Horizonte Académico
Revista Multidisciplinaria
Recibido:09/12/2024 *Aprobado:10/01/2025*
DOI: https://doi.org/10.70208/3007.8245.v5.n1.63

Uso de la cal para la extracción de arabinoxilanos a partir de la biomasa lignocelulósica: hacia una biorrefinería sostenible y economía circular

Itzel Alheli Angeles Zamora
itzelalheli1@gmail.com
https://orcid.org/0009-0000-8833-2170
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Hidalgo, México

Jesús Guadalupe Pérez Flores
jesus_perez@uaeh.edu.mx
https://orcid.org/0000-0002-9654-3469
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Hidalgo, México

Laura García Curiel
laura.garcia@uaeh.edu.mx
https://orcid.org/0000-0001-8961-2852
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Hidalgo, México

Lizbeth Anahí Portillo Torres
lportillo@upfim.edu.mx
https://orcid.org/0000-0003-2015-6734
Universidad Politécnica de Francisco I. Madero
Hidalgo, México

Elizabeth Contreras López
elizac@uaeh.edu.mx
https://orcid.org/0000-0002-9678-1264
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Hidalgo, México

Emmanuel Pérez Escalante
emmanuel_perez@uaeh.edu.mx
https://orcid.org/0000-0002-4268-9753
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Hidalgo, México

RESUMEN

Se requiere desarrollar métodos sostenibles y eficientes para extraer compuestos bioactivos de la biomasa lignocelulósica (BL) para valorizar los subproductos agroalimentarios, forestales e industriales en el marco de la biorrefinería y de la economía circular. Esta contribución ofreció una visión general

sobre la viabilidad y eficacia de la cal como agente de extracción, centrándose en la recuperación de arabinoxilanos (AX) de diversos materiales lignocelulósicos, para fomentar esta línea de investigación. La BL consiste en una estructura defensiva de las plantas, compuesta principalmente de celulosa, de hemicelulosa y de lignina, presentando recalcitrancia. Los hallazgos indicaron que el pretratamiento adecuado de la BL promueve la extracción eficiente de AX, siendo los métodos alcalinos particularmente efectivos para aumentar la solubilidad de los AX y facilitar su posterior aislamiento y purificación. El uso de la cal se presentó como una estrategia viable debido a su disponibilidad, bajo costo, selectividad, baja toxicidad y por facilitar la ruptura de enlaces éster entre xilanos (hemicelulosa) y lignina, lo que mejora la susceptibilidad de la celulosa y los xilanos a tratamientos posteriores. En conclusión, el uso de la cal se destacó como una estrategia efectiva para deconstruir la BL y obtener compuestos químicos de alto valor agregado, tales como los AX, con aplicaciones tecnológicas diversas, promoviendo la inclusión de la BL dentro de una economía circular

Palabras clave: hidróxido de calcio, biomasa lignocelulósica, arabinoxilanos, biorrefinería, economía circular

Use of lime for the extraction of arabinoxylans from lignocellulosic biomass: towards a sustainable biorefinery and circular economy

ABSTRACT

Sustainable and efficient methods are required to extract bioactive compounds from lignocellulosic biomass (LB) to valorize agro-industrial, forestry, and industrial by-products within the framework of biorefineries and the circular economy. This contribution provided A comprehensive overview of lime's feasibility and efficiency as an extraction agent, focusing on the recovery of arabinoxylans (AX) from various lignocellulosic materials to encourage further research in this area. LB is characterized as a defensive structure in plants, mainly composed of cellulose, hemicellulose, and lignin, exhibiting recalcitrance. The findings indicated that proper pretreatment of LB promotes the efficient extraction of AX, with alkaline methods being particularly effective in increasing the solubility of AX and facilitating their subsequent isolation and purification. The use of lime was highlighted as a viable strategy due to its availability, low cost, selectivity, low toxicity, and ability to facilitate the breakdown of ester bonds between xylans (hemicellulose) and lignin, thereby improving the susceptibility of cellulose and xylans to further treatments. In conclusion, lime was emphasized as an effective strategy for deconstructing LB and obtaining high-value-added compounds, such as AX, with diverse technological applications, promoting the integration of LB into the circular economy.

Keywords: calcium hydroxide, lignocellulosic biomass, arabinoxylans, biorefinery, circular economy

INTRODUCCIÓN

La biomasa vegetal (BV), además de ser un recurso renovable, constituye una estructura interna defensiva que desempeña un papel central en la estabilidad hidrolítica y la robustez estructural de las paredes celulares de las plantas, proporcionándoles resistencia frente a la degradación microbiana (H. V. Lee et al., 2014). Por su parte, la biomasa lignocelulósica (BL), una fracción de la BV proveniente de materiales vegetales no comestibles y subproductos agroalimentarios e industriales, se compone principalmente de tres polímeros fundamentales: celulosa (38-50%), hemicelulosas (23-32%) y lignina (15-25%). Estos polímeros están asociados entre sí en una heteromatriz en diferentes grados y con una composición variable según el tipo de biomasa, la especie de planta e incluso la fuente de la biomasa (J. K. Singh et al., 2018). De hecho, la composición química de la BL para diferentes tipos de subproductos agrícolas, industriales y forestales se muestra en la Tabla 1 (H. V. Lee et al., 2014; Mankar et al., 2021). Esta tabla proporciona información detallada sobre la composición de diferentes tipos de BL, destacando variaciones significativas en los porcentajes de celulosa, hemicelulosa y lignina. Por ejemplo, el bambú exhibe un equilibrio entre celulosa y hemicelulosa, sugiriendo su versatilidad como fuente de biomasa, mientras que el tallo de maíz y la cáscara de arroz muestran proporciones considerables de los tres componentes, indicando su potencial en diversos procesos. La caña de azúcar y su bagazo presentan composiciones que podrían ser relevantes para aplicaciones específicas, al igual que la madera de abeto y haya. En contraste, la cáscara de avellana y la paja de trigo exhiben características que podrían influir en su aplicabilidad. La variabilidad en la composición de la biomasa subraya la importancia de considerar las propiedades específicas de cada tipo para determinar su idoneidad en aplicaciones como la producción de energía, pulpa de papel o biocombustibles. Adicionalmente, la BV contiene otros componentes menores, tales como extractivos (compuestos fenólicos, compuestos hidrófobos de baja masa molar, etcétera), cenizas, pectinas y proteínas (Saputra et al., 2004; J. K. Singh et al., 2018; Yadav et al., 2017).

La celulosa es el polímero más abundante en la BL, por lo que desempeña un papel central en la estructura de las paredes celulares vegetales. Su disposición en forma de microfibrillas, unidas por la

hemicelulosa y la lignina, crea una red resistente gracias a una combinación de puentes de hidrógeno y de enlaces covalentes. Esta estructura confiere a la biomasa lignocelulósica una propiedad conocida como recalcitrancia, que se define como la resistencia de las paredes celulares a la deconstrucción (Figura 1) (Naidu et al., 2018).

Por ende, resulta importante comprender la composición química de la BL con el propósito de deconstruirla en componentes que puedan convertirse química o catalíticamente en combustibles, productos químicos o intermedios reactivos (Chheda et al., 2007; Himmel et al., 2007; H. V. Lee et al., 2014). De hecho, la viabilidad inherente de esta fuente radica en su capacidad para convertirse en biocombustibles y otros productos bioquímicos mediante procesos de fermentación (Vasić et al., 2021). La tecnología de fraccionamiento de lignocelulosa y la co-utilización efectiva de sus componentes, como el ácido acético, la lignina y la hemicelulosa, son fundamentales para el desarrollo de biorrefinerías rentables basadas en la BL (Y. H. P. Zhang, 2008).

La Figura 1 ofrece una representación esquemática de la estructura de la pared celular vegetal, así como una visión de la sección transversal de las microfibrillas que la componen. La imagen destaca la complejidad de la pared celular, resaltando la presencia de hebras de moléculas de celulosa incrustadas en una matriz de hemicelulosa y lignina. La estructura tridimensional ilustra la organización intrincada de estos componentes, subrayando la importancia de la celulosa en forma de microfibrillas como elemento estructural primordial. Además, la inclusión de la matriz de hemicelulosa y lignina proporciona una comprensión visual clara de cómo estos polímeros interactúan para formar una red resistente y flexible que contribuye a la integridad estructural de la pared celular. Esta representación esquemática es útil para aquellos que buscan comprender la arquitectura celular vegetal, ya que simplifica visualmente conceptos complejos relacionados con la composición y disposición de los componentes de la pared celular.

En la Figura 2 se muestra una representación de la deconstrucción de la BL. La deconstrucción de la BL de bajo costo, en productos con funciones superiores, ofrece una opción viable para la mejora de la seguridad energética y para la reducción de las emisiones de efecto invernadero. Sin embargo, el

fraccionamiento de la BL es un proceso muy complejo que requiere una alta recuperación de celulosa, hemicelulosa y lignina, para que puedan convertirse completamente en productos finales útiles.

