



Hidrólisis ácida. Método convencional para la revalorización de biomasa lignocelulósica

Alejandro Sánchez Mesa
Tecnológico de Antioquia Iu, Colombia.

Dr. Julio César Gómora Hernandez
Tecnológico de Estudios Superiores de
Tianguistenco, México.

Dra. Leidy Astrid Hoyos
Tecnológico de Antioquia Iu, Colombia

Abstract

Lignocellulosic biomass is the most abundant natural source around the world, from which a wide kind of chemicals of commercial interest can be produced. Acid hydrolysis is a chemical method commonly employed to transform lignocelluloses into value-add chemicals such as easily fermentable sugars; mainly glucose, xylose and arabinose, and cellulose derivatives by either single or complex processes. In this paper, a general description of acid hydrolysis technology as conventional pretreatment method or as direct technique to produce monomeric sugars, as well as its role on lignocelluloses revalorization, mathematical models and the main chemical compounds produced by acid hydrolysis of lignocellulosic biomass are presented and described.

Keywords: Lignocellulose, chemical treatment, revalorization, natural sources.

Resumen

La biomasa lignocelulósica es el recurso natural más abundante del planeta, la cual puede aprovecharse para la producción de compuestos químicos de interés comercial. La hidrólisis ácida es un método químico comúnmente utilizado para transformar dicha biomasa en compuestos de valor agregado como azúcares fácilmente fermentables; glucosa, xilosa y arabinosa principalmente, y derivados de celulosa en procesos de una o más etapas. En el presente trabajo se describe un panorama general de la hidrólisis ácida como método convencional de pretratamiento y para la extracción de azúcares, así como el papel que juega durante el proceso de revalorización de lignocelulosa, además, se resume la importancia, modelos matemáticos y compuestos químicos principalmente

producidos mediante la hidrólisis ácida de lignocelulosas.

Palabras clave: Lignocelulosa, tratamiento químico, revalorización, recursos naturales.

Introducción

Uno de los residuos mayormente generados en el mundo son los lignocelulósicos, producidos a través de diferentes actividades como la agricultura, industria agroalimenticia, actividades forestales y domésticas (1). Se ha estimado que la generación de estos residuos excede los 200 billones de toneladas anuales en base seca, por lo cual representan una fuente económica, renovable y potencial para su transformación en compuestos químicos de interés comercial (2). Sin embargo, la estructura química de la biomasa lignocelulósica le otorga una alta resistencia a la descomposición natural y a su transformación química, por lo cual es necesario someterla a tratamientos que incrementan la eficiencia de los procesos posteriores. Uno de los tratamientos más utilizados es la hidrólisis ácida, la cual consiste en mezclar un ácido orgánico o inorgánico con la biomasa lignocelulósica para alterar su estructura natural, aumentar su área superficial y modificar su estructura química. La hidrólisis ácida suele utilizarse como un método para la extracción tanto de azúcares fácilmente fermentables como de celulosa cristalina. En el presente trabajo se describe un panorama general de la biomasa lignocelulósica y de su revalorización mediante la técnica de hidrólisis ácida. Además, se describen de manera general los modelos matemáticos aplicados a la hidrólisis ácida, su importancia, aplicación y los principales productos obtenidos durante la reacción.

Biomasa lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica comprende una gran variedad de recursos tales como los forestales, agrícolas, agroindustriales y todo tipo de plantas. Los residuos generados en estos sectores se conocen como residuos lignocelulósicos (Figura 1), los cuales se producen en abundancia alrededor del mundo y usualmente no son revalorizados ni aprovechados. Debido a su excesiva generación y a la problemática de la contaminación ambiental, en años recientes se ha propuesto el término *economía circular* que tiene como premisa la nula generación de residuos y el máximo aprovechamiento de los recursos naturales para su transformación en compuestos de interés comercial, esto sugiere un alto potencial económico y productivo de los residuos lignocelulósicos.

