) preparación de los precursores, ii) síntesis de hidrogeles mediante la adición de reticulantes y iii) purificación de hidrogeles (Figura 6). Las condiciones como el tiempo, temperatura y componentes del proceso se reportan en el Apéndice F.

Figura 6*Proceso de síntesis de un hidrogel*

4.6.3 Aplicaciones de hidrogeles de xilano

A partir de la revisión bibliográfica, surgen dos aplicaciones principales para los hidrogeles de xilano: biomedicina y adsorción de colorantes y metales pesados.

4.6.3.1 Biomedicina: sistemas de liberación de fármacos. La capacidad de pasar de un líquido a un gel como respuesta a un estímulo convierten a los hidrogeles en materiales atractivos para sistemas de liberación de fármacos. Los hidrogeles pueden responder a diferentes estímulos del medio, sin embargo los más utilizados para este tipo de aplicaciones son el pH y la temperatura (Arredondo & Londoño, 2009). Algunos de los estudios de liberación de fármacos se han realizado a lo largo del tracto gastrointestinal debido a las variaciones de pH a lo largo de este. Los resultados arrojados han indicado que los hidrogeles que contienen grupos carboxílicos o grupos sulfónicos presentan una mayor liberación del fármaco a pH intestinales (6,8-7,4), mientras que a pH gástricos (1,2-2) los hidrogeles con grupos aminas exhiben una mejor liberación (Li et al., 2021; Kundu & Banerjee, 2019). Dentro del número de diferentes

sustancias evaluadas para ser liberadas están el ácido acetilsalicílico, medicamentos para tratar el cáncer como el 5- fluorouracil, vitaminas, proteínas entre otros (ver Apéndice G).

4.6.3.2 Biomedicina: ingeniería de tejidos. Para las aplicaciones de ingeniería de tejidos se han preparado hidrogeles de gelificantes in situ, los cuales se pueden inyectar en forma líquida y realizan la transición a la fase gel en el interior del cuerpo humano. Los hidrogeles resultantes toman la forma del espacio disponible en el lugar de la inyección (Li & Mooney, 2016). La transición se puede lograr utilizando diferentes estrategias, una de estas es por medio de la mezcla de xilano con otros polímeros que dan lugar a hidrogeles sensibles a la temperatura. Ciertos polímeros sintéticos como poli (N-isopropilacrilamida) (PNIPAm) poseen temperaturas de solución crítica más baja (LCST) cercanas a la del cuerpo humano (32°C). Esto quiere decir que, a bajas temperaturas, se obtiene una solución homogénea y a medida que se aumenta la temperatura, se produce la agregación de los grupos hidrófobos, induciendo separación de fases y formación del hidrogel (Van et al., 2011).

Otro de los beneficios de utilizar polímeros naturales en un hidrogel es el hecho de que son biocompatibles, biodegradables y no tóxicos (Lynch et al., 2020). La biocompatibilidad hace referencia a la tolerancia que muestra los tejidos hacia el hidrogel y la estabilidad física de este durante el tiempo en el que se encuentran en contacto. Es decir, no deben cambiar sus propiedades físicas, y no deben dañar los tejidos ni causar reacciones tóxicas o alérgicas en el cuerpo.

4.6.3.1 Adsorción de colorantes y metales pesados. La adsorción es una de las técnicas más efectivas para la remoción de metales pesados y colorantes encontrados en las aguas residuales de procesos industriales. La acumulación de compuestos como el azul de metileno, ampliamente usado como colorante para papeles, cabellos y en el teñido de algodón

y lana (Kulal & Badalamoole, 2020) y de metales pesados como Cu, Co, Cr, Cd, entre otros, pueden ser causantes de problemas de salud (Chowdhury et al., 2021). La búsqueda de adsorbentes más económicos y eficientes ha colocado el interés sobre los hidrogeles debido a sus grupos funcionales hidrofílicos químicamente sensibles (Shalla et al., 2019). Un criterio importante para la utilización de hidrogeles como adsorbentes es su capacidad de regeneración, es decir que puedan volver a ser reutilizados repetidas veces sin que esto represente una disminución notable en su rendimiento. Por ejemplo, en la fabricación de hidrogeles superabsorbentes, la eficiencia se mantuvo por encima del 90% después de 4 ciclos de uso (Lin et al., 2019), y por encima del 80% pasados 5 ciclos de uso (Zhong et al., 2013) (ver Apéndice H).

4.6.3.2 Hidrogeles para la sorción de gases. Uno de los principales factores asociados con el calentamiento global son los niveles de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera como resultado del consumo de combustibles fósiles y las actividades industriales (Xu & Wood, 2018). Se han fabricado hidrogeles cuyo propósito es la captura de este tipo de gases (ver Apéndice I), sin embargo, no se encontraron estudios referentes a hidrogeles preparados a base de hemicelulosa.

4.6.3.2.1 Hidrogeles infundidos con aminas (AIHs). Consiste en partículas de hidrogel sumergidas en soluciones acuosas de aminas (DEA, MEA), que se mantienen firmemente en la estructura polimérica. Las moléculas de CO_2 pueden luego difundirse a través de la superficie del AIH y reaccionan con la solución de amina in situ (ver Apéndice I). Este tipo de hidrogel captura rápidamente CO_2 con una absorción en general más alta en comparación con las soluciones de amina acuosas de uso común en condiciones experimentales similares (Xu et al., 2018). Los desafíos a considerar son la disminución del tamaño de partícula del hidrogel para la optimización del área superficial y la eficacia de este bajo condiciones reales que implican temperaturas, presiones más altas y mezclas de diferentes gases.

Adicional a los hidrogeles infusionados con aminos se han preparado otro tipo de hidrogeles para esta aplicación. Los autores Yasin et al., (2021) prepararon un hidrogel a base de residuos de palma de aceite que presenta altos contenidos de celulosa, con la adición de acrilamida y biochar para la adsorción de sulfuro de hidrógeno presente en el biogás. También se ha estudiado el uso de polímeros naturales como el quitosano y arcillas como la vermiculita para la eliminación de nitrógeno amoniacal (Zheng et al., 2012). El quitosano presenta grupos aminos reactivos que facilitan la adsorción del gas y la incorporación de la arcilla en el hidrogel no sólo aumenta la capacidad de adsorción, sino que también mejora la tasa de adsorción, lo que hace que el proceso se complete en pocos minutos.

4.7 Películas a partir de xilano

La capacidad de formación de películas depende de la estructura química de la hemicelulosa. El grado de acetilación y el grado de ramificación de las cadenas de xilano por los residuos de arabinosilo representado por la relación de arabinosa/xilosa son factores que pueden afectar su solubilidad y por lo tanto el potencial para formar películas en soluciones acuosas (Sousa, Ramos, et al., 2016).

Si bien varios estudios han informado la formación de películas a partir de hemicelulosa pura (A. Escalante et al., 2012; Höjje et al., 2005), se han reportado diferentes tipos de xilano que son incapaces de formar películas a partir de soluciones acuosas. Entre estos se encuentra el xilano de madera de abedul comercial (Alekhina et al., 2014; Morais De Carvalho et al., 2020), tusa de maíz (Gordobil et al., 2014), hidrolizado de madera (Edlund et al., 2010), y el glucuronoxilano de álamo (Gröndahl & Gatenholm, 2007).

La combinación de la hemicelulosa con otros polímeros, la adición de plastificantes y agentes reticulantes y la modificación química del xilano son estrategias que se han desarrollado con el fin de obtener películas con las propiedades necesarias para su aplicación

final. En general las propiedades claves de una película deben ser una estructura homogénea sin grietas, estabilidad térmica y buenas propiedades mecánicas.

Los plastificantes son componentes de bajo peso molecular que al introducirse en la estructura del polímero reducen la formación de enlaces puentes de hidrógeno y por tanto permiten una mayor movilidad entre las moléculas. Como resultado se obtiene un polímero con mayor flexibilidad, pero a su vez menor resistencia a la tracción y menor rigidez. Cabe resaltar que es importante dosificar la cantidad de este componente ya que cantidades excesivas pueden generar inconvenientes tales como la reducción de la estabilidad térmica, debido a la plastificación de la matriz que involucra un mayor volumen libre y por tanto menores fuerzas intermoleculares entre los componentes del material (Morais De Carvalho et al., 2020; Gordobil et al., 2014). En este sentido el glicerol y el sorbitol son los plastificantes más utilizados (ver Apéndice J).

Los agentes reticulantes por su parte generan un comportamiento opuesto a los plastificantes, ya que permiten incrementar la resistencia a la tracción mientras disminuyen el alargamiento a la rotura (flexibilidad) obteniendo así materiales menos deformables.

El ácido cítrico es uno de los componentes que se utiliza frecuentemente para la fabricación de películas, el cual puede actuar como plastificante o como reticulante dependiendo de las condiciones de la etapa de secado. Se ha informado que a temperaturas superiores a los 100°C actúa como un agente reticulante promoviendo la formación de redes tridimensionales mediante la reacción de esterificación entre los grupos hidroxilo del xilano y los grupos carboxilo del ácido cítrico además de la formación de enlaces puente de hidrógeno entre los grupos hidroxilo del polisacárido (S. Wang et al., 2014; Kondaveeti et al., 2017; Yang et al., 2019).

Por otra parte, la modificación del xilano puede generar un efecto de plastificación interna que permite solucionar uno de los principales inconvenientes de los plastificantes, que son la migración fuera de la película con el tiempo y el envejecimiento (Laine et al., 2013; Svärd et al., 2015). La carboximetilación es uno de los principales tipos de derivatización que permite obtener xilanos solubles en agua mejorando así la capacidad de formación de películas (Rao et al., 2021; Queirós et al., 2017). Además, dependiendo del grado de sustitución del polímero las propiedades mecánicas varían. La hidroxialquilación, hidroxipropilación y la modificación con anhídrido 2-dodecenil succínico han sido otros métodos de modificación informados (Laine et al., 2013; Sousa, Ramos, et al., 2016; Fonseca et al., 2011).

El alcohol polivinílico (PVA), la celulosa, la hidroxietilcelulosa (HEC), la carboximetilcelulosa (CMC), el quitosano y la gelatina en mezcla con xilano son los principales polímeros que se han reportado para la formación de películas. La mezcla sinérgica de estos componentes permite obtener películas con superficies homogéneas, lisas y uniformes. Varios estudios han demostrado que la combinación con un segundo polímero y la adición de un plastificante mejora de forma eficaz las propiedades mecánicas exhibiendo así una mayor rigidez y elongación a la rotura (P. Peng et al., 2015).