A pesar de las claras ventajas que ofrece la biorrefinería de BL, su éxito a nivel industrial para la producción comercial de productos químicos y combustibles renovables aún enfrenta desafíos (Chandel et al., 2018). Un obstáculo importante en este proceso, es la recalcitrancia de la BL, la cual se debe a la estructura altamente cristalina de la celulosa que está incrustada en una matriz de lignina y de hemicelulosa (H. V. Lee et al., 2014). Esto hace que la BL exhiba una fuerte resistencia a las enzimas, por lo que se requiere un proceso de pretratamiento adecuado para facilitar el acceso de las enzimas a los polisacáridos de la BL, especialmente a la celulosa, por ejemplo, para la producción de bioetanol (Mankar et al., 2021; S. Sun et al., 2016). Un buen método de pretratamiento debe cumplir las siguientes características: (i) evitar la alteración de la estructura o la pérdida del contenido de celulosa, de hemicelulosa y de lignina; (ii) ser rentable y reducir el consumo de energía; y (iii) minimizar la producción de residuos tóxicos y peligrosos (H. V. Lee et al., 2014). Una opción común es utilizar el pretratamiento con álcali, cuya principal estrategia es romper la estructura de la lignina en la BL, mejorando así la susceptibilidad de la celulosa y de la hemicelulosa para otros tratamientos (Y. Sun & Cheng, 2002). Durante el pretratamiento alcalino, los enlaces éster en las hemicelulosas y la lignina se descomponen fácilmente. Las escisiones de estos enlaces promueven significativamente la solubilización de hemicelulosas y de la lignina, lo que da como resultado la exposición de la celulosa para otros tratamientos (S. Sun et al., 2016). Generalmente, los agentes químicos de pretratamiento que se utilizan para la hidrólisis alcalina son NaOH, KOH, $Ca(OH)_2$, hidracina (N_2H_4) y NH_4OH (Taherdanak & Zilouei, 2014; J. Xu et al., 2010). En la Figura 3 se expone la trayectoria integral para la reingeniería de la BL hacia una plataforma química e intermedia de productos (H. V. Lee et al., 2014). Este proceso abarca el pretratamiento de la BL con el objetivo de obtener productos y compuestos químicos de alto valor agregado mediante procedimientos químicos y biológicos. La BL, que abarca residuos agrícolas, forestales, alimentarios, animales y urbanos, se somete a tratamientos químicos tales como hidrólisis ácida y alcalina, el uso de solventes orgánicos y la deslignificación oxidativa. Estos tratamientos permiten

solubilizar componentes como la hemicelulosa y la lignina, dejando una fracción sólida de celulosa. A partir de estas fases de procesamiento, se pueden obtener diversos productos, incluyendo azúcares esenciales (xilosa, manosa, glucosa, galactosa, ramnosa, arabinosa), fundamentales para la producción de biocombustibles como metanol, etanol, dimetil éter, butanol, alcanos, butanediol y xilitol. Adicionalmente, se generan gases como hidrógeno y metano, junto con otros compuestos como nanocelulosa y azúcares derivados de la lignina. Paralelamente, a través de procesos de ácido/hidrólisis enzimática, fermentación/conversión química e hidrólisis ácida, se obtienen productos como furfural, 5-hidroximetilfurfural y ácido levulínico, con aplicaciones en la fabricación de materiales de refuerzo, dispositivos electrónicos y entrega de medicamentos. Además, se destaca la posibilidad de obtener una amplia variedad de productos químicos, desde cetonas y alcoholes hasta aromáticos y alcanos, así como coque o precursores de carbono, evidenciando la versatilidad de los procesos de conversión de biomasa para la producción de una amplia gama de materiales y productos químicos útiles.

En ese contexto, la biorrefinería es una estrategia viable para integrar los subproductos agroalimentarios (SA) dentro de una economía circular (EC), especialmente, la BL, debido a que, además de la producción de biocombustibles y de energía, también permite la obtención de productos químicos de plataforma (PQP), tales como la fracción de hemicelulosa, obtenida a partir de la BL. Los sacáridos de hemicelulosa tienen amplias aplicaciones en muchos campos, debido a que pueden transformarse en etanol combustible, ácido levulínico, xilitol, entre otros (Chen et al., 2018; Fatehi & Chen, 2016). Especialmente, los xilo-oligosacáridos (XOS) y los arabinoxilanos (AX), que también se consideran PQP importantes para producir productos de alto valor agregado debido a sus diversas funciones fisiológicas, como reducir el colesterol, mejorar la función intestinal y reducir el riesgo de cáncer de colon (F. Xu et al., 2019).

Las hemicelulosas forman la mayor parte de la BL después de la celulosa, y los xilanos son las hemicelulosas más abundantes, aunque su composición varía entre las especies (Limayem & Ricke, 2012). Estructuralmente, los xilanos son un grupo diverso de polisacáridos, que tienen como característica en común, una cadena principal constituida de unidades de *β*-D-xilopiranósido (*β*-D-Xylp)

unidas mediante enlaces glicosídicos *β*-(1→4) (Cantu-Jungles et al., 2017), con una configuración ecuatorial (Ogaji et al., 2012), a la cual se pueden unir diferentes cadenas laterales, tales como el ácido *α*-D-glucurónico, el ácido 4-*O*-metil-*α*-D-glucurónico y algunas unidades de azúcares neutros, como la α-L-arabinosa, la *α*-D-xilosa y la *α*-D-galactosa (Cantu-Jungles et al., 2017); dando como resultado, diferentes subcategorías de xilanos, entre ellos, los homoxilanos, los glucuronoxilanos (GX), los arabinoglucuronoxilanos y los AX (Naidu et al., 2018). Los AX y sus hidrogeles un producto de alto valor agregado obtenido a partir de la BL, debido a que ofrecen el potencial de ser aplicados en las industrias: alimentaria, biomédica y cosmética (García-Curiel et al., 2023; Méndez-Encinas et al., 2019; Jesús Guadalupe Pérez-Flores et al., 2024; Rodríguez-Viveros et al., 2023).

Con base en lo expuesto, el objetivo de esta contribución fue proporcionar una visión general sobre la viabilidad y eficacia del uso del hidróxido de calcio como agente de extracción para la obtención de compuestos bioactivos a partir de la BL, centrándose en la recuperación de AX, con la finalidad de difundir esta línea de investigación, contribuyendo así al conocimiento científico y a promover la biorrefinería sostenible, además de fomentar la extracción de compuestos bioactivos como parte integral de una EC.

Tabla 1. Composición química de residuos y subproductos agrícolas comunes (H. V. Lee et al., 2014; Mankar et al., 2021).

Tipo de biomasa lignocelulósica	Celulosa (%, m/m)	Hemicelulosa (%, m/m)	Lignina (%, m/m)
Bambú	41.8	18	29.3
Tallos de maíz	50	20	30
Puntas de caña de azúcar	43	27	17
Bagazo de caña de azúcar	35	35.8	16.1
Rastrojo de maíz	38.4	22.9	20.1
Cáscara de arroz	37.1	29.4	24.1
Jacinto de agua	24.5	34.1	8.6
Cáscara de avellana	25.2	28.2	42.1
Paja de arroz	35.8	21.5	24.4
Madera de abeto	43	29.4	27.6

Madera de haya	44.2	33.5	21.8
Residuos de la postcosecha de chile	39.9	17.8	25.3
Mazorcas de maíz	45	35	15
Paja de trigo	30	50	15
Paja de cebada	33-40	20-35	8-17
Cáscara de nuez	25-30	25-30	30-40
Racimo de fruta vacío de palma de aceite	41	24	21.2
Pasto	45	31.4	12
Tallos de madera dura	40-55	24-40	18-25
Tallos de madera blanda	45-50	25-30	25-35
Hojas	15-20	80-85	0
Residuos de papel de pulpa química	60-70	10-20	5-10
Compuestos orgánicos de sólidos en agua	8-15	0	0

Figura 1. Representación esquemática de la estructura de la pared celular vegetal y de la sección transversal de las microfibrillas (hebras de moléculas de celulosa incrustadas en una matriz de hemicelulosa y de lignina)

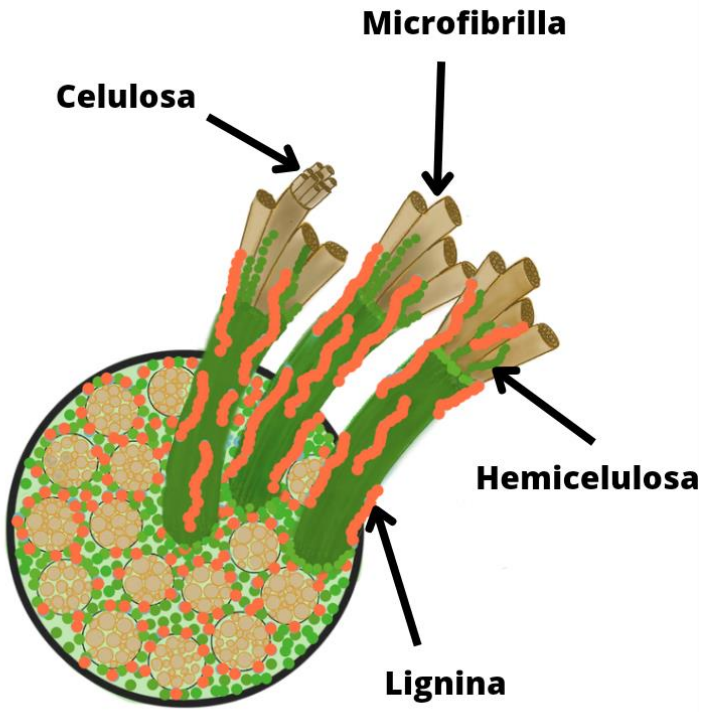


Figura 2. Deconstrucción de la biomasa lignocelulósica en celulosa, hemicelulosa y lignina