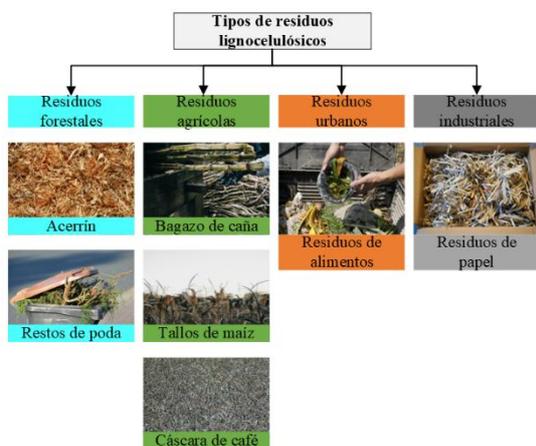


Figura 1: Ejemplos de residuos lignocelulósicos y su origen.

Los residuos lignocelulósicos cuando se disponen de manera errónea propician diferentes problemáticas ambientales y sanitarias tales como la contaminación del agua, erosión del suelo y la emisión de gases de efecto invernadero durante su descomposición natural (3). Sin embargo, con el creciente conocimiento científico sobre este tipo de residuos, así

como su amplia distribución, abundancia y accesibilidad, se han considerado como materia prima para la producción de diferentes materiales tales como papel, fibras, combustibles, químicos, fármacos, fertilizantes, entre otros (4).

La lignocelulosa se compone principalmente de tres biopolímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina. Algunos compuestos secundarios tales como aceites, cenizas, almidón, pectinas y gomas también se encuentran presentes, sin embargo, su composición depende de la naturaleza y del tipo de biomasa.

La celulosa es un homopolímero compuesto por unidades monoméricas de glucosa que forman largas cadenas lineales, las moléculas de glucosa se mantienen unidas entre sí a través de enlaces β 1-4 glucosídicos. La celulosa es un material inodoro e incoloro que es insoluble en agua con fórmula química: $(C_6H_{10}O_5)_n$. La Figura 2 muestra la estructura molecular de la celulosa.

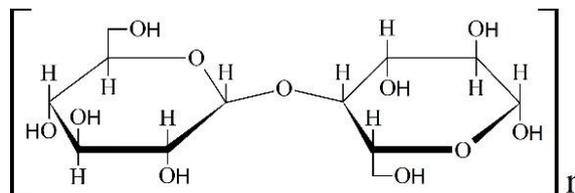


Figura 2: Estructura molecular de la celulosa.

La celulosa es el biopolímero más abundante en el planeta, su alta biodegradabilidad y sus propiedades mecánicas despiertan interés para su aplicación en formulación de pinturas, cosméticos, bioplásticos y excipientes para fármacos. Además, aumenta el carácter biodegradable de los materiales, disminuyen su impacto ambiental y biodegradabilidad.

La hemicelulosa, a diferencia de la celulosa es un heteropolímero con una

estructura ramificada (Figura 3), se compone de diferentes azúcares de 5 o 6 carbonos como arabinosa, galactosa, manosa, glucosa y principalmente xilosa. En las plantas tiene la función de crear una unión entre la lignina y la celulosa (4). Este heteropolisacárido es fácilmente hidrolizable por medios biológicos y químicos, además de tener un menor grado de polimerización y de cristalinidad que la celulosa.

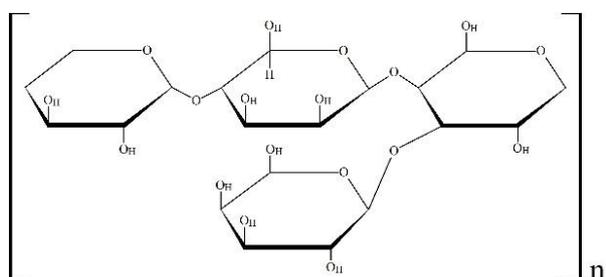


Figura 3: Estructura molecular de la hemicelulosa.