4.7.1 Método de síntesis para películas: fundición por solvente

La preparación de películas a base de xilano se realiza mediante fundición por solvente en su gran mayoría utilizando agua. Este método se caracteriza por su procesamiento fácil y de bajo costo (Karki et al., 2016). Generalmente consiste en tres pasos que incluyen: i) preparación y mezcla de los precursores, ii) vertimiento de la solución sobre el molde y iii) secado de la película. En este último paso se pueden generar variaciones de acuerdo a las condiciones de operación utilizadas. En su mayoría, el secado se realiza a temperatura ambiente (25 °C) y 50% de HR (ver Apéndice J). Sin embargo, se ha informado métodos en los cuales se utiliza un horno con ventilación para realizar el secado a temperaturas más altas (40-50°C) o para

tratamientos de curado ($T > 100^{\circ}\text{C}$) posterior con el fin de mejorar la reticulación entre los componentes de la película. La posibilidad de atrapar burbujas de aire durante el proceso de preparación de la solución es una desventaja de este método ya que puede afectar las características finales de la película (Dixit & Puthli, 2009). Por lo anterior, es necesario realizar un proceso de desaireación o una agitación eficaz, por ejemplo mediante procesos como sonicación al vacío (Svärd et al., 2015; Mahajan & Deshmukh, 2015).

4.7.2 Aplicaciones de películas de xilano

Las películas a base de xilano han sido desarrolladas principalmente para el embalaje de alimentos. Sin embargo, también se han informado de películas como recubrimientos para laminados de papel.

4.7.2.1 Embalaje de alimentos. Actualmente el embalaje de alimentos se lleva a cabo mediante plásticos sintéticos que como bien se sabe generan un impacto ambiental negativo debido a su difícil degradación, por lo cual las películas a base de biopolímeros son una alternativa interesante para aportar a las diferentes estrategias diseñadas para enfrentar esta problemática.

Las películas para el embalaje de alimentos requieren de ciertas propiedades de barrera que eviten la migración de humedad y moléculas de oxígeno, así como el contacto con aceites y grasas con el fin de mitigar los efectos de contaminación y oxidación de los alimentos (A. Escalante et al., 2012). El xilano por su parte es un polímero con buenas propiedades de barrera contra los aceites y grasas y contra el oxígeno en humedades relativas bajas y moderadas, sin embargo debido a su naturaleza higroscópica no presenta una buena barrera contra la humedad (Gordobil et al., 2014).

La reticulación permite obtener películas con una estructura densa y compacta que evita la migración de los agentes intrusivos en la película, es decir no solo el ingreso de la humedad

sino también de los agentes oxidantes. Yang et al., (2019) realizaron un estudio en el cual hacen énfasis en el tiempo de curado evaluando sus efectos sobre la reticulación y a su vez el efecto sobre la permeabilidad al vapor del agua (WVP). En un rango de 0-60 min se reportó que un tiempo de curado intermedio de 40 min es el valor crítico para que este factor genere la reticulación necesaria para obtener un valor de WVP adecuado (bajo).

En cuanto a la biodegradabilidad, se han realizado pruebas en las cuales se evalúa la pérdida de masa del material durante un cierto tiempo. Lucena et al., (2017) demostró que todas sus formulaciones a base de xilano y gelatina lograron una degradación completa en un periodo de 15 días. Por otro lado, C. D. Gao et al., (2014) utilizando una película de PVA/xilano lograron una pérdida de peso del 41,3% durante un tiempo de 30 días, demostrando así su viabilidad para aplicaciones de embalaje de alimentos sostenibles con el medio ambiente.

4.8 Desafíos en la obtención de hidrogeles y películas

Si bien se ha logrado un gran avance en la obtención de biomateriales como hidrogeles y películas a partir de xilano, aún quedan muchos desafíos por superar.

Por ejemplo, para la liberación de fármacos es importante considerar la solubilidad de las drogas incorporadas en los hidrogeles. Los fármacos que tienen una alta solubilidad pueden presentar una liberación prematura antes de llegar al sitio objetivo. Para prevenir esto se requeriría de un recubrimiento o encapsulamiento más grueso que a su vez puede dar como resultado una liberación incompleta del fármaco. Existen avances en áreas como la bioelectrónica que generan nuevas oportunidades para la administración controlada de fármacos. Dispositivos como sensores podrían integrarse con los hidrogeles formando sistemas híbridos para monitorizar el cuerpo de forma continua, responder con un control activo y regular la liberación de fármacos en consecuencia (Jianyu Li & Mooney, 2016).

Dentro de los principales desafíos en la síntesis de películas se presenta la relación entre la estructura molecular del xilano y su capacidad para la formación de películas debido a la estructura altamente diversificada de la hemicelulosa. Si bien se conoce que factores como la relación arabinosa/xilosa y el contenido de lignina y heteropolisacáridos influyen sobre la solubilidad del xilano y por tanto en su capacidad para formar películas, aún existen diferentes fracciones lignocelulósicas que han demostrado ser impredecibles en su capacidad de formación de película. Por ejemplo, el xilano de madera de abedul ha demostrado que permite obtener películas coherentes y cohesivas o quebradizas dependiendo de las condiciones y el método de extracción utilizado (Morais De Carvalho et al., 2020; Hansen et al., 2012).

5 CONCLUSIONES

- De los residuos lignocelulósicos más abundantes generados en el departamento de Santander se estableció que el bagazo de caña panelera y el pergamino de café presentan los contenidos más altos de hemicelulosa (xilano), 33,53% y 22,83% respectivamente, a partir de los cuales existe la posibilidad de sintetizar hidrogeles y películas poliméricas.
- Para la extracción de la hemicelulosa de tipo xilano se encontró que la extracción alcalina es el método más recomendable por sus condiciones de operación (temperatura ambiente y pH básicos) que permiten obtener mayores rendimientos y pesos moleculares más altos. Además, cabe resaltar que de las variables analizadas como tiempo, temperatura y pH del medio, este último presenta un efecto notable sobre el tipo de fracción lignocelulósica aislada.
- A partir de los artículos encontrados se identificó que el método de síntesis más utilizado para la producción de hidrogeles a partir de xilano es la reticulación química por polimerización de radicales libres debido a que permite obtener polímeros de alto peso molecular y maneja temperaturas de reacción moderadas. Referente a las películas, el método de fundición por solvente es el más utilizado por ser de fácil procesamiento y bajo costo.
- Las aplicaciones para hidrogeles de xilano más estudiadas son las pertenecientes al campo de la biomedicina, centrándose en la liberación de fármacos en el tracto gastrointestinal a través de hidrogeles sensibles al pH. Estos hidrogeles presentan características como la capacidad de degradarse y la biocompatibilidad, lo que los hace no tóxicos al entrar en contacto con el cuerpo humano. En relación a las películas, en su mayoría han sido estudiadas para el embalaje de alimentos caracterizándose por sus

buenas propiedades mecánicas y de barrera al mezclarse con otros componentes y principalmente por su capacidad de degradarse total o parcialmente en cortos periodos de tiempo.

RECOMENDACIONES

En este proyecto se realizó la revisión de las aplicaciones para hidrogeles y películas. Si bien la sorción de gases no fue una de ellas, sí se encontró la fabricación de hidrogeles para captura de CO₂ con polímeros naturales como quitosano y celulosa.

Siendo el café y la caña panelera unos de los principales productos del departamento de Santander, los residuos generados por estos prometen ser una buena fuente de xilanos, a partir de esto se recomienda la realización de estudios que permitan evaluar la viabilidad de la preparación de hidrogeles a partir de pergamino de café o bagazo de caña panelera utilizados para la sorción de gases.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, R., Sanabria, J., & Nabarlatz, D. (2018). Biomass from colombian agroindustrial activities: Characterization and potential for oligosaccharides production. *Chemical Engineering Transactions*, *65*, 667–672. <https://doi.org/10.3303/CET1865112>
- Acosta, R., Viviescas, P., Sandoval, M., & Nabarlatz, D. (2018). *Autohydrolysis of Sugarcane Bagasse and Empty Fruit Bunch from Oil Palm : Kinetics Model and Analysis of Xylo-Oligosaccharides Yield*. *65*, 307–312. <https://doi.org/10.3303/CET1865052>
- Afanasjeva, N., Castillo, L. C., & Sinisterra, J. C. (2017). Biomasa Lignocelulósica. Parte I: Transformación de biomasa. *Journal of Science with Technological Applications*, *3*(2017), 27–43. <https://doi.org/10.34294/j.jsta.17.3.22>
- Agronet. (2019). *Reporte:Comparativo de Área, Producción, Rendimiento y Participación Departamental por Cultivo*. <https://www.agronet.gov.co/estadistica/paginas/home.aspx?cod=1>
- Ahmed, E. M. (2015). Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of Advanced Research*, *6*(2), 105–121. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006>
- Ai, J., Li, K., Li, J., Yu, F., & Ma, J. (2021). Super flexible, fatigue resistant, self-healing PVA/xylan/borax hydrogel with dual-crosslinked network. *International Journal of Biological Macromolecules*, *172*, 66–73. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2021.01.038>
- Alekhina, M., Mikkonen, K. S., Alén, R., Tenkanen, M., & Sixta, H. (2014). Carboxymethylation of alkali extracted xylan for preparation of bio-based packaging films. *Carbohydrate Polymers*, *100*, 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.03.048>

- Arredondo Peñaranda, A., & Londoño López, M. E. (2009). Hidrogeles: Potenciales Biomateriales Para La Liberación Controlada De Medicamentos. *Revista Ingeniería Biomédica*, 3(5), 83–94. <https://doi.org/10.24050/19099762.n5.2009.70>
- Aswathy, S. H., Narendrakumar, U., & Manjubala, I. (2020). Commercial hydrogels for biomedical applications. *Heliyon*, 6(4), e03719. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2020.E03719>
- Bahram, M., Mohseni, N., & Moghtader, M. (2016). An Introduction to Hydrogels and Some Recent Applications. *Emerging Concepts in Analysis and Applications of Hydrogels*, April 2018. <https://doi.org/10.5772/64301>
- Belmokaddem, F. Z., Pinel, C., Huber, P., Petit-Conil, M., & Da Silva Perez, D. (2011). Green synthesis of xylan hemicellulose esters. *Carbohydrate Research*, 346(18), 2896–2904. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2011.10.012>
- Bhatia, L., Sharma, A., Bachheti, R. K., & Chandel, A. K. (2019). Lignocellulose derived functional oligosaccharides: production, properties, and health benefits. *Preparative Biochemistry and Biotechnology*, 49(8), 744–758. <https://doi.org/10.1080/10826068.2019.1608446>
- Börjesson, M., Larsson, A., Westman, G., & Ström, A. (2018). Periodate oxidation of xylan-based hemicelluloses and its effect on their thermal properties. *Carbohydrate Polymers*, 202, 280–287. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2018.08.110>
- Brienzo, M., Carvalho, A. F. A., Figueiredo, F., & de Oliva Neto, P. (2016). SUGARCANE BAGASSE HEMICELLULOSE PROPERTIES, EXTRACTION TECHNOLOGIES AND XYLOOLIGOSACCHARIDES PRODUCTION. *Food Waste: Practices, Management and Challenges*, 155–188.