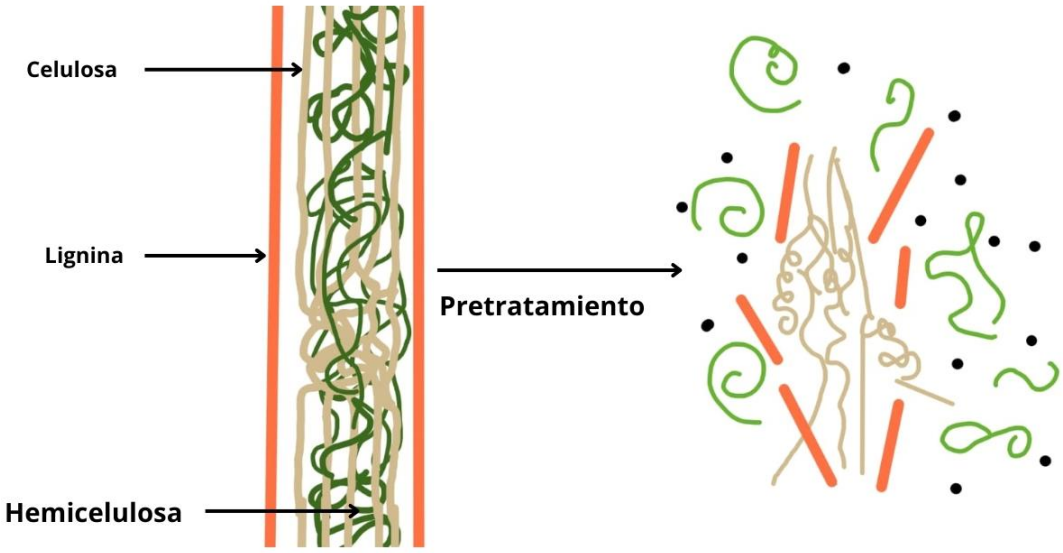
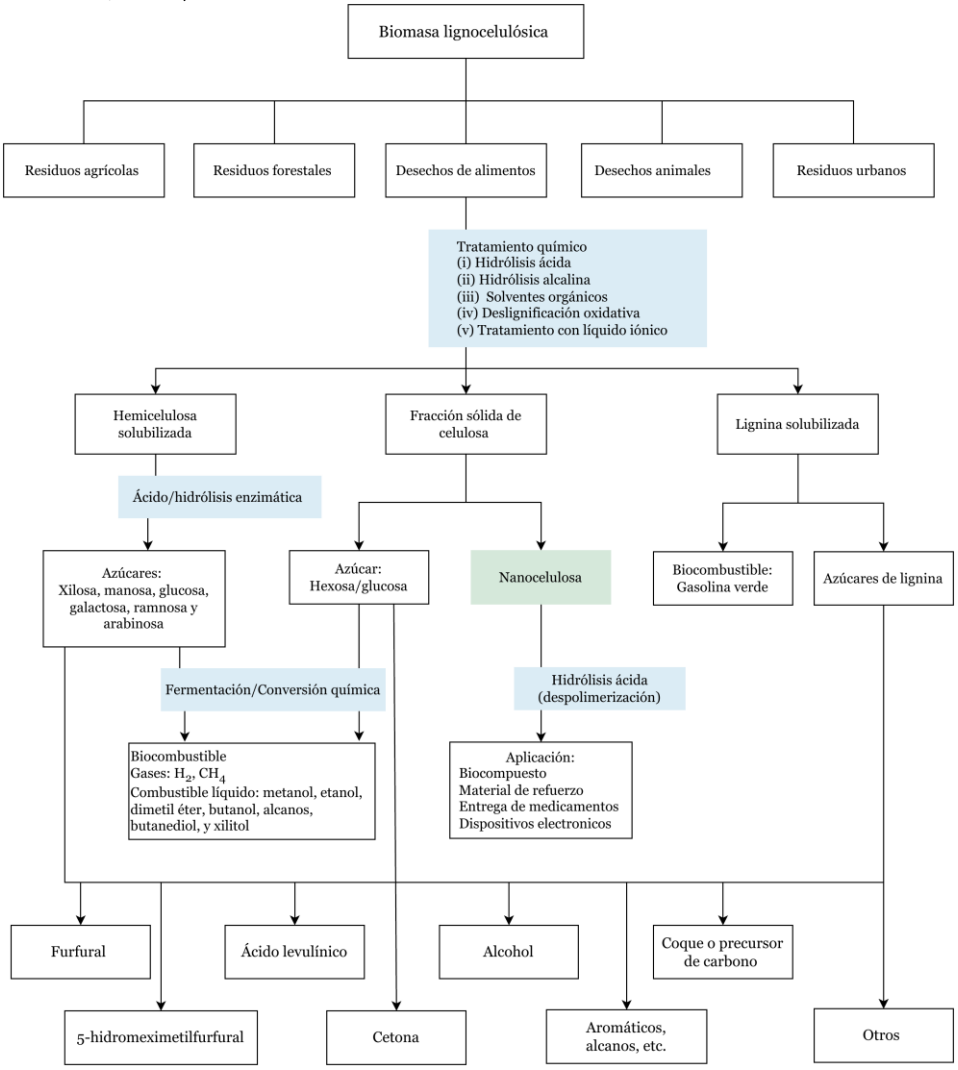


Figura 3. Ruta de biorrefinería de la biomasa lignocelulósica a productos químicos e intermedios (H. V. Lee et al., 2014)



METODOLOGÍA

La presente revisión se llevó a cabo mediante un enfoque sistemático, que incluyó las siguientes etapas:

1. **Definición del objetivo y alcance:** se establecieron objetivos claros para delimitar el alcance de la revisión, centrados en analizar la viabilidad y eficacia del uso de hidróxido de calcio para la extracción de AX en el contexto de la economía circular.
2. **Búsqueda de literatura:** se realizó una búsqueda exhaustiva de literatura científica en bases de datos reconocidas, como Scopus, Web of Science y PubMed. Se utilizaron palabras clave como "lignocellulosic biomass", "arabinoxylans extraction", "calcium hydroxide" y "circular economy". Los filtros aplicados incluyeron artículos publicados entre 1996 y 2024, así como documentos en inglés y español.
3. **Criterios de inclusión y exclusión:** se seleccionaron artículos que presentaran datos experimentales, enfoques metodológicos innovadores o análisis críticos relacionados con la extracción de AX y el uso de hidróxido de calcio. Se excluyeron artículos de revisión secundaria, duplicados y aquellos que no eran relevantes para el tema.
4. **Análisis crítico de la información:** la literatura seleccionada fue categorizada según los principales temas abordados: composición de la biomasa lignocelulósica, mecanismos de extracción de AX, aplicaciones de AX y el papel del hidróxido de calcio en los procesos. Se evaluó la calidad de los estudios en función de su diseño experimental, relevancia y número de citas.
5. **Síntesis de los hallazgos:** los resultados se integraron en un marco narrativo que abarcó las tendencias actuales, los avances tecnológicos y las limitaciones identificadas en el área de estudio. Se propusieron líneas futuras de investigación para fomentar la sostenibilidad en la extracción de AX.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Biorrefinería y extracción de compuestos bioactivos

En este punto es necesario resaltar la principal diferencia entre la biorrefinería y la extracción de compuestos bioactivos a partir de la BL, la cual radica en sus enfoques y objetivos.

Un proceso de biorrefinería de la BL se centra en la conversión integral de la biomasa en una variedad de productos, como biocombustibles, productos químicos y materiales, a través de procesos integrados que involucran principalmente el fraccionamiento y la conversión de los componentes de la biomasa (Wang et al., 2020). Este enfoque busca maximizar la utilización de la biomasa y sus componentes, como la celulosa, hemicelulosa y lignina, para obtener una amplia gama de productos (Varriale et al., 2022). Se requieren estrategias efectivas de pretratamiento para descomponer la compleja estructura de la BL y permitir su conversión eficiente (S. H. Lee et al., 2009).

Por otro lado, la extracción de compuestos bioactivos se enfoca en la recuperación selectiva de componentes específicos a partir de la BL con propiedades biológicas activas, como antioxidantes, antimicrobianos o compuestos medicinales (Karagoz et al., 2023). Este proceso implica la separación de los compuestos deseados de la BL, como la lignina (Hasanov et al., 2020) o de AX (García-Curiel et al., 2023; Jesús Guadalupe Pérez-Flores et al., 2019), para su uso en aplicaciones farmacéuticas u otras aplicaciones de alto valor. La extracción de compuestos bioactivos puede requerir métodos específicos, como el uso de líquidos iónicos, para lograr una separación eficaz (Smit et al., 2022).

Arabinoxilanos

Los AX son polisacáridos no amiláceos constituidos por una cadena principal formada por unidades de *β*-D-xilopiranósido (*β*-D-Xyl*p*) unidas por enlaces glucosídicos *β*-(1→4), a la cual se unen grupos de *α*-L-arabinofuranosilo (*α*-L-Ara*f*) a través de enlaces *α*-(1→3) y/o *α*-(1→2) (García-Curiel et al., 2023; Jesús Guadalupe Pérez-Flores et al., 2019). La estructura de los AX puede variar en cuanto a su complejidad de una fuente a otra, por ejemplo, pueden estar sustituidos en diferentes posiciones con otros azúcares y grupos funcionales, tales como glucosa, manosa, galactosa, grupos acetilo y ácido glucurónico (Méndez-Encinas et al., 2019; Rodríguez-Viveros et al., 2023). Una característica estructural particular de los AX, es la presencia de ácidos hidroxicinámicos (AHC). Por ejemplo, algunas fracciones de *α*-L-Ara*f* pueden estar unidas por enlaces éster en las posiciones *O*-5, a unidades de ácido ferúlico (AF).