El segundo biopolímero más abundante en la naturaleza es la lignina, la cual se caracteriza por poseer una estructura basada en 3 unidades aromáticas fenólicas, estas son los alcoholes: cumarílico, coniferílico y sinapílico (Figura 4). La composición de la lignina varía según el tipo de fuente y de las condiciones ambientales en las cuales se desarrolla la planta. Este biopolímero es de interés industrial ya que es precursor para la obtención de compuestos poliméricos, adhesivos, floculantes, antioxidantes, fibras, materia prima en el sector de la energía, entre otras aplicaciones (5). La lignina brinda rigidez a las plantas para su soporte, al igual que resistencia a la presión hídrica, posee un color oscuro que protege a la planta de los rayos UV.

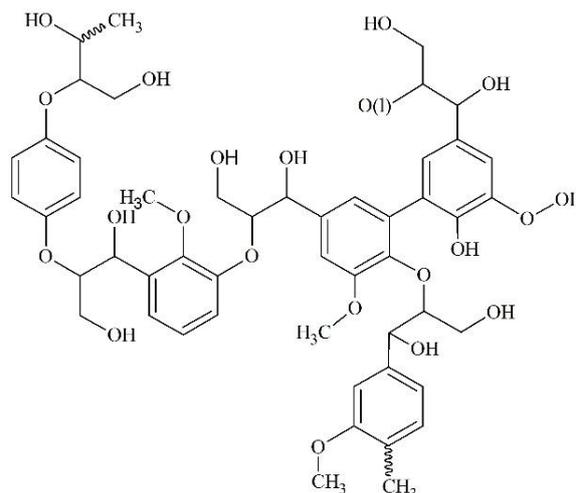


Figura 4: Estructura molecular de la lignina.

La investigación sobre el aprovechamiento de lignocelulosas y la necesidad de migrar a métodos de producción sostenibles y que acerquen a las industrias al modelo de economía circular, han proporcionado las vías para que sectores como el farmacéutico, agrícola, energético, entre otros, puedan obtener diversos productos a partir de los residuos lignocelulósicos, entre ellos se destacan los biopolímeros naturales y los derivados de celulosa. Otros productos que pueden ser producidos son los ácidos orgánicos de bajo peso molecular como el acético, propiónico, láctico y butírico, producidos mediante tratamientos biológicos, así como fertilizantes y biocombustibles como el biohidrógeno y biometano.

La limitante más importante que se tiene durante la revalorización de la lignocelulosa se atribuye a su alto contenido de lignina y cristalinidad de la celulosa que le confiere una alta estabilidad y resistencia mecánica y a los ataques físicos, químicos y biológicos, lo que hace indispensable el uso de pretratamientos que mejoren el aprovechamiento de la lignocelulosa y brinden mayores rendimientos en cuanto a la producción posterior de químicos (5).

Pretratamiento de la biomasa lignocelulósica

La descomposición de la biomasa lignocelulósica es compleja y difícil, y varía dependiendo del origen de la biomasa, debido a esto, el pretratamiento se convierte en un paso indispensable, que busca alterar la estructura fisicoquímica y las propiedades de la lignocelulosa para obtener componentes de interés industrial en etapas de proceso posteriores. El principal objetivo de los pretratamientos es corromper la matriz lignocelulósica, incrementar el área superficial, remover de manera parcial o total uno o más de los biopolímeros, alterar la estructura química, cristalinidad y grado de polimerización de la celulosa y aumentar el aprovechamiento posterior de la lignocelulosa (6). Los pretratamientos se clasifican en físicos, químicos, fisicoquímicos y biológicos (Figura 5).