- Brodin, M., Vallejos, M., Opedal, M. T., Area, M. C., & Chinga-Carrasco, G. (2017). Lignocellulosics as sustainable resources for production of bioplastics – A review. *Journal of Cleaner Production*, *162*, 646–664. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.209>
- Bush, J. R., Liang, H., Dickinson, M., & Botchwey, E. A. (2016). Xylan hemicellulose improves chitosan hydrogel for bone tissue regeneration. *Polymers for Advanced Technologies*, *27*(8), 1050–1055. <https://doi.org/10.1002/pat.3767>
- Butardo, V. M., & Sreenivasulu, N. (2016). Tailoring Grain Storage Reserves for a Healthier Rice Diet and its Comparative Status with Other Cereals. *International Review of Cell and Molecular Biology*, *323*, 31–70. <https://doi.org/10.1016/bs.ircmb.2015.12.003>
- CÁMARA DE COMERCIO DE BUCARAMANGA. (2018). *ACTIVIDAD AGRÍCOLA PROVINCIAS DE SANTANDER. Número 4, 1.* <https://www.camaradirecta.com/temas/documentos/pdf/informes/actualidad-provincias/agricola-provincias-santander-c2014.pdf>
- Cao, X., Peng, X., Zhong, L., & Sun, R. (2014). Multiresponsive hydrogels based on xylan-type hemicelluloses and photoisomerized azobenzene copolymer as drug delivery carrier. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *62*(41), 10000–10007. <https://doi.org/10.1021/jf504040s>
- Chacón Leal, C. A., & Herrera Arias, G. (2018). *PRODUCCIÓN DE XILOOLIGOSACÁRIDOS (XOS) MEDIANTE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA DE HEMICELULOSA EXTRAÍDA DEL PERGAMINO DE CAFÉ.* Universidad Industrial de Santander.

- Chadni, M., Bals, O., Ziegler-Devin, I., Brosse, N., & Grimi, N. (2019). Microwave-assisted extraction of high-molecular-weight hemicelluloses from spruce wood. *Comptes Rendus Chimie*, 22(8), 574–584. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2019.07.002>
- Chadni, M., Grimi, N., Bals, O., Ziegler-Devin, I., & Brosse, N. (2019). Steam explosion process for the selective extraction of hemicelluloses polymers from spruce sawdust. *Industrial Crops and Products*, 141(January), 111757. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111757>
- Chadni, M., Grimi, N., Bals, O., Ziegler-Devin, I., Desobry, S., & Brosse, N. (2020). Elaboration of hemicellulose-based films: Impact of the extraction process from spruce wood on the film properties. *Carbohydrate Research*, 497, 108–111. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2020.108111>
- Chang, M., Liu, X., Meng, L., Wang, X., & Ren, J. (2018). Xylan-based hydrogels as a potential carrier for drug delivery: Effect of pore-forming agents. *Pharmaceutics*, 10(4), 261. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics10040261>
- Chowdhury, N., Solaiman, Roy, C. K., Firoz, S. H., Foyez, T., & Imran, A. Bin. (2021). Role of Ionic Moieties in Hydrogel Networks to Remove Heavy Metal Ions from Water. *ACS Omega*, 6(1), 836–844. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05411>
- Cobos León, E. J. (2021). *ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE LA PRODUCCIÓN DE XILOOLIGOSACÁRIDOS A PARTIR DE BAGAZO DE CAÑA PANELERA*. Universidad Industrial de Santander.

- Da Costa Urtiga, S. C., Oliveira Alves, V. M., Oliveira Melo, C. de, Lima, M. N. de, Souza, E., Pacheco Cunha, A., Silva Ricardo, N. M. P., Oliveira, E. E., & Egito, E. S. T. do. (2020). Xylan microparticles for controlled release of mesalamine: Production and physicochemical characterization. *Carbohydrate Polymers*, 250, 116929. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2020.116929>
- Dahmen, N., Lewandowski, I., Zibek, S., & Weidtmann, A. (2019). Integrated lignocellulosic value chains in a growing bioeconomy: Status quo and perspectives. *GCB Bioenergy*, 11(1), 107–117. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12586>
- Dash, M., Ferri, M., & Chiellini, F. (2012). Synthesis and characterization of semi-interpenetrating polymer network hydrogel based on chitosan and poly(methacryloylglycylglycine). *Materials Chemistry and Physics*, 135(2–3), 1070–1076. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.06.019>
- Dixit, R. P., & Puthli, S. P. (2009). Oral strip technology: Overview and future potential. *Journal of Controlled Release*, 139(2), 94–107. <https://doi.org/10.1016/J.JCONREL.2009.06.014>
- Drobny, J. G. (2020). Introduction. In *Applications of Fluoropolymer Films* (pp. 3–38). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816128-9.00001-5>
- Edlund, U., Ryberg, Y. Z., & Albertsson, A. C. (2010). Barrier films from renewable forestry waste. *Biomacromolecules*, 11(9), 2532–2538. <https://doi.org/10.1021/bm100767g>
- Ermis, M., Calamak, S., Kocal, G. C., Guven, S., Durmus, N. G., Rizvi, I., Hasan, T., Hasirci, N., Hasirci, V., & Demirci, U. (2018). Hydrogels as a new platform to recapitulate the tumor microenvironment. *Handbook of Nanomaterials for Cancer Theranostics*, 463–494. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813339-2.00015-3>

- Escalante, A., Gonçalves, A., Bodin, A., Stepan, A., Sandström, C., Toriz, G., & Gatenholm, P. (2012). Flexible oxygen barrier films from spruce xylan. *Carbohydrate Polymers*, 87(4), 2381–2387. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.11.003>
- Escalante, H., Orduz, J., Zapata, H., Cardona, M., & Duarte, M. (2010). *Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia* (Ediciones UIS).
- Flórez-Pardo, L. M., González-Córdoba, A., & López-Galán, J. E. (2018). Evaluation of different methods for efficient extraction of hemicelluloses leaves and tops of sugarcane. *DYNA (Colombia)*, 85(204), 18–27. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n204.66626>
- Fonseca Silva, T. C., Habibi, Y., Colodette, J. L., & Lucia, L. A. (2011). The influence of the chemical and structural features of xylan on the physical properties of its derived hydrogels. *Soft Matter*, 7(3), 1090–1099. <https://doi.org/10.1039/c0sm00868k>
- Fu, G.-Q., Hu, Y.-J., Bian, J., Li, M.-F., Peng, F., & Sun, R.-C. (2019). Isolation, Purification, and Potential Applications of Xylan. *Production of Materials from Sustainable Biomass Resources*, 3–35. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3768-0_1
- Fu, G. Q., Zhang, S. C., Chen, G. G., Hao, X., Bian, J., & Peng, F. (2020). Xylan-based hydrogels for potential skin care application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 158, 244–250. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.235>
- Fundador, N. G. V., Enomoto-Rogers, Y., Takemura, A., & Iwata, T. (2012). Syntheses and characterization of xylan esters. *Polymer*, 53(18), 3885–3893. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2012.06.038>

- Gami, P., Kundu, D., Seera, S. D. K., & Banerjee, T. (2020). Chemically crosslinked xylan- β -Cyclodextrin hydrogel for the in vitro delivery of curcumin and 5-Fluorouracil. *International Journal of Biological Macromolecules*, *158*, 18–31. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.237>
- Gao, C. D., Ren, J. L., Wang, S. Y., Sun, R. C., & Zhao, L. H. (2014). Preparation of polyvinyl alcohol/xylan blending films with 1,2,3,4-butane tetracarboxylic acid as a new plasticizer. *Journal of Nanomaterials*, *2014*, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2014/764031>
- Gao, C., Ren, J., Kong, W., Sun, R., & Chen, Q. (2015). Comparative study on temperature/pH sensitive xylan-based hydrogels: Their properties and drug controlled release. *RSC Advances*, *5*(110), 90671–90681. <https://doi.org/10.1039/c5ra16703e>
- Gao, C., Ren, J., Zhao, C., Kong, W., Dai, Q., Chen, Q., Liu, C., & Sun, R. (2016). Xylan-based temperature/pH sensitive hydrogels for drug controlled release. *Carbohydrate Polymers*, *151*, 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.05.075>
- García-Uriostegui, L., Delgado, E., Meléndez-Ortiz, H. I., Camacho-Villegas, T. A., Esquivel-Solís, H., Gatenholm, P., & Toriz, G. (2018). Spruce xylan/HEMA-SBA15 hybrid hydrogels as a potential scaffold for fibroblast growth and attachment. *Carbohydrate Polymers*, *201*, 490–499. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.08.066>
- Gelman, R. A., Harrington, J. C., & Vaynberg, K. A. (2008). Insight into the inversion mechanism of an inverse polymer emulsion. *Langmuir*, *24*(22), 12727–12729. <https://doi.org/10.1021/la8013656>
- Gordobil, O., Egiúés, I., Urruzola, I., & Labidi, J. (2014). Xylan-cellulose films: Improvement of hydrophobicity, thermal and mechanical properties. *Carbohydrate Polymers*, *112*, 56–62. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.05.060>

- Gröndahl, M., & Gatenholm, P. (2007). Oxygen barrier films based on xylans isolated from biomass. *Materials, Chemicals, and Energy from Forest Biomass*, 9, 137–152. <https://doi.org/10.1021/bk-2007-0954.ch009>
- Guerrero Serrano, J. M. (2018). *EVALUACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA LA PURIFICACIÓN DE HIDROLIZADOS DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA RESIDUAL DE LA AGROINDUSTRIA COLOMBIANA*. Universidad Industrial de Santander.
- Hansen, N. M. L., Blomfeldt, T. O. J., Hedenqvist, M. S., & Plackett, D. V. (2012). Properties of plasticized composite films prepared from nanofibrillated cellulose and birch wood xylan. *Cellulose*, 19(6), 2015–2031. <https://doi.org/10.1007/s10570-012-9764-7>
- Hassan, S. S., Williams, G. A., & Jaiswal, A. K. (2019). Lignocellulosic Biorefineries in Europe: Current State and Prospects. *Trends in Biotechnology*, 37(3), 231–234. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2018.07.002>
- Hernández Grimaldos, M. A. (2019). *CARACTERIZACIÓN DE OLIGOSACÁRIDOS Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE PURIFICACIÓN*. Universidad Industrial de Santander.
- Hiloidhari, M., Bhuyan, N., Gogoi, N., Seth, D., Garg, A., Singh, A., Prasad, S., & Katak, R. (2020). Agroindustry wastes: Biofuels and biomaterials feedstocks for sustainable rural development. *Refining Biomass Residues for Sustainable Energy and Bioproducts*, 357–388. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818996-2.00016-8>
- Höjje, A., Gröndahl, M., Tømmeraas, K., & Gatenholm, P. (2005). Isolation and characterization of physicochemical and material properties of arabinoxylans from barley husks. *Carbohydrate Polymers*, 61(3), 266–275. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2005.02.009>