Los AX con AF en su estructura química se denominan arabinoxilanos ferulados (AXF) (Méndez-Encinas et al., 2019; Jesús Guadalupe Pérez-Flores et al., 2019). El contenido de AF determina las propiedades

fisicoquímicas de los AX, debido a que el acoplamiento de al menos dos residuos de AF a través de un enlace covalente, produce el entrecruzamiento de las cadenas de AX, lo que aumenta la viscosidad de las dispersiones de AX e induce la formación de hidrogeles (De Anda-Flores et al., 2023; Méndez-Encinas et al., 2019; Jesús Guadalupe Pérez-Flores et al., 2024), a través de un mecanismo de polimerización oxidativa mediada por radicales fenoxi de las unidades de AF, después de la oxidación de la molécula de AF por enzimas oxidativas, es decir, lacasa y peroxidasa en presencia de O_2 y de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) como agentes generadores de radicales libres, respectivamente (De Anda-Flores et al., 2023; Yilmaz-Turan et al., 2022).

Los AX y sus hidrogeles son ampliamente valorados debido a que ofrecen el potencial de ser utilizados para la liberación controlada de fármacos, por sí solos o acoplados con otros polímeros (Hussain et al., 2016; Khan, Haider, et al., 2020; Khan, Raza, et al., 2020; Jesús Guadalupe Pérez-Flores et al., 2024; B. Singh et al., 2022, 2023). Adicionalmente, los AX han exhibido un comportamiento de respuesta a estímulos, tales como los cambios en la temperatura, en las condiciones iónicas y a los cambios de pH (Khan, Raza, et al., 2020), y también se ha reportado su potencial como agente modificador de la liberación de fármacos (García-Curiel et al., 2023; J.G. Pérez-Flores et al., 2022; Jesús Guadalupe Pérez-Flores et al., 2024). De hecho, ya han sido revisadas sus propiedades de liberación de fármacos de forma *in vitro*, en su mayoría, mediante los procedimientos establecidos en la Farmacopea de los Estados Unidos, arrojando resultados alentadores (Jesús Guadalupe Pérez-Flores et al., 2024). Adicionalmente, existe un interés creciente en utilizarlos en las industrias alimentarias como hidrocoloides, espesantes, emulsionantes y para el desarrollo de envases de alimentos activos con respecto a la preparación de recubrimientos peliculares de frutas y verduras para mejorar su seguridad, su calidad y para prolongar su vida útil (Miafo et al., 2021). Además, ha sido revisado el uso potencial de los AX y de los arabinoxilo-oligosacáridos como prebióticos, lo cual ha despertado un gran interés debido a su capacidad para promover la buena salud. Estos compuestos, al estimular selectivamente el crecimiento y la actividad metabólica de la microbiota colónica benéfica, ofrecen beneficios para el hospedero. La información generada sugiere que los arabinoxilanos y arabinoxilo-oligosacáridos actúan de manera selectiva en la

modificación de la microbiota, lo que resulta en una respuesta biológica favorable. Sus efectos antiobesogénicos, reguladores de la glucosa, antioxidantes, anticancerígenos e inmunomoduladores han demostrado ser similares o incluso mejores que los de prebióticos reconocidos, lo que los posiciona como agentes prometedores para mejorar la salud intestinal y general del individuo (Marquez-Escalante et al., 2018; Morales-Burgos et al., 2017). De hecho, en los últimos años varios trabajos se han centrado en el uso de fibra dietética obtenida a partir de diferentes materiales vegetales como sustitutos de grasas y fosfatos en productos cárnicos (Araujo-Chapa et al., 2023). Todas estas ventajas convierten a los AX en un producto de alto valor agregado que puede ser extraído a partir de la BL.

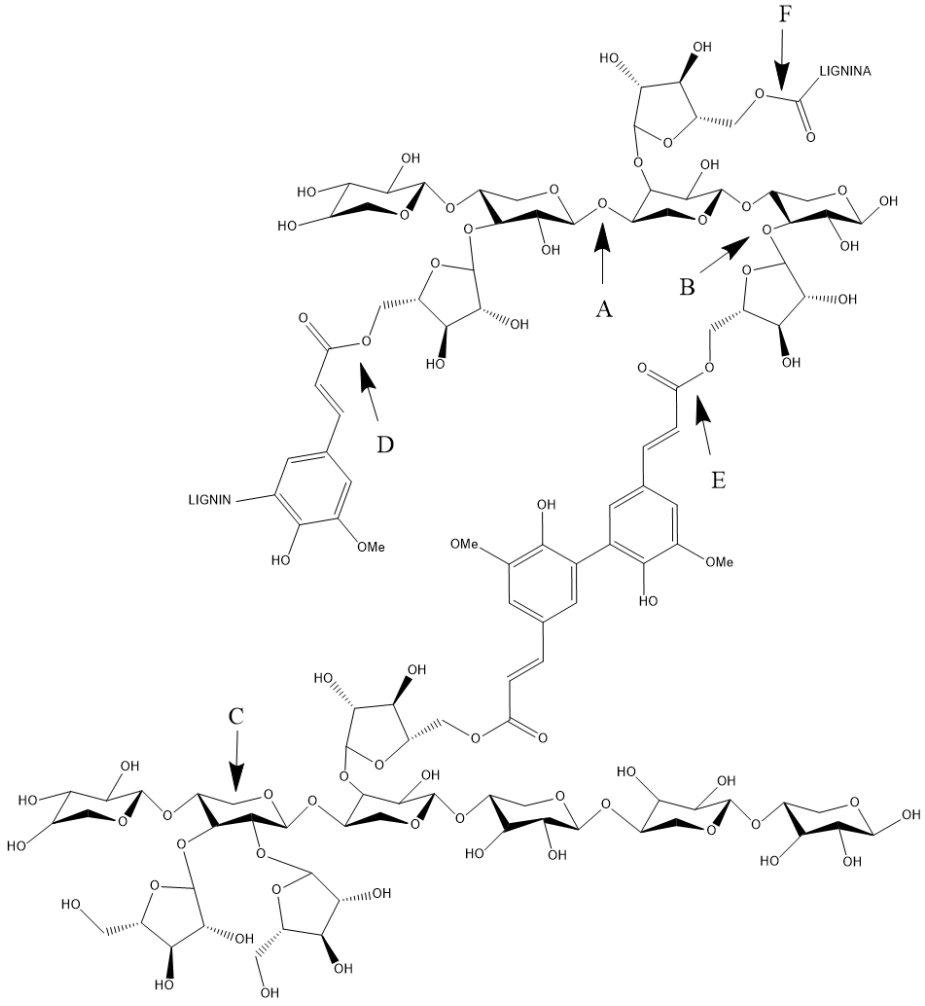
En la Figura 4 se muestra la estructura química generalizada de los AXF, las letras mayúsculas representan lo siguiente: **(A)** cadena principal de *β*-D-Xyl*p* unidas por enlaces glucosídicos *β*-(1→4), **(B)** enlace *β*-D-Xyl*p*-*α*-L-Ara*f*, **(C)** unidad de *β*-D-Xyl*p* disustituida con unidades de *α*-L-Ara*f*, **(D)** 5-*O*-ácido ferúlico-*α*-L-Ara*f* enlazado a lignina, **(E)** ácido 5-5'-deshidrodiferúlico y **(F)** ejemplo de *α*-L-Ara*f* enlazado con lignina (García-Curiel et al., 2023).

Según su extractabilidad, basada en su capacidad para disolverse en agua, los AX se pueden clasificar en arabinoxilanos extraíbles en agua (WEAX) y en arabinoxilanos no extraíbles en agua (WUAX). La principal diferencia radica en que los WEAX se unen débilmente a la superficie de la pared celular, mientras que los WUAX se unen a otros componentes de la matriz de la pared celular, como proteínas, lignanos o lignina, a través de enlaces covalentes y de hidrógeno (Pérez Flores et al., 2022). Esto es especialmente importante, porque dependiendo del tejido, se debe elegir un método de extracción de AX. Previamente, ya han sido revisados diferentes métodos de extracción de AX, utilizando agua y agentes químicos, enzimáticos y físicos (Aguedo et al., 2014; Escarnot et al., 2011; Fadel et al., 2018; Z. Zhang et al., 2014). Los AX pueden ser extraídos de diferentes materiales lignocelulósicos, tales como el endospermo, la capa de aleurona y el pericarpio de los cereales; así como de virutas de bambú, de cáscaras de plátano, de bagazo de caña de azúcar, de orujo de zanahoria, de bagazo de cebada procedente de la industria cervecera, de granos secos de destilería, entre otros (De Anda-Flores et al., 2023; García-Curiel et al.,

2023; J. G. Pérez-Flores et al., 2017; J.G. Pérez-Flores et al., 2022; Jesús Guadalupe Pérez-Flores et al., 2019; Rodríguez-Viveros et al., 2023).

El rendimiento de extracción, las propiedades fisicoquímicas, la estructura química y la funcionalidad de los AX, son características que dependen del método y de la fuente de extracción utilizada, y, por tanto, sus posibles aplicaciones tecnológicas (Rodríguez-Viveros et al., 2023). De hecho, el método de extracción no debe degradar las hemicelulosas, ya que se requiere de una masa molar superior a los 5 kDa para poder obtener productos de alto valor agregado, tales como películas o hidrogeles (J. G. Pérez-Flores et al., 2017; Jesús Guadalupe Pérez-Flores et al., 2019; Persson et al., 2009). El conocimiento de cómo el método de extracción de los AX afecta sus características podría ayudar a comprender mejor la naturaleza y las propiedades de los hidrogeles, lo que permitiría explorar aplicaciones específicas para la industria.