Los tratamientos físicos tienen como objetivo disminuir el tamaño de partícula a través de procesos mecánicos y de irradiación. Los tratamientos químicos utilizan compuestos tales como ácidos, bases, líquidos iónicos, solventes orgánicos o agentes oxidantes para alterar la estructura de la matriz lignocelulósica y solubilizar de manera parcial o total a uno o más de los biopolímeros. El tratamiento ácido es conocido por su alta eficiencia para disolver a la hemicelulosa y de manera parcial a la celulosa, mientras que el uso de compuestos alcalinos y oxidantes tiene como objetivo la eliminación de la lignina. Algunos otros tratamientos químicos pueden mejorar la afinidad química de los biopolímeros para aplicaciones posteriores.

Los tratamientos fisicoquímicos al igual que los tratamientos químicos, buscan modificar las propiedades de la

matriz lignocelulósica para aumentar su reactividad y aprovechamiento. Los principales tratamientos encontrados en esta clasificación son la explosión de vapor catalizada, explosión con amonio, explosión de vapor y tratamientos a condiciones críticas. Por otro lado, los tratamientos biológicos hacen uso de microorganismos como bacterias y hongos, así como enzimas características que buscan la eliminación selectiva de un componente de la lignocelulosa. Los hongos de podredumbre café o blanca son utilizados para la eliminación de la lignina, mientras que las bacterias productoras de enzimas celulasas se usan para eliminar a la celulosa (5).



Figura 5: Diferentes tipos de pretratamiento y su clasificación.

Uno de los métodos de pretratamiento más utilizados es la hidrólisis ácida, debido a su capacidad para alterar la matriz lignocelulósica y para producir azúcares fácilmente fermentables a partir de la hemicelulosa y celulosa. Este método ha sido utilizado desde hace varias décadas y su uso persiste aún en la actualidad.

Hidrólisis ácida

La hidrólisis ácida es un proceso químico que puede utilizarse como pretratamiento para alterar la estructura química de la biomasa lignocelulósica o como método directo para la producción de azúcares fácilmente fermentables a partir de la

celulosa y hemicelulosa. Este método es ampliamente utilizado debido a su bajo costo y alta efectividad. La hidrólisis ácida se basa en el uso de diferentes ácidos como el sulfúrico, fosfórico, nítrico, acético, fluorhídrico, clorhídrico, entre otros, a diferentes concentraciones, temperaturas y tiempos de reacción. La hidrólisis ácida comúnmente puede realizarse de dos formas distintas: la primera a altas temperaturas y bajas concentraciones de ácido, y la segunda a bajas temperaturas y altas concentraciones de ácido, siendo la primera opción la más utilizada debido a su capacidad para extraer azúcares hemicelulósicos en tiempos de reacción cortos, sin embargo, su principal desventaja es la formación de compuestos inhibidores del crecimiento microbiano como los aldehídos furfural e hidroxi-metil furfural.

El proceso a altas concentraciones de ácido tiene como principal objetivo romper la estructura natural de la celulosa sin generar aldehídos inhibidores. Cabe resaltar que el uso de altas concentraciones de ácido puede generar problemas de corrosión, en tanto que la hidrólisis llevada a cabo a bajas concentraciones tiene la ventaja de usar menos reactivo y ser menos corrosiva y tóxica.

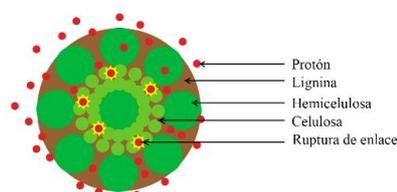


Figura 6: Difusión de protones hacia la celulosa, previa a la producción de azúcares

La reacción de hidrólisis ácida de lignocelulosa comienza con la difusión de los protones del ácido hacia la matriz

lignocelulósica (Figura 6), en donde se unen con el oxígeno glucosídico de la celulosa y hemicelulosa y rompen el enlace β 1 \rightarrow 4 que mantiene unidas a las moléculas de glucosa, generando de esta forma 1 molécula de agua y 2 moléculas de azúcar (6).

Durante la hidrólisis ácida las cadenas de polisacáridos de longitudes considerables, se transforman en oligosacáridos con extensiones variables de 2 a 10 unidades simples de azúcar, y finalmente estos oligosacáridos se convierten en azúcares monoméricos disueltos en fase líquida, conocida como hidrolizado.