- Jin, X., Hu, Z., Wu, S., Song, T., Yue, F., & Xiang, Z. (2019). Promoting the material properties of xylan-type hemicelluloses from the extraction step. *Carbohydrate Polymers*, 215, 235–245. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.03.092>
- Karki, S., Kim, H., Na, S. J., Shin, D., Jo, K., & Lee, J. (2016). Thin films as an emerging platform for drug delivery. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 11(5), 559–574. <https://doi.org/10.1016/J.AJPS.2016.05.004>
- Karrou, Y., Neut, C., Wils, D., Siepmann, F., Deremaux, L., Flament, M. P., Dubreuil, L., Desreumaux, P., & Siepmann, J. (2009). Novel polymeric film coatings for colon targeting: Drug release from coated pellets. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 37(3–4), 427–433. <https://doi.org/10.1016/J.EJPS.2009.03.014>
- Khaleghi, M., Ahmadi, E., Khodabandeh Shahraki, M., Aliakbari, F., & Morshedi, D. (2020). Temperature-dependent formulation of a hydrogel based on Hyaluronic acid-polydimethylsiloxane for biomedical applications. *Heliyon*, 6(3), e03494. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03494>
- Kondaveeti, S., Damato, T. C., Carmona-Ribeiro, A. M., Sierakowski, M. R., & Petri, D. F. S. (2017). Sustainable hydroxypropyl methylcellulose/xyloglucan/gentamicin films with antimicrobial properties. *Carbohydrate Polymers*, 165, 285–293. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2017.02.066>
- Kondiah, P. P. D., Choonara, Y. E., Marimuthu, T., Kondiah, P. J., du Toit, L. C., Kumar, P., & Pillay, V. (2020). Nanotechnological paradigms for neurodegenerative disease interventions. *Advanced 3D-Printed Systems and Nanosystems for Drug Delivery and Tissue Engineering*, 277–292. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818471-4.00010-8>

- Kong, W., Chang, M., Zhang, C., Liu, X., He, B., & Ren, J. (2019). Preparation of xylan-g-P(AA-co-AM)/GO nanocomposite hydrogel and its adsorption for heavy metal ions. *Polymers*, *11*(4), 1–13. <https://doi.org/10.3390/polym11040621>
- Kong, W. Q., Gao, C. D., Hu, S. F., Ren, J. L., Zhao, L. H., & Sun, R. C. (2017). Xylan-modified-based hydrogels with temperature/pH dual sensitivity and controllable drug delivery behavior. *Materials*, *10*(3). <https://doi.org/10.3390/ma10030304>
- Kulal, P., & Badalamoole, V. (2020). Efficient removal of dyes and heavy metal ions from waste water using Gum ghatti - graft - poly(4-acryloylmorpholine) hydrogel incorporated with magnetite nanoparticles. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *8*(5), 104207. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104207>
- Kundu, D., & Banerjee, T. (2019). Carboxymethyl Cellulose-Xylan Hydrogel: Synthesis, Characterization, and in Vitro Release of Vitamin B 12. *ACS Omega*, *4*(3), 4793–4803. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b03671>
- Laine, C., Harlin, A., Hartman, J., Hyvärinen, S., Kammiovirta, K., Krogerus, B., Pajari, H., Rautkoski, H., Setälä, H., Sievänen, J., Uotila, J., & Vähä-Nissi, M. (2013). Hydroxyalkylated xylans – Their synthesis and application in coatings for packaging and paper. *Industrial Crops and Products*, *44*, 692–704. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2012.08.033>
- Lamaoui, A., García-Guzmán, J. J., Amine, A., Palacios-Santander, J. M., & Cubillana-Aguilera, L. (2021). Synthesis techniques of molecularly imprinted polymer composites. *Molecularly Imprinted Polymer Composites*, 49–91. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819952-7.00002-0>

- Leal Gutiérrez, M. J. (2017). *PRODUCCIÓN DE OLIGOSACÁRIDOS MEDIANTE AUTOHIDRÓLISIS DE RESIDUOS PROVENIENTES DE LA CADENA AGROINDUSTRIAL DEL CAFÉ*. Universidad Industrial de Santander.
- Li, Jianyu, & Mooney, D. J. (2016). Designing hydrogels for controlled drug delivery. *Nature Reviews Materials*, *1*(12), 1–18. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.71>
- Li, Juan, Lu, Z., Chen, Z., Li, C., Du, Y., Chen, C., Wang, L., & Yu, P. (2021). Preparation and characterization of pH-responsive microgel using arabinoxylan from wheat bran for BSA delivery. *Food Chemistry*, *342*, 128220. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128220>
- Lin, Y., Fang, G., Deng, Y., Shen, K., Huang, C., & Wu, T. (2019). A pH-sensitive xylan-based superabsorbent hydrogel for the removal of methylene blue from water. *BioResources*, *14*(3), 5573–5585. <https://doi.org/10.15376/biores.14.3.5573-5585>
- Liu, A. L., & García, A. J. (2016). Methods for Generating Hydrogel Particles for Protein Delivery. *Annals of Biomedical Engineering*, *44*(6), 1946–1958. <https://doi.org/10.1007/s10439-016-1637-z>
- Lucena, C. A. A. De, Costa, S. C. Da, Eleamen, G. R. D. A., Mendonça, E. A. D. M., & Oliveira, E. E. (2017). Desenvolvimento de biofilmes à base de xilana e xilana/gelatina para produção de embalagens biodegradáveis. *Polimeros*, *27*, 35–41. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.2223>
- Lynch, C. R., Kondiah, P. P. D., Choonara, Y. E., du Toit, L. C., Ally, N., & Pillay, V. (2020). Hydrogel Biomaterials for Application in Ocular Drug Delivery. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *8*, 1–18. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00228>

- Madduma-Bandarage, U. S. K., & Madihally, S. V. (2021). Synthetic hydrogels: Synthesis, novel trends, and applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(19), 1–23. <https://doi.org/10.1002/app.50376>
- Mahajan, H. S., & Deshmukh, S. R. (2015). Development and evaluation of gel-forming ocular films based on xyloglucan. *Carbohydrate Polymers*, 122, 243–247. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2015.01.018>
- Manals-Cutiño, E., Salas-Tort, D., & Penedo-Medina, M. (2018). Caracterización de la biomasa vegetal cascarilla de café. *Tecnología Química*, 38(1), 169–181. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852018000100013&lng=es&tlng=es
- Mataavire, T. O. (2018). *Extraction and modification of hemicellulose from wheat bran to produce entrapment materials for the controlled release of chemicals and bioactive substances*. [Stellenbosch University]. <http://hdl.handle.net/10019.1/103529>
- Mathur, A. M., Moorjani, S. K., & Scranton, A. B. (1996). Methods for synthesis of hydrogel networks: A review. *Journal of Macromolecular Science - Reviews in Macromolecular Chemistry and Physics*, 36(2), 405–430. <https://doi.org/10.1080/15321799608015226>
- Mihiretu, G. T., Chimphango, A. F., & Görgens, J. F. (2019). Steam explosion pre-treatment of alkali-impregnated lignocelluloses for hemicelluloses extraction and improved digestibility. *Bioresource Technology*, 294, 122121. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122121>
- Mikkonen, K. S., Laine, C., Kontro, I., Talja, R. A., Serimaa, R., & Tenkanen, M. (2015). Combination of internal and external plasticization of hydroxypropylated birch xylan tailors the properties of sustainable barrier films. *European Polymer Journal*, 66, 307–318. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2015.02.034>

Minagricultura. (2019). *INFORME RENDICIÓN DE CUENTAS 2018 - 2019*.

<https://www.minagricultura.gov.co/planeacion-control->

[gestion/Gestin/INFORMES_RENDICION_DE_CUENTAS/INFORME](https://www.minagricultura.gov.co/planeacion-control-gestion/Gestin/INFORMES_RENDICION_DE_CUENTAS/INFORME) DE

RENDICION DE CUENTAS 2018 - 2019.pdf

Moncada, O., & Castro, S. V. (2016). *CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS DE RESIDUOS*

LIGNOCELULÓSICOS, RAQUIS DE PALMA AFRICANA Y BAGAZO DE CAÑA, PARA

VISUALIZAR SU POTENCIAL EN LA PRODUCCIÓN DE ETANOL DE SEGUNDA

GENERACIÓN. ORLANDO (Vol. 24, Issue 6) [UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS].

<https://doi.org/10.1080/00033799300200371>

Morais De Carvalho, D., Marchand, C., Berglund, J., Lindström, M. E., Vilaplana, F., &

Sevastyanova, O. (2020). Impact of birch xylan composition and structure on film

formation and properties. *Holzforschung*, 74(2), 184–196. <https://doi.org/10.1515/hf->

2018-0224

Naidu, D. S., Hlangothi, S. P., & John, M. J. (2018). Bio-based products from xylan: A review.

Carbohydrate Polymers, 179, 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.09.064>

Panthapulakkal, F. S. (2014). *Microwave Assisted Extraction of Xylan* [University of Toronto].

<https://central.bac-lac.gc.ca/.item?id=TC-OTU->

65713&op=pdf&app=Library&oclc_number=1032908559

Panthapulakkal, S., Kirk, D., & Sain, M. (2014). Alkaline extraction of xylan from wood using

microwave and conventional heating. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(4), 1–10.