Figura 4. Estructura química generalizada de los arabinoxilanos ferulados (García-Curiel et al., 2023; Jesús Guadalupe Pérez-Flores et al., 2024; Pérez Flores et al., 2022)



Extracción de arabinoxilanos adaptada a la estrategia universal de recuperación de compuestos bioactivos

Actualmente, es cada vez más importante para la sociedad adoptar estrategias sostenibles que incluyan el concepto de EC, para cambiar de los desechos o de los SA, a la obtención de productos químicos de alto valor agregado y alejarse de la economía lineal. La "Estrategia Universal de Recuperación de Compuestos Bioactivos" (EURCB) puede ser una opción sostenible y viable para agregar valor a los desechos y a los SA, ya que poseen compuestos que pueden tener propiedades farmacológicas, antioxidantes, antimicrobianas, nutricionales u otras propiedades beneficiosas para la salud humana o para aplicaciones industriales.

La EURCB es una metodología que consta de 5 etapas, como se muestra en la Figura 5, en donde también puede observarse que las diferentes etapas pueden ser realizadas utilizando técnicas convencionales y emergentes (Pérez Flores et al., 2022). La EURCB se lleva a cabo realizando la separación desde el nivel macroscópico al macromolecular y luego al nivel micromolecular; para posteriormente aplicar un paso de clarificación o aislamiento y, finalmente, la formación del producto o la encapsulación de los compuestos objetivo. Debido a que los subproductos son mezclas constituidas de diferentes fases macroscópicas conformadas por diferentes moléculas con diferentes propiedades estructurales y fisicoquímicas, esta estrategia universal permite separar y aislar gradualmente los compuestos objetivo, garantizando la recuperación de varios tipos de compuestos valiosos a partir de cualquier subproducto mediante la gestión optimizada de las tecnologías disponibles (Galanakis, 2015).

Anteriormente, ya ha sido analizada la extracción de AX acoplada a la EURCB, a partir de subproductos generados del procesamiento de cereales, que, en su mayoría, están compuestos de BL (Pérez Flores et al., 2022). El procedimiento general también puede ser aplicado a otros materiales lignocelulósicos y es el siguiente (Carvajal-Millan et al., 2007; Escarnot et al., 2011; Espinosa Negrín et al., 2021; Galanakis, 2015; Habibi et al., 2002; Jesús Guadalupe Pérez-Flores et al., 2019; Pérez Flores et al., 2022; Rodríguez-Viveros et al., 2023; Z. Zhang et al., 2014):

I. **Pretratamiento de la muestra:** se realiza con la finalidad de acondicionar la muestra para las siguientes etapas. Por ejemplo, en esta etapa se realiza la remoción de la humedad de la fuente de extracción, que puede ser por secado en estufa o por liofilización. Posteriormente, se realiza la reducción de tamaño por pulverización y el fraccionamiento por tamizado, lo cual conduce a un aumento de la superficie de contacto.

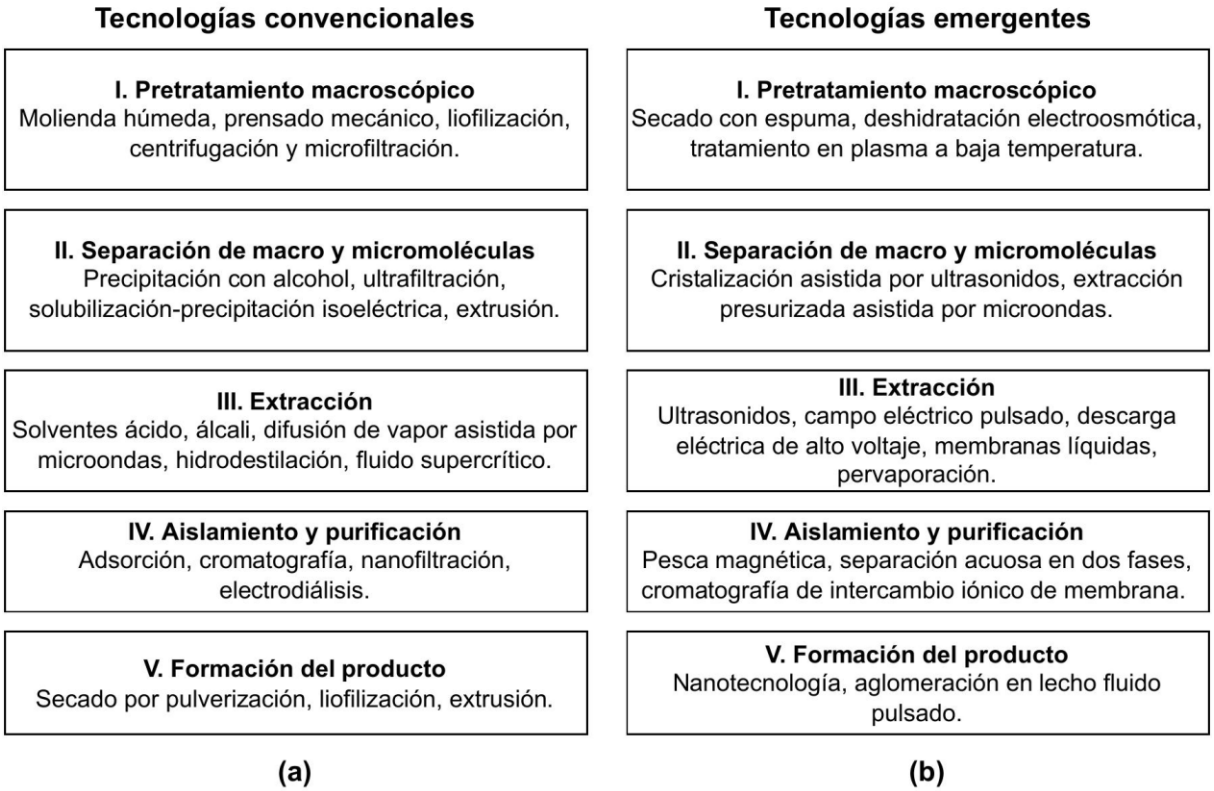
II. **Separación de macro y micromoléculas:** el objetivo de esta etapa es aislar el compuesto objetivo de otros compuestos que se diferencien fisicoquímicamente lo más posible, especialmente en términos de estructura química, tamaño, carga y/o hidrofobicidad, y que puedan dificultar la extracción del compuesto objetivo. Por ejemplo, en esta etapa se eliminan las ceras y otros compuestos hidrofóbicos mediante una maceración con etanol absoluto o mezclado con otros solventes orgánicos como el tolueno, la extracción de polisacáridos pécticos con agua en ebullición, el desalmidonado y la desproteinización por tratamientos enzimáticos, la eliminación de las maltodextrinas con lavados de agua destilada, la remoción de la proteína y de la lignina residuales por medio de un tratamiento con clorito de sodio y la eliminación de minerales con el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA).

III. **Extracción:** esta etapa consiste en la concentración y extracción del compuesto objetivo a partir de la fuente de extracción pretratada. En este caso, la extracción de los AX puede ser realizada con álcalis, con ácidos y con enzimas. En la extracción alcalina se genera el hinchamiento de la celulosa, por acción de los aniones hidroxilo (OH^-) causando deslignificación y ruptura de los enlaces éster intermoleculares, lo que aumenta la solubilidad de los AX y se afecta la estructura nativa del polímero. Este tratamiento se realiza con álcalis fuertes como la cal ($Ca(OH)_2$). De hecho, anteriormente ya ha sido reportado el uso de la cal para la extracción de los AX a partir de diferentes materiales lignocelulósicos, tales como el pericarpio de centeno (Bender et al., 2017; Bender, Nemeth, et al., 2018; Bender, Regner, et al., 2018), de pericarpio y de bagazo de sorgo (Miafo et al., 2021), de pericarpio de trigo (Bergmans et al., 1996; Schooneveld-Bergmans et al., 1998), de hojas de maíz (Ogawa et al., 2005) y de pericarpio de maíz (Doner et al., 1998).

IV. **Aislamiento y purificación:** después del proceso anterior, con frecuencia se extrae el compuesto objetivo junto con otros compuestos que actúan como impurezas, lo que requiere una etapa adicional de aislamiento para obtener un extracto más purificado. En este caso, los AX pueden ser aislados utilizando precipitación por acidificación, con etanol, por fraccionamiento de membrana, por cromatografía de exclusión por tamaño o por cromatografía de intercambio iónico. Posteriormente, para la purificación de los AX, destacan los métodos enzimáticos y la diálisis.

V. **Obtención del producto:** esta etapa tiene como objetivo estabilizar el compuesto objetivo para que pueda transformarse químicamente en otros productos, introducirse en el mercado o aplicarse a otros productos donde mantenga sus propiedades principales y pueda llegar al usuario final. Por ejemplo, para la obtención de los AX en polvo, a partir de las etapas anteriores, se necesita eliminar el agua por secado a vacío a 50°C, por liofilización, por aspersión o por intercambio de solventes utilizando etanol y acetona.

Figura 5. Proceso de recuperación universal de 5 etapas con tecnologías convencionales (a) y con tecnologías emergentes (b) (Lazcano-Hernández et al., 2023; Pérez Flores et al., 2022; Rodríguez-Viveros et al., 2023).