La eficiencia de la hidrólisis ácida depende de diferentes factores como la temperatura, el tiempo de reacción y la concentración del ácido; los cuales definen la severidad del tratamiento ácido a través del Factor de Severidad Combinado (FSC). Este factor permite conocer el efecto de las condiciones de hidrólisis sobre la producción y degradación de azúcares, así como sobre los cambios fisicoquímicos que sufre la matriz lignocelulósica (7).

Matemáticamente el FSC se define tal y como se muestra en la Ecuación 1.

$$FSC = \log \left[t \cdot \frac{T - T_r}{e^{14,75}} \right] \quad (\text{Ec. 1})$$

En donde t es el tiempo de contacto en minutos, T y T_r la temperatura de reacción y de referencia (100 °C), respectivamente y 14.75 un coeficiente constante. El FSC se basa en el Factor de Severidad (FS) utilizado para determinar la severidad de la explosión de vapor catalizada y no catalizada, en donde no interviene la acción de un ácido.

Modelos cinéticos utilizados para estudiar la hidrólisis ácida

La idea de todos los procesos es que estos puedan ser escalados para su implementación a nivel industrial. El estudio cinético permite identificar las condiciones óptimas a las cuales debe operar un reactor para obtener la mayor eficiencia. A pesar de que la hidrólisis ácida de biomasa lignocelulósica es una reacción heterogénea que se lleva a cabo entre la biomasa sólida y la solución ácida líquida, la mayoría de los modelos cinéticos considera que esta reacción es de primer orden y pseudo-homogénea, es decir, que la biomasa se solubiliza antes de comenzar la reacción.

Para realizar un estudio cinético de la hidrólisis ácida de lignocelulosa, se deben obtener datos experimentales de la producción de azúcares y graficarlos en función del tiempo de reacción, para cada una de las temperaturas y concentraciones de ácido. Posteriormente se utilizan modelos matemáticos para ajustar los datos obtenidos y conocer la constante de velocidad de producción de azúcares. Gracias al estudio cinético, se puede estimar la producción de azúcares a condiciones no evaluadas de manera experimental y determinar las condiciones de operación que favorecen la producción de azúcares favoreciendo así a la escalabilidad y economía del proceso.

A lo largo de la historia, se han desarrollado diversos modelos cinéticos, dentro de los más empelados se encuentra el desarrollado por Saeman en 1945, el modelo bifásico, que es una versión modificada del anterior y el modelo de primer orden.

Modelo de Saeman

Este modelo fue utilizado por primera vez para estudiar la hidrólisis con ácido sulfúrico de la madera, se describe

cómo un proceso de dos reacciones secuenciales e irreversibles de primer orden. La primera reacción se asocia a la producción de azúcares y la segunda a su degradación, estos procesos están asociados a las constantes cinéticas k_1 y k_2 , respectivamente (8). Debido a su simpleza, este modelo se ha utilizado ampliamente utilizando diversos tipos de biomasa. La Figura 7 muestra un esquema general del modelo de Saeman.

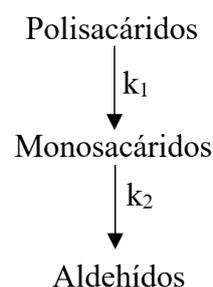


Figura 7: Esquema general del modelo cinético de Saeman

El modelo cinético de Saeman se muestra en la ecuación 2.

$$M = \frac{P_0 \cdot k_1}{k_2 - k_1} \left[e^{-k_1 \cdot t} - e^{-k_2 \cdot t} \right] \quad (\text{Ec. 2})$$

En donde M es la concentración de azúcares a los diferentes tiempos t , P_0 es la concentración inicial de polisacáridos y las constantes k_1 y k_2 tienen el significado mostrado en la Figura 6.