<https://doi.org/10.1002/app.41330>

- Park, H., Guo, X., Temenoff, J. S., Tabata, Y., Caplan, A. I., & Mikos, A. G. (2009). Effect of swelling ratio of injectable hydrogel composites on chondrogenic differentiation of encapsulated rabbit marrow mesenchymal stem cells in vitro. *Biomacromolecules*, *10*(3), 541–546. <https://doi.org/10.1021/bm801197m>
- Peng, P., Zhai, M., She, D., & Gao, Y. (2015). Synthesis and characterization of carboxymethyl xylan-g-poly(propylene oxide) and its application in films. *Carbohydrate Polymers*, *133*, 117–125. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2015.07.009>
- Peng, X., Ren, J., Zhong, L., Sun, R., Shi, W., & Hu, B. (2012). Glycidyl methacrylate derivatized xylan-rich hemicelluloses: Synthesis and characterizations. *Cellulose*, *19*(4), 1361–1372. <https://doi.org/10.1007/s10570-012-9718-0>
- Peng, X. W., Ren, J. L., & Sun, R. C. (2010). Homogeneous esterification of xylan-rich hemicelluloses with maleic anhydride in ionic liquid. *Biomacromolecules*, *11*(12), 3519–3524. <https://doi.org/10.1021/bm1010118>
- Philippini, R. R., Martiniano, S. E., Ingle, A. P., Franco Marcelino, P. R., Silva, G. M., Barbosa, F. G., dos Santos, J. C., & da Silva, S. S. (2020). Agroindustrial Byproducts for the Generation of Biobased Products: Alternatives for Sustainable Biorefineries. *Frontiers in Energy Research*, *8*. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00152>
- Qian, E. W. (2013). Pretreatment and Saccharification of Lignocellulosic Biomass. In *Research Approaches to Sustainable Biomass Systems* (pp. 181–204). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404609-2.00007-6>
- Queirós, L. C. C., Sousa, S. C. L., Duarte, A. F. S., Domingues, F. C., & Ramos, A. M. M. (2017). Development of carboxymethyl xylan films with functional properties. *Journal of Food Science and Technology*, *54*(1), 9–17. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2389-3>

- Quintero Prada, L. V., & Riaño Núñez, D. L. (2019). *EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE XILOOLIGOSACÁRIDOS MEDIANTE AUTOHIDRÓLISIS DE BAGAZO DE CAÑA PANELERA A ESCALA PILOTO*. 2019. Laura Valentina Quintero Prada, Dayra Lisseth Riaño Núñez. Universidad Industrial de Santander.
- Ramos, A., Sousa, S., Evtuguin, D. V., & Gamelas, J. A. F. (2017). Functionalized xylans in the production of xylan-coated paper laminates. *Reactive and Functional Polymers*, 117, 89–96. <https://doi.org/10.1016/J.REACTFUNCTPOLYM.2017.06.006>
- Rao, J., Lv, Z., Chen, G., Hao, X., Guan, Y., & Peng, F. (2021). Fabrication of flexible composite film based on xylan from pulping process for packaging application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 173, 285–292. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2021.01.128>
- Roos, A. A., Persson, T., Krawczyk, H., Zacchi, G., & Stålbrand, H. (2009). Extraction of water-soluble hemicelluloses from barley husks. *Bioresource Technology*, 100(2), 763–769. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.07.022>
- Sabiha-Hanim, S., Mohd Noor, M. A., & Rosma, A. (2015). Fractionation of oil palm frond hemicelluloses by water or alkaline impregnation and steam explosion. *Carbohydrate Polymers*, 115, 533–539. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.08.087>
- Sanabria Cucunuva, J. R. (2016). *CARACTERIZACION DE BIOMASA RESIDUAL AGRICOLA PARA LA EVALUACION DE SU USO COMO MATERIA PRIMA EN LA PRODUCCION DE OLIGOSACARIDOS*. Universidad Industrial de Santander.

- Sánchez, F., Agudín, F., & San Miguel, G. (2017). Granular activated carbons from avocado seeds. *15th International Conference on Environmental Science and Technology*, 00934, 1–5.
https://cest2017.gnest.org/sites/default/files/presentation_file_list/cest2017_00934_oral_paper.pdf
- Sandoval Jaimes, M. L., & Viviescas Ayala, P. A. (2017). *AUTOHIDRÓLISIS DE RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS DE LA AGROINDUSTRIA COLOMBIANA: ANÁLISIS DEL PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE XILO-OLIGOSACÁRIDOS (XOs)*. Universidad Industrial de Santander.
- Scheller, H. V., & Ulvskov, P. (2010). Hemicelluloses. *Annual Review of Plant Biology*, 61, 263–289. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112315>
- Seera, S. D. K., Kundu, D., Gami, P., Naik, P. K., & Banerjee, T. (2021). Synthesis and characterization of xylan-gelatin cross-linked reusable hydrogel for the adsorption of methylene blue. *Carbohydrate Polymers*, 256, 117520.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117520>
- Shalla, A. H., Yaseen, Z., Bhat, M. A., Rangreez, T. A., & Maswal, M. (2019). Recent review for removal of metal ions by hydrogels. *Separation Science and Technology (Philadelphia)*, 54(1), 89–100. <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1503307>
- Sousa, S., Pedrosa, J., Ramos, A., Ferreira, P. J., & Gamelas, J. A. F. (2016). Surface properties of xylan and xylan derivatives measured by inverse gas chromatography. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 506, 600–606.
<https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2016.07.006>

- Sousa, S., Ramos, A., Evtuguin, D. V., & Gamelas, J. A. F. (2016). Xylan and xylan derivatives—Their performance in bio-based films and effect of glycerol addition. *Industrial Crops and Products*, *94*, 682–689. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.031>
- Sun, X.-F., Jing, Z., Wang, H., & Liu, Y. (2014). Physical–Chemical Properties of Xylan/PAAc Magnetic Semi-Interpenetrating Network Hydrogel. *Polymer Composites*, *36*(12), 2317–2325. <https://doi.org/10.1002/pc.23145>
- Sun, X. F., Liu, B., Jing, Z., & Wang, H. (2015). Preparation and adsorption property of xylan/poly(acrylic acid) magnetic nanocomposite hydrogel adsorbent. *Carbohydrate Polymers*, *118*, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.11.013>
- Sun, X. F., Wang, H. H., Jing, Z. X., & Mohanathas, R. (2013). Hemicellulose-based pH-sensitive and biodegradable hydrogel for controlled drug delivery. *Carbohydrate Polymers*, *92*(2), 1357–1366. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.10.032>
- Svärd, A., Brännvall, E., & Edlund, U. (2015). Rapeseed straw as a renewable source of hemicelluloses: Extraction, characterization and film formation. *Carbohydrate Polymers*, *133*, 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.07.023>
- Svärd, A., Brännvall, E., & Edlund, U. (2017). Rapeseed straw polymeric hemicelluloses obtained by extraction methods based on severity factor. *Industrial Crops and Products*, *95*, 305–315. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.038>
- Tulain, U. R., Ahmad, M., & Rashid, A. (2018). Development, in vitro and in vivo evaluation of hydrogel based system of carboxymethyl arabinoxylan for controlled delivery of rabeprazole sodium. *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, *57*(17), 1771–1783. <https://doi.org/10.1080/03602559.2018.1434668>

- Van Vlierberghe, S., Dubruel, P., & Schacht, E. (2011). Biopolymer-based hydrogels as scaffolds for tissue engineering applications: A review. *Biomacromolecules*, *12*(5), 1387–1408. <https://doi.org/10.1021/bm200083n>
- Varghese, S. A., Rangappa, S. M., Siengchin, S., & Parameswaranpillai, J. (2020). Natural polymers and the hydrogels prepared from them. *Hydrogels Based on Natural Polymers*, 17–47. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816421-1.00002-1>
- Wang, S., Ren, J., Li, W., Sun, R., & Liu, S. (2014). Properties of polyvinyl alcohol/xylan composite films with citric acid. *Carbohydrate Polymers*, *103*(1), 94–99. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.12.030>
- Wang, W., Narain, R., & Zeng, H. (2020). Chapter 10 - Hydrogels. In *Polymer Science and Nanotechnology* (pp. 203–244). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816806-6.00010-8>
- Xu, X., Heath, C., Pejcic, B., & Wood, C. D. (2018). CO₂ capture by amine infused hydrogels (AIHs). *Journal of Materials Chemistry A*, *6*(11), 4829–4838. <https://doi.org/10.1039/c8ta00602d>
- Xu, X., & Wood, C. D. (2018). A Highly Tunable Approach to Enhance CO₂ Capture with Liquid Alkali/amines. *Environmental Science and Technology*, *52*(18), 10874–10882. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02641>
- Xu, X., Yang, Y., Acencios Falcon, L. P., Hazewinkel, P., & Wood, C. D. (2019). Carbon capture by DEA-infused hydrogels. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, *88*, 226–232. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2019.06.005>

- Yang, Y. C., Mei, X. W., Hu, Y. J., Su, L. Y., Bian, J., Li, M. F., Peng, F., & Sun, R. C. (2019). Fabrication of antimicrobial composite films based on xylan from pulping process for food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, *134*, 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.021>
- Yasin, N. M. F. M., Meri, N. H., Talib, N., Ghani, W. A. W. A. K., Rashid, Z. A., & Alias, A. B. (2021). Breakthrough Analysis of Empty Fruit Bunch-Based Hydrogel Biochar Composite (EFB-HBC) for Hydrogen Sulphide (H₂S) Adsorption Study Removal. *Advances in Engineering Research*, *200*, 216–225. <https://doi.org/10.2991/aer.k.201229.030>
- Yousefi, P., Hamed, S., Garmaroudy, E. R., & Koosha, M. (2020). Antibacterial nanobiocomposite based on halloysite nanotubes and extracted xylan from bagasse pith. *International Journal of Biological Macromolecules*, *160*, 276–287. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2020.05.209>
- Yue, M., Hoshino, Y., Ohshiro, Y., Imamura, K., & Miura, Y. (2014). Temperature-responsive microgel films as reversible carbon dioxide absorbents in wet environment. *Angewandte Chemie - International Edition*, *53*(10), 2654–2657. <https://doi.org/10.1002/anie.201309758>
- Zhang, S., Guan, Y., Fu, G. Q., Chen, B. Y., Peng, F., Yao, C. L., & Sun, R. C. (2014). Organic/inorganic superabsorbent hydrogels based on xylan and montmorillonite. *Journal of Nanomaterials*, *2014*, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2014/675035>
- Zhang, Y., Pitkänen, L., Douglade, J., Tenkanen, M., Remond, C., & Joly, C. (2011). Wheat bran arabinoxylans: Chemical structure and film properties of three isolated fractions. *Carbohydrate Polymers*, *86*(2), 852–859. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2011.05.036>

- Zheng, Y., Xie, Y., & Wang, A. (2012). Rapid and wide pH-independent ammonium-nitrogen removal using a composite hydrogel with three-dimensional networks. *Chemical Engineering Journal*, 179, 90–98. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2011.10.064>
- Zhong, L., Peng, X., Song, L., Yang, D., Cao, X., & Sun, R. (2013). Adsorption of Cu²⁺ and Ni²⁺ from Aqueous Solution by Arabinoxylan Hydrogel: Equilibrium, Kinetic, Competitive Adsorption. *Separation Science and Technology (Philadelphia)*, 48(17), 2659–2669. <https://doi.org/10.1080/01496395.2013.804085>
- Zhou, X., Broadbelt, L. J., & Vinu, R. (2016). Mechanistic Understanding of Thermochemical Conversion of Polymers and Lignocellulosic Biomass. In *Advances in Chemical Engineering* (1st ed., Vol. 49). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.ache.2016.09.002>
- Zumárraga J. A. (2012). EFECTO DE LOS PRETRATAMIENTOS HIDROTÉRMICOS EN LA COMPOSICIÓN QUÍMICA Y LA SACARIFICACIÓN DEL BAGAZO DE Agave tequilana. *Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.*, 32. https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/676/1/PCER_M_Tesis_2012_Jose_Alberto_Zumarraga_Pech.pdf

APÉNDICES

APÉNDICE A. ECUACIONES DE BÚSQUEDA Y RESULTADOS

Tabla A1

Estructura de la ecuación de búsqueda y resultados

Tópico	Ecuación de búsqueda	Base de datos	
		Scopus	Web of science
Biomateriales a base de xilano	TITLE-ABS-KEY (hemicellulose OR xylan) AND (biomaterials OR films OR hydrogel OR coatings OR foams)	512 documentos	224 documentos
Métodos de extracción de hemicelulosa de tipo xilano	extraction AND (hemicellulose OR xylan) AND (biomaterials OR films OR hydrogel OR coatings OR foams)	101 documentos	219 documentos

**APÉNDICE B. CULTIVOS PERMANENTES Y TRANSITORIOS EN EL
DEPARTAMENTO DE SANTANDER**

Tabla B1

Área plantada y producción anual en toneladas de algunos cultivos permanentes en el departamento de Santander.