Ventajas del uso de la cal para la extracción de arabinoxilanos

El dihidróxido de calcio o hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$), es también conocido como cal, cal apagada, cal muerta o cal hidratada, se utiliza para la extracción de hemicelulosa a partir de la BL, debido a sus propiedades químicas y a su capacidad para facilitar la descomposición y la liberación de los compuestos orgánicos de interés, presentes en dicha biomasa, tales como la fracción de hemicelulosa. Por ejemplo, el pretratamiento con cal es un método probado para eliminar la lignina de la BL sin afectar su porción de carbohidratos (Kudakasseril Kurian et al., 2014).

Anteriormente, se mencionó que un obstáculo importante durante la biorefinación de la BL es su recalcitrancia, la cual se debe a la estructura altamente cristalina de la celulosa que está incrustada en una matriz de lignina y de hemicelulosa, y esto hace necesario que se lleve a cabo un proceso de pretratamiento adecuado para facilitar el acceso de las enzimas a estos polisacáridos de la BL. En ese sentido, el proceso de pretratamiento con cal consiste en mezclar la cal con agua, rociarla sobre la BV y almacenarla (Kumar et al., 2009). No obstante, desde el punto de vista de la EURCB, el tratamiento con un álcali es realizado durante la etapa de extracción de los AX a partir de diferentes materiales lignocelulósicos.

A continuación, se proporcionan algunas ventajas de utilizar la cal para obtener la fracción de hemicelulosa a partir de la BL (Dal Pozzo et al., 2018; Jönsson & Martín, 2016; Kudakasseril Kurian et al., 2014; Kumar et al., 2009; H. V. Lee et al., 2014; Miafo et al., 2021; Solier et al., 2022; F. Xu et al., 2019):

I. **Facilidad de disponibilidad y bajo costo:** la cal es un compuesto relativamente económico y fácilmente accesible. Esto permite que la mayoría de los laboratorios e industrias que trabajan con BL y procesos de biorrefinación lo usen. Además, es menos costosa por kilogramo de hidróxido, frente a los hidróxidos de sodio, de potasio y de amonio.

II. **Amigable con el ambiente:** la cal tiene propiedades consideradas “verdes” en términos de reciclabilidad, estabilidad química, no inflamabilidad y no volatilidad. Esto lo convierte en una opción respetuosa con el medio ambiente para la extracción de AX.

III. **Selectividad:** la estrategia principal del pretratamiento alcalino es romper la estructura de la lignina presente en la BL, lo que mejora la susceptibilidad de la celulosa y de la hemicelulosa para otros tratamientos. Además, en condiciones alcalinas, se produce la solvatación parcial de la fracción de hemicelulosa, lo cual hace que el uso de la cal permita la extracción selectiva de los AX.

IV. **Reducción de impurezas:** además de solvatar la hemicelulosa, la cal también puede ayudar a eliminar impurezas y contaminantes residuales, presentes en la BL, que hayan permanecido después de realizar el paso de "separación de macro y micromoléculas" de la EURCB, tales como: ácidos, pigmentos, compuestos inorgánicos, ceras, furfural, entre otros.

V. **Proceso relativamente suave:** la acción de la cal es menos severa en comparación con otros reactivos más fuertes, tales como el hidróxido de sodio o el hidróxido de potasio. Esto puede ser beneficioso para evitar la degradación excesiva de los componentes de la BL.

VI. **Compatibilidad con diferentes tipos de biomasa:** la cal puede ser utilizada con una amplia variedad de biomasas, incluyendo maderas, residuos agrícolas, SA y otros materiales lignocelulósicos.

El mecanismo de la extracción de los AX implica la saponificación de los enlaces éster intermoleculares, que entrecruzan al xilano (hemicelulosa) con la lignina (Y. Sun & Cheng, 2002). La porosidad del material aumentará con la eliminación del reticulante. La escisión de estos enlaces éster se sustituye por un acilo nucleófilo en presencia de la cal para formar una sal carboxílica y un alcohol (Pedersen & Meyer, 2010). Además, la degradación alcalina de la lignina también implica la escisión de dos tipos de enlaces éter arilo: $C_{alifático}$-O-$C_{aromático}$ y $C_{aromático}$-O-$C_{aromático}$, lo que conduce a la producción de AF y de ácido p-cumárico. Adicionalmente, la presencia de la cal produce el hinchamiento de la celulosa, dando lugar a un aumento de la superficie de contacto interna, conduciendo a una disminución en el grado de polimerización y cristalinidad de la celulosa y a la solvatación parcial del xilano (hemicelulosa) (H. V. Lee et al., 2014; Mankar et al., 2021).

Finalmente, es importante tener en cuenta que, si bien el uso de la cal ofrece ciertas ventajas, cada proceso y material de partida pueden requerir ajustes específicos en términos de concentración,

temperatura y tiempo de tratamiento de extracción. Además, siempre se deben considerar aspectos medioambientales y de seguridad al trabajar con sustancias químicas como la cal.

CONCLUSIONES

El uso de la cal como agente de extracción en el contexto de la EURCB se ha consolidado como una alternativa sostenible y eficaz para la obtención de AX a partir de la BL. Esta estrategia se enmarca dentro de los principios de la biorrefinería y la economía circular, abordando de manera práctica la recalcitrancia estructural de la BL mediante un pretratamiento alcalino. Este proceso facilita la ruptura eficiente de los enlaces entre lignina y hemicelulosa, permitiendo la recuperación selectiva de AX, compuestos con aplicaciones prometedoras en sectores como la alimentación, la farmacéutica y la cosmética.

Además, el bajo costo, la amplia disponibilidad y el perfil ambientalmente amigable de la cal convierten a este método en una solución viable para la valorización de subproductos agrícolas, forestales e industriales. Su adaptabilidad a diferentes tipos de BL refuerza su potencial como herramienta en la gestión sostenible de recursos.

A nivel práctico, esta metodología podría integrarse en sistemas industriales de biorrefinería para maximizar el aprovechamiento de la BL, reduciendo al mismo tiempo la generación de residuos. No obstante, para su implementación a gran escala, es necesario optimizar parámetros específicos del proceso, como la concentración de cal, el tiempo y la temperatura de extracción, adaptándolos a las características particulares de cada tipo de BL.

Desde una perspectiva aplicada, futuras investigaciones podrían centrarse en el desarrollo de métodos de pretratamiento más eficientes y sostenibles, que minimicen el impacto ambiental y mejoren la eficiencia en la extracción de compuestos bioactivos. La incorporación de tecnologías emergentes, como el uso de ultrasonido o microondas durante la extracción, representa una oportunidad para reducir los tiempos de procesamiento y aumentar los rendimientos.

Asimismo, la optimización de la EURCB podría mejorar la selectividad y la pureza de los AX extraídos, incrementando su valor añadido en aplicaciones industriales. Por ejemplo, el establecimiento de

protocolos estandarizados para la extracción de AX a partir de diversas fuentes de BL facilitaría su adopción a nivel industrial.

Un avance prometedor es la integración de herramientas de inteligencia artificial (IA) para optimizar los procesos de extracción. La IA podría emplearse para modelar condiciones ideales, predecir rendimientos, analizar datos en tiempo real y diseñar experimentos automatizados. Estas capacidades permitirían aumentar la precisión de los procesos y acelerar la innovación en la obtención de compuestos bioactivos.

Finalmente, explorar y ampliar las aplicaciones industriales de los AX extraídos, como ingredientes funcionales en alimentos, sistemas de liberación controlada en fármacos o en la creación de materiales biocompatibles, podría potenciar el impacto práctico de esta metodología. La implementación de estas soluciones contribuiría al desarrollo de sistemas de biorrefinería más eficientes, promoviendo una economía circular y una transición hacia procesos industriales más sostenibles.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma del estado de Hidalgo (UAEH) y al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el soporte brindado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguedo, M., Fougnies, C., Dermience, M., & Richel, A. (2014). Extraction by three processes of arabinoxylans from wheat bran and characterization of the fractions obtained. *Carbohydrate Polymers*, *105*(1), 317–324. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.01.096

Araujo-Chapa, A. P., Urías-Orona, V., Niño-Medina, G., Muy-Rangel, D., de la Garza, A. L., & Castro, H. (2023). Dietary Fiber from Soybean (Glycine max) Husk as Fat and Phosphate Replacer in Frankfurter Sausage: Effect on the Nutritional, Physicochemical and Nutraceutical Quality. *Molecules*, *28*(13). https://doi.org/10.3390/molecules28134997

Bender, D., Nemeth, R., Cavazzi, G., Turoczi, F., Schall, E., D'Amico, S., Török, K., Lucisano, M., Tömösközi, S., & Schoenlechner, R. (2018). Characterization of rheological properties of rye arabinoxylans in buckwheat model systems. *Food Hydrocolloids*, *80*, 33–41. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.01.035

Bender, D., Nemeth, R., Wimmer, M., Götschhofer, S., Biolchi, M., Török, K., Tömösközi, S., D'Amico, S., & Schoenlechner, R. (2017). Optimization of Arabinoxylan Isolation from Rye Bran by Adapting Extraction Solvent and Use of Enzymes. *Journal of Food Science*, *82*(11), 2562–2568. https://doi.org/10.1111/1750-3841.13920

Bender, D., Regner, M., D'Amico, S., Jäger, H., Tömösközi, S., & Schoenlechner, R. (2018). Effect of Differently Extracted Arabinoxylan on Gluten-Free Sourdough-Bread Properties. *Journal of Food Quality*, *2018*. https://doi.org/10.1155/2018/5719681