Modelo de primer orden

El modelo de primer orden es el más sencillo, considera únicamente la fase de producción de azúcares e ignora su degradación, este modelo establece que la velocidad de producción de azúcares en la reacción depende de la concentración de inicial de polisacáridos (C_0) y que la reacción de hidrólisis sigue un modelo de primer orden. Además, para que este modelo pueda ser utilizado la producción de azúcares no debe alcanzar la fase de deshidratación

térmica denotada como k_2 en el modelo de Saeman. En este modelo solo se obtiene una constante de velocidad (k) tal y como se observa en la ecuación 3 (9).

$$C = C_0 \cdot e^{k \cdot t} \quad (\text{Ec. 3})$$

Modelo bifásico

El modelo bifásico es una adaptación del modelo de Saeman, con la particularidad de que este modelo considera dos constantes para la producción de azúcares; rápidamente (k_f) y lentamente hidrolizable (k_s), la constante de velocidad de la degradación de azúcares se representa igual que en el modelo de Saeman (k_2). Este modelo sugiere que una parte de la biomasa lignocelulósica se hidroliza fácilmente en medios ácidos mientras que otra parte persiste durante la reacción. En general la fase rápidamente hidrolizable se atribuye a la presencia de la hemicelulosa (10). La Figura 8 muestra un esquema simplificado del modelo bifásico, mientras que su modelo matemático se presenta en la ecuación 4.

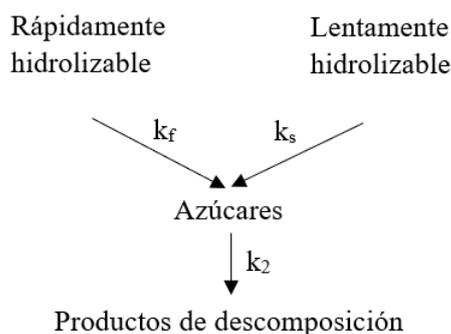


Figura 8: Esquema general del modelo cinético bifásico

$$M = \frac{\alpha \cdot P_0 \cdot k_f}{k_2 - k_f} \left[e^{-k_f \cdot t} - e^{-k_2 \cdot t} \right] + \frac{(1 - \alpha) \cdot P_0 \cdot k_s}{k_2 - k_s} \left[e^{-k_s \cdot t} - e^{-k_2 \cdot t} \right] \quad (\text{Ec. 4})$$

En donde M , P_0 , t y k_2 tienen el

mismo significado al descrito en párrafos anteriores, mientras que α es la fracción rápidamente hidrolizable de la lignocelulosa.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los modelos cinéticos

Modelo	Ventajas	Desventajas
Saeman	Ampliamente usado. Aplica para diversos materiales.	No aplica para todo tipo de biomasa.
Primer orden	Modelo simple y práctico.	No considera la cinética de la producción y degradación de azúcares en conjunto.
Bifásico	Mejor ajuste a biomásas con alto contenido de hemicelulosa.	Mayor complejidad. No aplica para todo tipo de biomasa.

Productos producidos durante la hidrólisis ácida de lignocelulosa

Existen diferentes productos que pueden obtenerse durante la hidrólisis ácida de biomasa lignocelulósica, entre los que destacan los azúcares monoméricos, aldehídos, la lignina ácido soluble, celulosa purificada y sus derivados (5), así como biocombustibles (Figura 9).

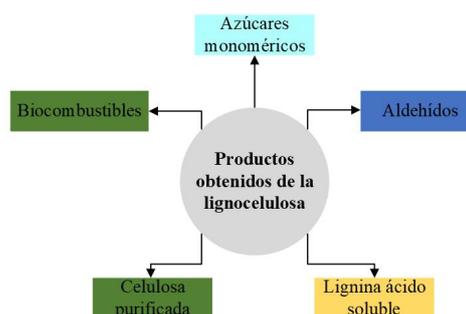


Figura 9: Productos obtenidos a partir de la lignocelulosa.