Cultivos permanentes		
Tipo	Área plantada [ha]	Producción anual [ton]
Café	57.045	52.799
Caña panelera	19.501	180.965
Palma de aceite	84.779	347.450
Cacao	51.790	27.825
Aguacate	4.920	59.463
Banano	1.540	13.901
Guayaba	3.332	47.009
Limón	1.435	15.949
Lulo	269	3.336
Mandarina	7.545	15.978
Mango	137	2.369
Maracuyá	465	6.910
Mora	3.234	32.138
Naranja	4.319	85.297
Plátano	8.760	66.449

Nota. Adaptado de *Reporte Comparativo de Área, Producción, Rendimiento y Participación Departamental por Cultivo* por Agronet, 2019 (<https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=3>).

Tabla B2

Área plantada y producción anual en toneladas de algunos cultivos transitorios en el departamento de Santander

Cultivos transitorios		
Tipo	Área plantada [ha]	Producción anual [ton]
Papa	2.962	60.286
Yuca	8.218	109.785
Tabaco rubio	1.428	2.781
Arveja	729	1.553
Cebolla bulbo	1.514	111.512
Cebolla rama	2.573	88.609
Frijol	8.163	8.329

Nota. Adaptado de *Reporte Comparativo de Área, Producción, Rendimiento y Participación Departamental por Cultivo* por Agronet, 2019 (<https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=>

APÉNDICE C. RESULTADOS DEL ANÁLISIS CIENCIOMÉTRICO- HIDROGELES A PARTIR DE XILANO

Durante el periodo 2019- 2020 se registró la mayor publicación de artículos basados en aplicaciones para hidrogeles a partir de xilano con un total de 76 publicaciones (ver Figura C1). Este aumento se puede explicar debido a que el consumo actual de la biomasa lignocelulósica en las industrias de base biológica, en comparación con la disponibilidad total de biomasa, es relativamente pequeño (Hassan et al., 2019). En el 2018 la producción global anual de biomasa fue de aproximadamente 181,5 mil millones de toneladas (Dahmen et al., 2019), por lo que existe una necesidad de encontrar una manera eficiente y ambientalmente viable de darle uso a estas grandes cantidades de residuos.

Figura C1

Evolución del número y tipo de artículos de hidrogeles a partir de xilano publicados en el período 2010-2021



Actualmente el continente europeo tiene el mayor número de estudios publicados, siendo Reino unido, Finlandia y Suecia los mayores contribuyentes. Seguido se encuentra Asia, en donde China se destaca por ser el país con más número de publicaciones de toda la

serie. Finalmente, el continente americano es liderado por Estados Unidos y México, reflejándose una participación muy baja de países latinoamericanos, representada por Brasil y Argentina (ver Figura C2).

Figura C2

Distribución de los artículos de hidrogeles a partir de xilano publicados por país

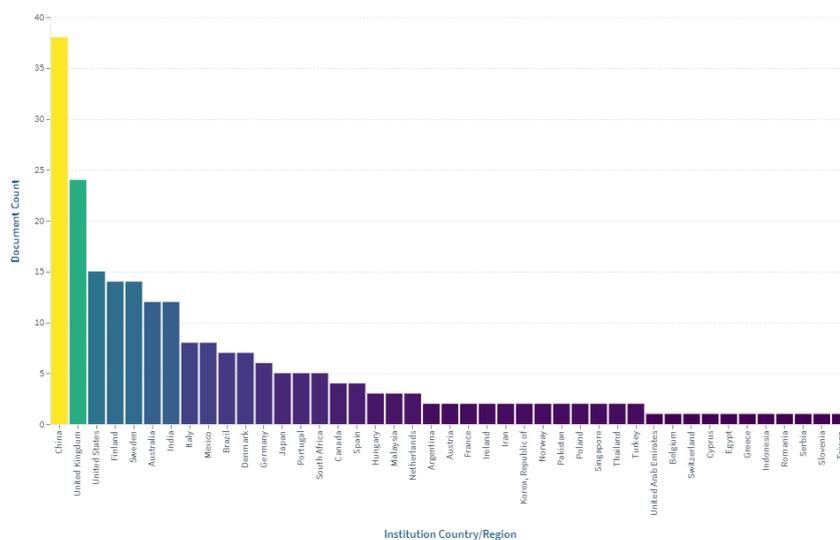
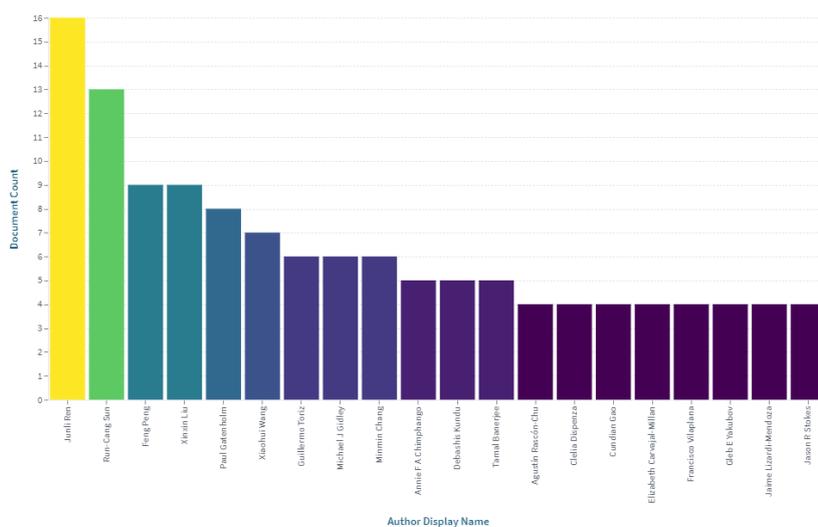


Figura C3

Distribución de los artículos de hidrogeles a partir de xilano publicados por autor

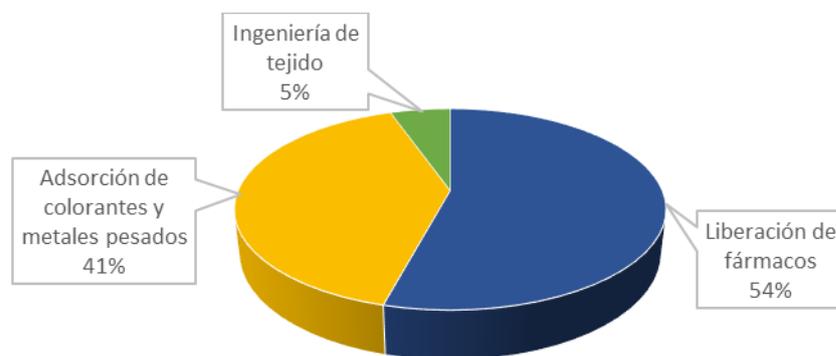


En cuanto a las tendencias en las aplicaciones, de los 235 documentos (teniendo en cuenta artículos de revistas y capítulos de libros) encontrados sobre hidrogeles de xilano, 168

artículos informaron sobre las aplicaciones reportadas en el presente trabajo. De estos 168 artículos se observó que existe una tendencia hacia la liberación de fármacos ya que, 91 fueron dirigidos hacia este tema. Otra aplicación con relevancia es la de adsorción de colorantes y metales pesados, en donde se obtuvieron 68 resultados y finalmente la ingeniería de tejidos con 9 artículos (ver Figura C4).

Figura C4

Tendencias en las aplicaciones de hidrogeles a partir de xilano

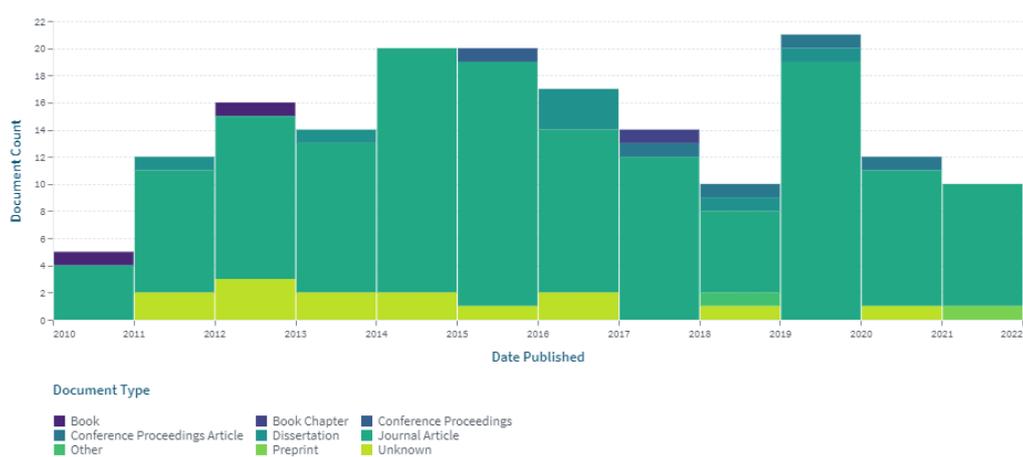


APÉNDICE D. RESULTADOS DEL ANÁLISIS CIENCIOMÉTRICO- PELICULAS A PARTIR DE XILANO

En relación con las películas se encontró que, en los periodos 2014-2016 y 2019-2020 se reportaron la mayor cantidad de artículos con un total de 40 y 21 respectivamente destacando los artículos de revista como los más publicados. La menor cantidad se reportó en el periodo 2010-2011 con un total de 5 artículos (Figura D1).

Figura D1

Evolución del número y tipo de artículos de películas a partir de xilano publicados en el período 2010-2021



China se reporta como el país con mayor cantidad de documentos informados en torno al tema con un total de 29, seguido por Finlandia y Suecia con un total de 19 y 15 documentos respectivamente reportados en el periodo 2010-2021 (Figura D2). Estados Unidos es el país de América con mayor actividad investigativa, seguido por Argentina, México, Brasil y Uruguay los cuales presentan una participación baja respecto al continente europeo y asiático. Los autores más destacados son Junli Ren y Rung-Cang Sun con una cantidad de 10 artículos publicados cada uno (Figura D3).