Bergmans, M. E. F., Beldman, G., Gruppen, H., & Voragen, A. G. J. (1996). Optimisation of the selective extraction of (glucurono)arabinoxylans from wheat bran: Use of barium and calcium hydroxide solution at elevated temperatures. *Journal of Cereal Science*, *23*(3), 235–245. https://doi.org/10.1006/jcrs.1996.0024

Cantu-Jungles, T. M., Iacomini, M., Cipriani, T. R., & Cordeiro, L. M. C. (2017). Isolation and characterization of a xylan with industrial and biomedical applications from edible açaí berries (Euterpe oleraceae). *Food Chemistry*, *221*, 1595–1597. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.133

Carvajal-Millan, E., Rascón-Chu, A., Márquez-Escalante, J. A., Micard, V., León, N. P. de, & Gardea, A. (2007). Maize bran gum: Extraction, characterization and functional properties. *Carbohydrate Polymers*, *69*(2), 280–285. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.10.006

Chandel, A. K., Garlapati, V. K., Singh, A. K., Antunes, F. A. F., & da Silva, S. S. (2018). The path forward for lignocellulose biorefineries: Bottlenecks, solutions, and perspective on commercialization. *Bioresource Technology*, *264*, 370–381. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.004

Chen, J., Dong, J., Yang, G., He, M., Xu, F., & Fatehi, P. (2018). A process for purifying xylosugars of pre-hydrolysis liquor from kraft-based dissolving pulp production process. *Biotechnology for Biofuels*, *11*(1). https://doi.org/10.1186/s13068-018-1336-0

Chheda, J. N., Huber, G. W., & Dumesic, J. A. (2007). Liquid-phase catalytic processing of biomass-derived oxygenated hydrocarbons to fuels and chemicals. *Angewandte Chemie - International Edition*, *46*(38), 7164–7183. https://doi.org/10.1002/anie.200604274

Dal Pozzo, A., Moricone, R., Antonioni, G., Tugnoli, A., & Cozzani, V. (2018). Hydrogen Chloride Removal from Flue Gas by Low-Temperature Reaction with Calcium Hydroxide. *Energy and Fuels*, *32*(1), 747–756. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03292

De Anda-Flores, Y., Lizardi-Mendoza, J., Rascón-Chu, A., Tanori-Cordova, J., Martínez-López, A. L., & Carvajal-Millan, E. (2023). Enzymatic Treatment of Ferulated Arabinoxylans from Distillers Dried Grains with Solubles: Influence on the Fabrication of Covalent Electro-Sprayed Nanoparticles. *Polysaccharides*, *4*(4), 358–370. https://doi.org/10.3390/polysaccharides4040021

Doner, L. W., Chau, H. K., Fishman, M. L., & Hicks, K. B. (1998). An improved process for isolation of corn fiber gum. *Cereal Chemistry*, *75*(4), 408–411. https://doi.org/10.1094/CCHEM.1998.75.4.408

Escarnot, E., Aguedo, M., Agneessens, R., Wathelet, B., & Paquot, M. (2011). Extraction and characterization of water-extractable and water-unextractable arabinoxylans from spelt bran: Study of the hydrolysis conditions for monosaccharides analysis. *Journal of Cereal Science*, *53*(1), 45–52. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.09.002 v

Espinosa Negrín, A. M., López González, L. M., & Casdelo Gutiérrez, N. L. (2021). Pretratamiento De Biomasas Lignocelulósicas: Breve Revisión De Los Principales Métodos Utilizados. *Revista Centro Azúcar*, *48*, 108–119. http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v48n3/2223-4861-caz-48-03-108.pdf

Fadel, A., Mahmoud, A. M., Ashworth, J. J., Li, W., Ng, Y. L., & Plunkett, A. (2018). Health-related effects and improving extractability of cereal arabinoxylans. *International Journal of Biological Macromolecules*, *109*, 819–831. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.055

Fatehi, P., & Chen, J. (2016). *Extraction of Technical Lignins from Pulping Spent Liquors, Challenges and Opportunities*. 35–54. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1965-4_2

Galanakis, C. M. (2015). The universal recovery strategy. In *Food Waste Recovery: Processing Technologies and Industrial Techniques* (pp. 59–81). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800351-0.00003-1

García-Curiel, L., Pérez-Flores, J. G., Contreras-López, E., Pérez-Escalante, E., & Paz-Samaniego, R. (2023). Evaluating the application of an arabinoxylan-rich fraction from brewers' spent grain as a release modifier of drugs. *Natural Product Research*. https://doi.org/10.1080/14786419.2023.2214841

Habibi, Y., Mahrouz, M., & Vignon, M. R. (2002). Isolation and structure of D-xylans from pericarp seeds of Opuntia ficus-indica prickly pear fruits. *Carbohydrate Research*, *337*(17), 1593–1598. https://doi.org/10.1016/S0008-6215(02)00186-6

Hasanov, I., Raud, M., & Kikas, T. (2020). The role of ionic liquids in the lignin separation from lignocellulosic biomass. *Energies*, *13*(18), 4864. https://doi.org/10.3390/en13184864

Himmel, M. E., Ding, S. Y., Johnson, D. K., Adney, W. S., Nimlos, M. R., Brady, J. W., & Foust, T. D. (2007). Biomass recalcitrance: Engineering plants and enzymes for biofuels production. *Science*, *315*(5813), 804–807. https://doi.org/10.1126/science.1137016

Hussain, M. A., Muhammad, G., Jantan, I., & Bukhari, S. N. A. (2016). Psyllium arabinoxylan: A versatile biomaterial for potential medicinal and pharmaceutical applications. *Polymer Reviews*, *56*(1), 1–30. https://doi.org/10.1080/15583724.2015.1078351

Jönsson, L. J., & Martín, C. (2016). Pretreatment of lignocellulose: Formation of inhibitory by-products and strategies for minimizing their effects. *Bioresource Technology*, *199*, 103–112. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.009

Karagoz, P., Khiawjan, S., Marques, M. P. C., Santzouk, S., Bugg, T. D. H., & Lye, G. J. (2023). Pharmaceutical applications of lignin-derived chemicals and lignin-based materials: linking lignin source and processing with clinical indication. *Biomass Conversion and Biorefinery*. https://doi.org/10.1007/s13399-023-03745-5

Khan, M. U. A., Haider, S., Shah, S. A., Razak, S. I. A., Hassan, S. A., Kadir, M. R. A., & Haider, A. (2020). Arabinoxylan-co-AA/HAp/TiO2 nanocomposite scaffold a potential material for bone tissue engineering: An in vitro study. *International Journal of Biological Macromolecules*, *151*, 584–594. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.142

Khan, M. U. A., Raza, M. A., Razak, S. I. A., Abdul Kadir, M. R., Haider, A., Shah, S. A., Mohd Yusof, A. H., Haider, S., Shakir, I., & Aftab, S. (2020). Novel functional antimicrobial and biocompatible arabinoxylan/guar gum hydrogel for skin wound dressing applications. *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, *14*(10), 1488–1501. https://doi.org/10.1002/term.3115

Kudakasseril Kurian, J., Gariepy, Y., Lefsrud, M., Orsat, V., Seguin, P., Yaylayan, V., & Raghavan, G. S. V. (2014). Experimental Study on Calcium Hydroxide-Assisted Delignification of Hydrothermally Treated Sweet Sorghum Bagasse. *International Journal of Chemical Engineering*, *2014*. https://doi.org/10.1155/2014/684296

Kumar, P., Barrett, D. M., Delwiche, M. J., & Stroeve, P. (2009). Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, *48*(8), 3713–3729. https://doi.org/10.1021/ie801542g

Lazcano-Hernández, C. Y., Hernández-Hernández, A. A., García-Curiel, L., Pérez-Escalante, E., Contreras-López, E., & Pérez-Flores, J. G. (2023). Extracción de compuestos bioactivos a partir de los subproductos de la tuna (Opuntia ficus-indica spp.): Tendencias y aplicaciones recientes en alimentos. *Investigación y Desarrollo En Ciencia y Tecnología de Alimentos*, *8*(1), 785–794. https://doi.org/10.29105/idcyta.v8i1.101

Lee, S. H., Doherty, T. V., Linhardt, R. J., & Dordick, J. S. (2009). Ionic liquid-mediated selective extraction of lignin from wood leading to enhanced enzymatic cellulose hydrolysis. *Biotechnology and Bioengineering*, *102*(5), 1368–1376. https://doi.org/10.1002/bit.22179

Lee, H. V., Hamid, S. B. A., & Zain, S. K. (2014). Conversion of lignocellulosic biomass to nanocellulose: Structure and chemical process. *Scientific World Journal*, *2014*. https://doi.org/10.1155/2014/631013

Limayem, A., & Ricke, S. C. (2012). Lignocellulosic biomass for bioethanol production: Current perspectives, potential issues and future prospects. *Progress in Energy and Combustion Science*, *38*(4), 449–467. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2012.03.002

Mankar, A. R., Pandey, A., Modak, A., & Pant, K. K. (2021). Pretreatment of lignocellulosic biomass: A review on recent advances. *Bioresource Technology*, *334*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125235

Marquez-Escalante, J., Carvajal-Millan, E., López-Franco, Y. L., Valenzuela-Soto, E. M., & Rascón-Chu, A. (2018). Efecto prebiótico de los Arabinoxilanos y los Arabinoxilo-Oligosacáridos y su relación con la promoción de la buena salud. *CienciaUAT*, *13*(1), 146. https://doi.org/10.29059/cienciauat.v13i1.922

Méndez-Encinas, M. A., Carvajal-Millan, E., Rascón-Chu, A., López-Franco, Y. L., & Lizardi-Mendoza, J. (2019). Arabinoxilanos y la Relación de la Fracción Proteica Remanente con la Capacidad Gelificante del Polisacárido. *Acta Universitaria*, *29*, 1–19. https://doi.org/10.15174/au.2019.1755

Miafo, A. P. T., Muralikrishna, G., Koubala, B. B., & Kansci, G. (2021). Purification and structural characterization of calcium hydroxide isolated arabinoxylans derived from bran, spent grain and sorghum grains. *Journal of Cereal Science*, *100*. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103266

Morales-Burgos, A. M., Carvajal-Millan, E., López-Franco, Y. L., Sotelo-Cruz, N., Rascón-Chu, A., Lizardi-Mendoza, J., & Campa-Mada, A. C. (2017). Cereal arabinoxylans: Bioactive polysaccharides and potential additives in foods and pharmaceutical products. In *Agricultural Research Updates* (Vol. 17, pp. 135–159). Nova Science Publishers, Inc.