Azúcares fermentables

Los azúcares fácilmente fermentables consisten de unidades individuales de azúcares de 5 y de 6 carbonos como la glucosa, xilosa, arabinosa, manosa y galactosa, que provienen de la celulosa

y hemicelulosa durante su hidrólisis ya sea química o biológica. Por si mismos estos azúcares no tienen una aplicación directa, sin embargo, son utilizados como materia prima para la producción de biocombustibles, bioplásticos y alcoholes mediante procesos biotecnológicos que emplean el metabolismo de bacterias, hongos y otro tipo de microorganismos.

En el sector de la energía, los azúcares son usados como fuente de carbono por los microorganismos productores de hidrógeno, metano, etanol y electricidad. Por otro lado, también son usados para la fabricación de biopolímeros, químicos de base biológica con carácter biodegradable y polialcoholes (7).

Lignina

La lignina ácido soluble se disuelve durante la hidrólisis ácida de lignocelulosa y se puede recuperar basificando el pH del hidrolizado. La lignina tiene diversas aplicaciones en diferentes sectores, por ejemplo, se ha utilizado como fertilizante y plaguicida en los campos de cultivo, como precursor en el sector de la energía, dispersante en la industria química, floculante para el tratamiento de aguas y como electrodo en celdas electroquímicas.

A pesar de que el objetivo principal de la hidrólisis ácida es atacar a los polisacáridos, la lignina también se disuelve en menor proporción por lo que puede ser considerada como un producto secundario obtenido durante la hidrólisis ácida de lignocelulosas (3).

Celulosa y sus derivados

Además de su alta biodegradabilidad, la celulosa tiene propiedades naturales interesantes que la hacen un candidato ideal en múltiples aplicaciones. La celulosa purificada durante la hidrólisis ácida se utiliza para la fabricación de películas permeables al

oxígeno, polímeros biodegradables, como sustituto del algodón en la industria textil y para el mejoramiento de emulsiones y de propiedades reológicas.

El principal derivado de la celulosa purificada es la celulosa microcristalina. Este material es de color blanco, inodoro y químicamente estable que se utiliza en diferentes sectores industriales. Generalmente, se produce a partir de un proceso secuencial compuesto por una hidrólisis alcalina seguida de una hidrólisis ácida que tiene como finalidad no solo remover a la hemicelulosa y a la lignina ácido soluble sino también las impurezas que pudieran estar presentes como oxalatos e iones metálicos.

Las nanofibras y nanocristales son otro tipo de derivados de celulosa que se producen cuando la severidad del tratamiento ácido es mayor. Estos materiales son utilizados como mejoradores de propiedades reológicas en emulsiones y pinturas, como adsorbentes para la remoción de contaminantes en agua y para la fabricación de materiales con capacidad de biodegradación (3).

Biocombustibles

Durante la hidrólisis ácida se produce una fase líquida rica en azúcares monoméricos y un sólido remanente compuesto principalmente por celulosa, que se fermenta para la producción de biocombustibles o se somete a un tratamiento enzimático para la extracción de azúcares celulósicos.

La hidrólisis ácida tiene la capacidad de alterar la estructura fisicoquímica de la lignocelulosa, incrementando su porosidad, área superficial y disminuyendo el grado de polimerización de los polisacáridos. Gracias a esto, la fermentación del sólido remanente

de la hidrólisis es posible utilizando solamente bacterias o en presencia de enzimas que propicien la transformación previa de la celulosa en glucosa. Algunas bacterias como las del género *Clostridium* tienen la capacidad de producir glucosa a partir de la celulosa y aprovecharla para producir hidrógeno como producto de su metabolismo (7).

En años recientes se ha evaluado tanto el hidrolizado como el sólido remanente para la producción de etanol mediante fermentación alcohólica y de corriente eléctrica a través de celdas de combustible bacterianas, lo cual muestra el potencial de la lignocelulosa para su aprovechamiento en el sector de la energía y le importancia que tiene la hidrólisis ácida durante su revalorización.