Figura D2

Distribución de los artículos de películas a partir de xilano publicados por país

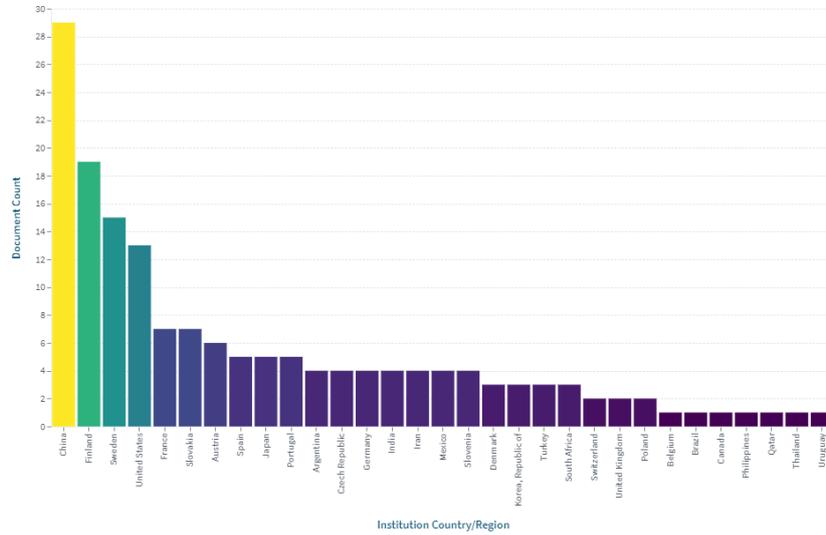
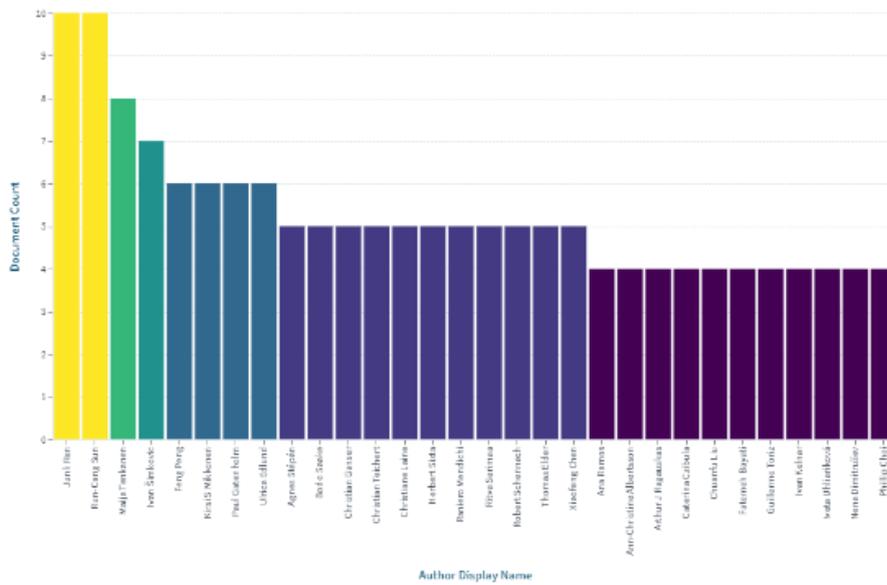


Figura D3

Distribución de los artículos de películas a partir de xilano publicados por autor



APÉNDICE E. MEZCLAS REPORTADAS EN LA LITERATURA PARA LA SÍNTESIS DE HIDROGELES A PARTIR DE XILANO

Tabla E1

Mezclas reportadas en la literatura para hidrogeles a partir xilano

Hemicelulosa	Monómero	Polímero	Reticulante	Componentes adicionales	Referencia
Xilano metacrilado	Ácido acrílico (AA)	-	N, N-metilenbisacrilamida (MBA)	-	(Lin et al., 2019)
Dialdehído xilano (DAX)	-	Gelatina	-	-	(G. Q. Fu et al., 2020)
Xilano	-	Poli (ácido acrílico)	N, N-metilenbisacrilamida (MBA)	Nanopartículas de Fe ₃ O ₄	(X.-F. Sun et al., 2014; X. F. Sun et al., 2015)
Xilano	-	Gelatina	Etilenglicol diglicidil éter (EDGE)	Glicerol	(Seera et al., 2021)
Arabinoxilano	Ácido acrílico (AA)	-	N, N-metilenbisacrilamida (MBA)	-	(Zhong et al., 2013)
Carboximetil xilano	Acrilamida (AM) y N -isopropilacrilamida (NIPAm)	-	N, N-metilenbisacrilamida (MBA)	ZnCl ₂ (Zn ²⁺) y agentes formadores de poro: PEG, PVP, NaCl, NaHCO ₃	(Chang et al., 2018)
Xilano acetilado	Metacrilato de 2-hidroxietilo (HEMA)	-	Metacrilato de 2-hidroxietilo (HEMA)	-	(Fonseca et al., 2011)

Hemicelulosa	Monómero	Polímero	Reticulante	Componentes adicionales	Referencia
Xilano	-	Carboximetil-celulosa (CMC)	Etilenglicol diglicidil éter (EGDE)	-	(Kundu & Banerjee, 2019)
Arabinoxilano	Ácido acrílico (AA)	-	N, N-metilenbisacrilamida (MBA)	-	(X. F. Sun et al., 2013)
Xilano metacrilado	Ácido 4 - [(4-acriloiloxifenil) azo] benzoico (AOPAB) Azobenceno	-	-	-	(Cao et al., 2014)
Carboximetil arabinoxilano	Ácido acrílico (AA)	-	N, N-metilenbisacrilamida (MBA)	-	(Tulain et al., 2018)
Carboximetil arabinoxilano	Solución acuosa de iones Fe^{3+}	-	-	-	(Juan Li et al., 2021)
Hemicelulosa acrilolada	Metacrilato de 2-hidroxietilo (HEMA)	-	-	Sílice mesoporosa (SBA15)	(García et al., 2018)
Xilano modificado con metacrilato de glicidilo	N-isopropilacrilamida (NIPAm) y acrilamida (AM)	-	N, N-metilenbisacrilamida (MBA)	-	(C. Gao et al., 2015)
Xilano modificado con anhídrido maleico	N -isopropilacrilamida (NIPAm) y ácido acrílico (AA)	-	N, N-metilenbisacrilamida (MBA)	-	(W. Q. Kong et al., 2017)
Xilano	Acrilamida (AM) y ácido acrílico (AA)	-	N, N-metilenbisacrilamida (MBA)	Óxido de grafeno (GO) de relleno	(W. Kong et al., 2019)

Hemicelulosa	Monómero	Polímero	Reticulante	Componentes adicionales	Referencia
Xilano	-	β -ciclodextrina	Éter diglicídico de etilenglicol (EGDE)	-	(Gami et al., 2020)
Xilano	-	Alcohol polivinílico	-	Borax	(Ai et al., 2021)
Xilano	-	Quitosano	-	-	(Bush et al., 2016)
Xilano	Ácido acrílico (AA) y ácido 2-acrilamido-2 metilpropanosulfónico (AMPS)	-	N, N-metilenbisacrilamida (MBA)	Montmorillonita (MMT)	(S. Zhang et al., 2014)

APÉNDICE F. SÍNTESIS DE HIDROGELES DE XILANO

Tabla F1

Condiciones del proceso de síntesis de hidrogeles a partir de xilano

Componentes	Método de síntesis	Condiciones	Referencia
Xilano metacrilado y ácido acrílico (AA)	Polimerización por radicales libres	Disolución del xilano en agua y agitado a 60°C en un baño de agua. Adición del ácido acrílico, reticulante (MBA) y el iniciador (APS), reacción durante 4 h.	(Lin et al., 2019)
Xilano y poli (ácido acrílico)	Técnica de red semi-interpenetrante (semi-IPN)	Disolución del xilano en la solución mixta de agua destilada y ácido acrílico. Adición del reticulante (MBA) y nanopartículas de Fe ₃ O ₄ a la solución anterior, la mezcla se agitó usando agitación mecánica bajo irradiación ultrasónica.	(X. F. Sun et al., 2015)
Xilano y gelatina	Reticulación química	Disolución de xilano y gelatina en una solución acuosa de NaOH y su agitación a 65°C. Transferencia de las soluciones a matraces de fondo redondo y en un baño de aceite a 50°C. Adición del reticulante (EGDE) gota a gota durante 30-40 min hasta la formación del gel.	(Seera et al., 2021)
Arabinoxilano (AX) y ácido acrílico (AA)	Copolimerización de injerto	Arabinoxilano disuelto en una solución alcalina en un matraz de tres bocas con un agitador magnético a 85°C durante 90 min con posterior reducción hasta 50°C. Purga de la solución continuamente con gas N ₂ durante 10 min, y adición de APS y TEMDA (iniciadores) agitando 10 min. Posteriormente se añade AA y MBA y se agita durante 2 h. La reacción continúa durante 24 h sin agitación a temperatura ambiente.	(Zhong et al., 2013)
Xilano y carboximetilcelulosa (CMC)	Polimerización reticulante	Disolución de CMC y xilano en solución acuosa de NaOH por separado. Transferencia de las soluciones a matraces de fondo redondo y calentamiento a 50°C. Adición de EGDE gota a gota hasta la gelificación en 15 min.	(Kundu & Banerjee, 2019)

Componentes	Método de síntesis	Condiciones	Referencia
Carboximetil arabinosilano (CMAX) y ácido acrílico (AA)	Polimerización por radicales libres	CMAX disuelto en agua destilada desgasificada a 70°C. Adición del iniciador a la solución bajo agitación durante 10 min. Enfriamiento de la solución a temperatura ambiente y adición del AA y el reticulante bajo agitación magnética. Burbujeo de nitrógeno durante 15-20 min. Calentamiento de la solución de 45°C a 65°C por aumento de 5 grados en una hora. La mezcla de reacción se mantuvo a 65°C durante 8 h.	(Tulain et al., 2018)
Carboximetil arabinosilano (CMAX)	Polimerización por radicales libres (emulsificación inversa)	Fase acuosa de FeSO ₄ ·7H ₂ O en soluciones CMAX. Fase oleosa de Span 80 (emulsificante) en parafina. La fase acuosa se añadió gradualmente a la fase oleosa bajo agitación suave para formar una emulsión de agua en aceite. Bombeo de aire a la emulsión con agitación suave durante 5 h para oxidar Fe ²⁺ en Fe ³⁺ a 35°C.	(Juan Li et al., 2021)
Xilano y N-isopropilacrilamida (NIPAm) y acrilamida (AM)	Copolimerización por injerto con irradiación UV	Disolución de xilano en agua destilada agitada y calentada a 85°C durante 0,5 h con posterior reducción a 50°C. Se agregaron NIPAm, AM y MBA. Después de burbujear N ₂ durante 15 min, se añadió como fotosensibilizador DMPA. La solución se irradió bajo luz ultravioleta (365 nm y 40 W) a temperatura ambiente durante 6 h.	(C. Gao et al., 2015)
Xilano y ácido acrílico (AA)	Polimerización por radicales libres	Xilano disuelto en agua destilada en un reactor de tres cuellos equipado con un agitador mecánico, un condensador de reflujo y una línea de nitrógeno a 85°C. Adición de MMT y enfriamiento a 70°C. Adición de KPS, AA y MBA, agitación y se mantuvo durante 10 min para generar radicales. La reacción se agitó continuamente durante 4 h.	(S. Zhang et al., 2014)