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

Ogaji, I. J., Nep, E. I., & Audu-Peter, J. D. (2012). Advances in Natural Polymers as Pharmaceutical Excipients. *Pharmaceutica Analytica Acta*, *03*(01). https://doi.org/10.4172/2153-2435.1000146

Ogawa, K., Takeuchi, M., & Nakamura, N. (2005). Immunological effects of partially hydrolyzed arabinoxylan from corn husk in mice. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, *69*(1), 19–25. https://doi.org/10.1271/bbb.69.19

Pedersen, M., & Meyer, A. S. (2010). Lignocellulose pretreatment severity - relating pH to biomatrix opening. *New Biotechnology*, *27*(6), 739–750. https://doi.org/10.1016/j.nbt.2010.05.003

Pérez-Flores, J. G., Castañeda-Ovando, A., Contreras-López, E., Bautista-Ávila, M., Velázquez-González, C., & Cariño-Cortés, R. (2017). Desarrollo de biopelículas termoplastificadas a base de arabinoxilanos extraídos del bagazo de cebada. *Tópicos de Investigación En Ciencias de La Tierra y Materiales*, *4*, 37–43. https://doi.org/10.29057/aactm.v4i4.9378

Pérez-Flores, J.G., Castañeda-Ovando, A., Velázquez-González, C., Bautista-Ávila, M., & Contreras-López, E. (2022). Arabinoxilanos recuperados de bagazo de cebada y su aplicación como vehículos de liberación de metformina. *Tópicos de Investigación En Ciencias de La Tierra y Materiales*, *5*(5), 163–167. https://doi.org/10.29057/aactm.v5i5.9128

Pérez-Flores, Jesús Guadalupe, Contreras-López, E., Castañeda-Ovando, A., Pérez-Moreno, F., Aguilar-Arteaga, K., Álvarez-Romero, G. A., & Téllez-Jurado, A. (2019). Physicochemical characterization of an arabinoxylan-rich fraction from brewers' spent grain and its application as a release matrix for caffeine. *Food Research International*, *116*, 1020–1030. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.09.041

Pérez-Flores, Jesús Guadalupe, García-Curiel, L., Pérez-Escalante, E., Contreras-López, E., & Olloqui, E. J. (2024). Arabinoxylans matrixes as a potential material for drug delivery systems development - A bibliometric analysis and literature review. *Heliyon*, *10*(3). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25445

Pérez Flores, J. G., García-Curiel, L., Pérez-Escalante, E., Paz-Samaniego, R., Contreras-López, E., & Hernández-Hernández, A. A. (2022). Integración de Subproductos Agroalimentarios Dentro de una Economía Circular: el Caso de los Arabinoxilanos Obtenidos de Subproductos del Procesamiento de Cereales. *Quimiofilia*, *1*(1), 12–16. https://doi.org/10.56604/qfla2022121216

Persson, T., Dinh, E., & Jönsson, A. S. (2009). Improvement of arabinoxylan isolation from barley husks. *Food and Bioproducts Processing*, *87*(3), 228–233. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2008.10.001

Rodríguez-Viveros, N., Paz-Samaniego, R., Hernández-Hernández, A. A., García-Curiel, L., Pérez-Escalante, E., Contreras-López, E., & Pérez-Flores, J. G. (2023). Extracción de arabinoxilanos de subproductos agroindustriales adaptada a la estrategia universal de recuperación de compuestos bioactivos. *Investigación y Desarrollo En Ciencia y Tecnología de Alimentos*, *8*(1), 774–784. https://doi.org/10.29105/idcyta.v8i1.100

Saputra, H., Simonsen, J., & Li, K. (2004). Effect of extractives on the flexural properties of wood/plastic composites. *Composite Interfaces*, *11*(7), 515–524. https://doi.org/10.1163/1568554042722964

Schooneveld-Bergmans, M. E. F., Hopman, A. M. C. P., Beldman, G., & Voragen, A. G. J. (1998). Extraction and partial characterization of feruloylated glucuronoarabinoxylans from wheat bran. *Carbohydrate Polymers*, *35*(1–2), 39–47. https://doi.org/10.1016/S0144-8617(97)00229-4

Singh, B., Kumari, A., Sharma, P., & Mohan, M. (2023). Fabrication of arabinoxylan psyllium-phosphated polymers for biomedical applications. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, *29*. https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2023.100351

Singh, B., Singh, J., Dhiman, A., & Mohan, M. (2022). Synthesis and characterization of arabinoxylan-bis[2-(methacryloyloxy)ethyl] phosphate crosslinked copolymer network by high energy gamma radiation for use in controlled drug delivery applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, *200*, 206–217. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.12.151

Singh, J. K., Vyas, P., Dubey, A., Upadhyaya, C. P., Kothari, R., Tyagi, V. V., & Kumar, A. (2018). Assessment of different pretreatment technologies for efficient bioconversion of lignocellulose to ethanol. *Frontiers in Bioscience - Scholar*, *10*(2), 350–371. https://doi.org/10.2741/s521

Smit, A. T., Van Zomeren, A., Dussan, K., Riddell, L. A., Huijgen, W. J. J., Dijkstra, J. W., & Bruijnincx, P. C. A. (2022). Biomass Pre-Extraction as a Versatile Strategy to Improve Biorefinery Feedstock Flexibility, Sugar Yields, and Lignin Purity. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, *10*(18), 6012–6022. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c00838

Solier, Y. N., Mocchiutti, P., Cabrera, M. N., Saparrat, M. C. N., Zanuttini, M. Á., & Inalbon, M. C. (2022). Alkali-peroxide treatment of sugar cane bagasse. Effect of chemical charges on the efficiency of xylan isolation and susceptibility of bagasse to saccharification. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *12*(3), 567–576. https://doi.org/10.1007/s13399-020-00776-0

Sun, S., Sun, S., Cao, X., & Sun, R. (2016). The role of pretreatment in improving the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic materials. *Bioresource Technology*, *199*, 49–58. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.061

Sun, Y., & Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: A review. *Bioresource Technology*, *83*(1), 1–11. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00212-7

Taherdanak, M., & Zilouei, H. (2014). Improving biogas production from wheat plant using alkaline pretreatment. *Fuel*, *115*, 714–719. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.094

Varriale, L., Volkmar, M., Weiermüller, J., & Ulber, R. (2022). Effects of Pretreatment on the Biocatalysis of Renewable Resources. *Chemie-Ingenieur-Technik*, *94*(11), 1818–1826. https://doi.org/10.1002/cite.202200137

Vasić, K., Knez, Ž., & Leitgeb, M. (2021). Bioethanol production by enzymatic hydrolysis from different lignocellulosic sources. *Molecules*, *26*(3). https://doi.org/10.3390/molecules26030753

Wang, G., Qi, S., Xia, Y., Parvez, A. M., Si, C., & Ni, Y. (2020). Mild One-Pot Lignocellulose Fractionation Based on Acid-Catalyzed Biphasic Water/Phenol System to Enhance Components' Processability. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, *8*(7), 2772–2782. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06643

Xu, F., Chen, J., Yang, G., Ji, X., Wang, Q., Liu, S., & Ni, Y. (2019). Combined treatments consisting of calcium hydroxide and activate carbon for purification of xylo-oligosaccharides of pre-hydrolysis liquor. *Polymers*, *11*(10). https://doi.org/10.3390/polym11101558

Xu, J., Cheng, J. J., Sharma-Shivappa, R. R., & Burns, J. C. (2010). Lime pretreatment of switchgrass at mild temperatures for ethanol production. *Bioresource Technology*, *101*(8), 2900–2903. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.015

Yadav, M. P., Kale, M. S., Hicks, K. B., & Hanah, K. (2017). Isolation, characterization and the functional properties of cellulosic arabinoxylan fiber isolated from agricultural processing by-products, agricultural residues and energy crops. *Food Hydrocolloids*, *63*, 545–551. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.09.022

Yilmaz-Turan, S., Lopez-Sanchez, P., Jiménez-Quero, A., Plivelic, T. S., & Vilaplana, F. (2022). Revealing the mechanisms of hydrogel formation by laccase crosslinking and regeneration of feruloylated arabinoxylan from wheat bran. *Food Hydrocolloids*, *128*. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107575

Zhang, Y. H. P. (2008). Reviving the carbohydrate economy via multi-product lignocellulose biorefineries. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, *35*(5), 367–375. https://doi.org/10.1007/s10295-007-0293-6

Zhang, Z., Smith, C., & Li, W. (2014). Extraction and modification technology of arabinoxylans from cereal by-products: A critical review. *Food Research International*, *65*(PC), 423–436. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.05.068