A pesar de los esfuerzos hechos hasta ahora, aún son necesarias más investigaciones que optimicen las condiciones de hidrólisis y mejoren el aprovechamiento de la biomasa.

Conclusiones

La hidrólisis ácida es uno de los métodos químicos más utilizados para tratar la biomasa lignocelulósica y mejorar su aprovechamiento. Puede utilizarse como método de pretratamiento para alterar la estructura natural de la lignocelulosa o como método directo para la producción de azúcares.

Los modelos cinéticos aplicados a la hidrólisis ácida consideran que la reacción es pseudo-homogénea y de primer orden. El modelo de Saeman es un modelo simplificado que modela adecuadamente la reacción de producción de azúcares.

Los productos obtenidos a partir de la lignocelulosa son variados y tienen

interés en el sector industrial. Aún se necesita más información para poder optimizar la reacción y el aprovechamiento de la lignocelulosa.

Referencias

- [1] Millati R, Cahyono RB, Ariyanto T, Azzahrani IN, Putri RU, Taherzadeh MJ. Agricultural, Industrial, Municipal, and Forest Wastes. Elsevier. pp. 1–22, 2019.
- [2] Bilal M, Wang Z, Cui J, Ferreira LFR, Bharagava RN, Iqbal HMN. Environmental impact of lignocellulosic wastes and their effective exploitation as smart carriers – A drive towards greener and eco-friendlier biocatalytic systems. *Sci Total Environ.* 722 [20], pp. 1-14, 2020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720314169>.
- [3] Mujtaba M, Fernandes Fraceto L, Fazeli M, Mukherjee S, Savassa SM, Araujo De Medeiros G, *et al.* Lignocellulosic biomass from agricultural waste to the circular economy: a review with focus on biofuels, biocomposites and bioplastics. *J Clean Prod.* 402, pp. 1-23, 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623009733>.
- [4] Fan L, Tseng, Gharapuray MM, Lee YH. Cellulose Hydrolysis. Springer. 3, pp. 1-203, 1987.
- [5] Batista Meneses D, Montes De Oca-Vásquez G, Vega-Baudrit JR, Rojas-Álvarez M, Corrales-Castillo J, Murillo-Araya LC. Pretreatment methods of lignocellulosic wastes into value-added products: recent advances and possibilities. *Biomass Convers Biorefinery.* 12, pp.

- 547-564, 2020. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-020-00722-0>.
- [6] Mankar AR, Pandey A, Modak A, Pant KK. Pretreatment of lignocellulosic biomass: A review on recent advances. *Bioresour Technol.* 334, pp. 1-12, 2021. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852421005745>.
- [7] Gómora-Hernández JC, Carreño-de-León MC, Cuellar-Robles F, Flores-Alamo N. Sugar production by dilute acid hydrolysis of oat bagasse with three different acids: kinetics and thermodynamics. *Rev Mex Ing Quím.* 21, pp. 1-20, 2022. URL: <http://rmiq.org/iqfvp/Numbers/V21/No3/IA2822.html>.
- [8] Saeman JF. Kinetics of Wood Saccharification - Hydrolysis of Cellulose and Decomposition of Sugars in Dilute Acid at High Temperature. *Ind Eng Chem.* 37, pp. 43-52, 1945. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie50421a009>.
- [9] Gómora-Hernández J. C., Carreño-de-León M. del C., Flores-Álamo N., Hernández-Berriel, M. del C.; Fernández-Valverde, S. M. Kinetic and thermodynamic study of corncob hydrolysis in phosphoric acid with a low yield of bacterial inhibitors. *Biomass Bioenerg.* 143, pp. 105830, 2020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953420303640>.
- [10] Tizazu BZ, Moholkar VS. Kinetic and thermodynamic analysis of dilute acid hydrolysis of sugarcane bagasse. *Bioresour Technol.* 250, pp. 197-203, 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852417320060>.