Nota. MBA: N-metilenbisacrilamida, MMT: montmorillonita, KPS: persulfato de potasio, EGDE: Éter diglicídico de etilenglicol, APS: persulfato de amonio, TEMDA: N'-tetrametiletilendiamina

APÉNDICE G. SISTEMAS DE LIBERACIÓN DE FÁRMACOS ESTUDIADOS UTILIZANDO HIDROGELES OBTENIDOS A PARTIR DE XILANO

Tabla G1

Propiedades y sustancias liberadas de hidrogeles a partir de xilano para la aplicación de sistemas liberación de fármacos

Hemicelulosa	Residuo lignocelulósico	Sustancia liberada	Propiedades del material	Referencia
Xilano	Madera de haya	Vitamina B12	Estructura porosa, punto de gelación más alto (soportan mayores tensiones de deformación). La liberación depende del pH del medio, en una solución PBS (pH=7,4) que imita el líquido colónico se obtuvo un porcentaje de liberación del 93-98%.	(Kundu & Banerjee, 2019)
Arabinoxilano	Salvado de trigo	Albúmina de suero bovino (BSA) (proteína rica en aminoácidos esenciales)	La tasa de liberación de BSA es menor en las condiciones ácidas de las soluciones gástricas simuladas (14,53% pH= 2), y más alto en las condiciones neutrales del líquido intestinal (66,64% pH= 7,4).	(Juan Li et al., 2021)
Xilano	Bagazo de caña de azúcar	Liberación de 5-Fluorouracil	Estructura macroporosa con capacidad de liberación del fármaco para los hidrogeles de hasta un 71,05%.	(Chang et al., 2018)
Arabinoxilano	Salvado de trigo	Ácido acetilsalicílico	La liberación acumulada del fármaco en la solución a pH 7,4 fue de aproximadamente el 85%.	(X. F. Sun et al., 2013)
Xilano	<i>Eucalyptus urograndis</i>	Doxorrubicina	La proporción de doxorrubicina liberada no se vio afectada por el cambio de pH; sin embargo, la tasa de liberación de todos los hidrogeles fue más rápida a un pH más bajo.	(Fonseca et al., 2011)

APÉNDICE H. ADSORCIÓN DE COLORANTES Y METALES PESADOS ESTUDIADOS UTILIZANDO HIDROGELES OBTENIDOS A PARTIR DE XILANO

Tabla H1

Propiedades y colorantes/metales pesados estudiados en la aplicación de adsorción por hidrogeles a partir de xilano

Tipo de xilano	Residuo lignocelulósico	Colorante/ Metal pesado	Propiedades del material	Referencia
Xilano	Madera de haya	Azul de metileno (MB)	Gran número de poros en la estructura, eficiencia de remoción por encima del 90%, excelente rendimiento de adsorción de MB a pH>8.	(Lin et al., 2019)
Xilano	Paja de trigo	Azul de metileno (MB)	Condición óptima para la adsorción del azul de metileno pH=8, capacidad máxima de adsorción estimada en 438,60 mg (MB) /g (adsorbente).	(X. F. Sun et al., 2015)
Xilano	Bagazo de caña de azúcar	Pb ²⁺ , Cd ²⁺ y Zn ²⁺	Al aumentar el pH, aumentó la capacidad de adsorción de hidrogeles sobre iones metálicos. Después de cinco ciclos de adsorción-desorción, los hidrogeles aún mantenían una alta capacidad de adsorción.	(Zhong et al., 2013)
Arabinoxilano	Bambú	Cu ²⁺ y Ni ²⁺	Las capacidades de adsorción de Cu ²⁺ y Ni ²⁺ fueron de 325,1 y 238,1 mg/g en el primer ciclo, y disminuyeron ligeramente a 301,2 y 214,2 mg/g después de cuatro ciclos.	(W. Kong et al., 2019)

APÉNDICE I. HIDROGELES PARA LA SORCIÓN DE GASES

Tabla I1

Hidrogeles para la sorción de gases

Hidrogel	Amina	Condiciones	Adsorción/Absorción	Referencia
Comercial, 10 a 15% p/p basado en amina líquida	. 2 g de solución acuosa de amina DEA 30% p/p . 2 g de solución acuosa de amina MEA 30% p/p	Agitación por 20 segundos y dejado durante 5 minutos.	0,139 g CO ₂ /g absorbente para DEA y 0,231 g CO ₂ /g absorbente para MEA.	(Xu et al., 2018)
Comercial	. Álcali inorgánico (K ₂ CO ₃) 30% p/p . Alcanolamina N-metildietanolamina (MDEA) 30% p/p	Agitación por 10 segundos y dejado durante 5 minutos.	78,3 mg CO ₂ /g absorbente (MDEA) y 60,1 mg CO ₂ /g absorbente (K ₂ CO ₃).	(Xu & Wood, 2018)
Acrilamida, MBA (reticulante) y K ₂ S ₂ O ₈ /NaHSO ₃ como iniciadores	DEA (5, 10 y 20% p/p)	-	Para 10%, 0,045 g CO ₂ /g absorbente y para 20%, 0,091 g CO ₂ /g absorbente.	(Xu et al., 2019)
Quitosano, poli (ácido acrílico) y vermiculita expandida	-	Baño de aceite a 80°C durante 4 horas para completar la reacción de polimerización.	Capacidad de adsorción de 21,7 mg/g, alcanza el equilibrio en unos minutos y muestra independencia del pH en un amplio rango (4,0–8,0).	(Zheng et al., 2012)
Residuos de aceite de palma (EFB), biochar y acrilamida	-	Solución llevada a un horno a 40°C durante 30 minutos y se dejó durante 24 horas a temperatura ambiente para completar la polimerización/reticulación.	Máxima adsorción de H ₂ S de 102,9 mg/g.	(Yasin et al., 2021)

APÉNDICE J. MEZCLAS Y CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA LA SÍNTESIS DE PELÍCULAS OBTENIDAS A PARTIR DE XILANO

Tabla J1

Mezclas y condiciones de operación reportadas en la literatura para películas obtenidas a partir de xilano

Hemicelulosa	Polímero	Plastificante/ Reticulante	Componentes adicionales	Condiciones de operación	Referencia
Xilano	Alcohol polivinílico	Ácido cítrico	-	Agitación de la mezcla durante 30 min a 95°C, fundición a 75°C y secado en un horno ventilado a 50°C durante la noche.	(S. Wang et al., 2014)
Xilano	Alcohol polivinílico	Ácido 1,2,3,4-butano tetracarboxílico (BTCA)	-	Fundición a 75°C durante 4 h y secado en un horno ventilado a 40°C durante la noche.	(C. D. Gao et al., 2014)
Xilano	Hidroxietil-celulosa	Polietilenglicol 400 (PEG-400) /ácido cítrico	Complejo de β - ciclodextrina / benzoato de sodio (β -CD/NaBz)	Agitación mecánica a temperatura ambiente durante 3 h y eliminación de burbujas de aire al vacío. Secado al aire a temperatura ambiente durante 3 días y tratamiento de curado a 105°C en un horno de aire.	(Yang et al., 2019)
Carboximetil xilano	-	Glicerol/ agar	-	Mezcla calentada a 70°C y agitación durante 30 min, homogeneización a 7600 rpm durante 2 min y a 12.000 rpm durante 2 min, secado a 30°C.	(Queirós et al., 2017)

Hemicelulosa	Polímero	Plastificante/ Reticulante	Componentes adicionales	Condiciones de operación	Referencia
Carboximetil xilano	-	Glicerol/ carbonato de amonio y circonio (ACZ)	-	Mezcla calentada a 60°C y agitación durante 30 min, homogeneización a 7600 rpm durante 2 min y a 12.000 rpm durante 2 min, secado a 30°C.	(Queirós et al., 2017)
Carboximetil xilano	Carboximetil-celulosa	-	-	Agitación magnética a temperatura ambiente durante 3 h, desgasificación mediante ultrasonido al vacío durante 5 min y secado al 50% de HR y 23°C.	(Alekhina et al., 2014)
Glucurono-arabinoxilano	Carboximetil-celulosa	-	-	Agitación a 200 min ⁻¹ durante 56 h y secado durante al menos 72 h a 23°C y 50% de HR.	(Svärd et al., 2015)
Carboximetil xilano	Quitosano	-	Nanotubos de halloysita y aceite esencial de <i>Origanum vulgare</i>	Agitación de la mezcla durante 24 h a 30°C, homogeneización a 8.000 rpm durante 2 min y secado a temperatura ambiente.	(Yousefi et al., 2020)
Carboximetil xilano y xilano modificado con anhídrido 2-dodecenil succínico	-	Glicerol	Papel como soporte	Mezcla de los componentes y secado a 23°C y 50% de humedad relativa.	(Ramos et al., 2017)
Xilano hidroxipropilado	-	Ácido cítrico	-	Secado en un horno de aire circulante a 105°C durante 2 min.	(Laine et al., 2013)
Xilano con sustituyentes 1-butoxi-2-hidroxipropilo y 1-aliloxi-2-hidroxipropilo (X-BA2)	-	Ácido cítrico/ Mezcla de sorbitol y glicerol	-	Secado en un horno de aire circulante a 105°C durante 2 min.	(Laine et al., 2013)

Hemicelulosa	Polímero	Plastificante/ Reticulante	Componentes adicionales	Condiciones de operación	Referencia
Xilano	Gelatina	Glicerol	-	Agitación de la dispersión acuosa de xilano durante 5 min a 50°C y secado en horno a 40°C durante 24 h.	(Lucena et al., 2017)
Carboximetil xilano	Quitosano	-	Óxido de grafeno	Tratamiento ultrasónico durante 3 min, agitación magnética a temperatura ambiente durante 24 h y secado a temperatura ambiente durante 7 días.	(Rao et al., 2021)
Hidroxipropil xilano (HPX) y carboximetil xilano	-	Glicerol	-	Secado a 23°C y humedad relativa del 50%.	(Sousa, Ramos, et al., 2016)