

Revisión del estado del arte de los diferentes tipos de pretratamientos usados en
residuos de poda para ser aprovechados posteriormente

Julio Henry Serrato Sabogal

Universidad católica de Manizales

Facultad de ingeniería y arquitectura

Programa de ingeniería ambiental

Manizales, febrero de 2018

Revisión del estado del arte de los diferentes tipos de pretratamientos usados en
residuos de poda para ser aprovechados posteriormente

Julio Henry Serrato Sabogal

Trabajo de revisión de tema

Tutor de la revisión de tema

Mg. Sebastián Isaac Pacheco González

Ingeniero químico

Universidad Católica de Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Programa de Ingeniería Ambiental

Manizales, febrero de 2018

Contenido

Contenido	2
Lista de tablas y figuras.....	4
Tablas	4
Figuras	4
Resumen	6
Abstract.....	6
Palabras clave (keywords).....	7
Introducción.....	8
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
Objetivos.....	14
Objetivo general	14
Objetivo específico.....	14
Marco teórico	14
Bibliometría	14
Métodos de aprovechamiento de fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU)	25
Tipos de residuos orgánicos aprovechados en la DA	28
Bioquímica de la biodigestión anaerobia.....	29
Hidrolisis	33
Estructura de materiales lignocelulósicos	34
Enfoques teóricos de los diferentes tipos de pretratamientos para residuos de poda y similares, nuevas metodologías y perspectivas metodológicas	38
Pretratamiento físico.....	38
Pretratamiento mecánico	39

Pretratamiento de irradiación	40
Irradiación con haz de electrones.....	41
Irradiación por microondas	42
Pretratamiento Químico	43
Tratamiento alcalino.....	44
Tratamiento ácido.....	45
Pretratamiento Fisicoquímico	46
Pretratamiento a partir de explosión de vapor.....	46
Pretratamiento a partir de Termohidrólisis (LHW).....	48
Pretratamiento a partir de explosión de fibra de amoníaco (AFEX).....	49
Pretratamiento a partir de Oxidación Húmeda (WO).....	49
Pretratamiento Biológico	50
Estudio de caso de pretratamiento de residuo de poda y similares.	53
El proceso hidrotérmico o de termohidrólisis mostró los resultados esperados según la57	
Metodología más eficiente y de bajo costo para realizar el pretratamiento de los residuos de poda y similares.....	60
Conclusiones.....	61
Referencias	62

Lista de tablas y figuras

Tablas

Tabla 1. Cantidad de publicaciones realizadas por cada área de estudio.....	24
Tabla 2. Residuos orgánicos de diversos.....	28

Figuras

Figura 1. Pretratamiento de biomasa lignocelulósica.....	13
Figura 2. Citación anual de las temáticas.....	16
Figura 3. Publicaciones anuales Web of Science.....	16
Figura 4. Publicaciones anuales Scopus.....	17
Figura 5. Documentos anuales y fuente de publicación.....	18
Figura 6. Publicaciones por autor.....	19
Figura 7. Publicaciones por instituciones afiliadas.....	20
Figura 8. Publicaciones por país.....	21
Figura 9. Tipos de documentos publicados.....	22
Figura 10. Área de estudio de los documentos.....	23
Figura 11. Esquema de la digestión anaeróbica de materia orgánica compleja.....	32
Figura 12. Unidades básicas que componen el polímero de la lignina.....	35
Figura 13. Estructura general de la lignocelulosa.....	38

Figura 14. Compuestos inhibidores formados durante el pretratamiento mediante explosión por vapor de los materiales lignocelulósicos.....	47
Figura 15. Análisis de la composición de Miscanthus crudo y pretratado.....	54
Figura 16. Producción de biogás de las muestras de Miscanthus crudo y pretratado.....	56
Figura 17. Producción de metano de las muestras de Miscanthus crudo y pretratado.....	56

Revisión del estado del arte de los diferentes tipos de pretratamientos usados en residuos de poda para ser aprovechados posteriormente

Autor: Julio Henry Serrato Sabogal

Correo electrónico: julio.serrato@ucm.edu.co

Resumen

El uso de diferentes compuestos orgánicos durante el proceso de transformación de materia orgánica a biogás, ha generado interés en muchos investigadores actualmente, uno de los compuestos orgánicos más difíciles de tratar son los que poseen estructuras lignocelulósicas, las cuales por su complejidad y bajas eficiencias en cuanto a generación de biogás han llevado a buscar la manera de mejorar la hidrólisis de dichos materiales, el cual se cree que es la etapa clave para que dicho proceso de digestión anaerobia (DA) tenga éxito; a través de diferentes pretratamientos físicos, químicos, fisicoquímicos y biológicos, cuyo objetivo es aumentar el área superficial de la celulosa, a través de la degradación de la lignina y/o separación de dichas estructuras vegetales de la celulosa, para así obtener mejores resultados en la producción de biogás. En el siguiente trabajo se revisaron los pretratamientos más sobresalientes y se propuso un pretratamiento de bajo costo y efectivo para los residuos de poda o similares.

Abstract

The use of different organic compounds during the process of transformation of organic matter to biogas, has generated interest in many researchers at the moment, one of the most difficult organic compounds to treat are those that have lignocellulosic structures, which due to their complexity and low efficiencies in Regarding the generation of biogas, they have looked for ways to improve the hydrolysis of these materials, which is believed to be the key stage for the successful anaerobic digestion process (AD); through different physical, chemical, physicochemical and biological pretreatments, which aim to increase the surface area of cellulose, through the degradation of lignin or separation of these plant structures from cellulose, in order to obtain better results in the production of biogas. In the following article we will review the most outstanding pretreatments and a low cost and effective pretreatment will be proposed for pruning residues or similar.

Palabras clave (keywords)

Digestión anaerobia (da), lignocelulósicos, lignina, hemicelulosa, celulosa, pretratamiento, residuos de poda, tratamientos físicos, tratamientos químicos, tratamientos fisicoquímicos, tratamientos biológicos.

Introducción

En el siguiente trabajo se realizó una revisión de tema sobre algunos de los pretratamientos necesarios para que la biomasa lignocelulósica, pueda ser aprovechada con mayor eficacia a través del método de la digestión anaerobia (DA), esta biomasa si es correctamente pretratada puede ser una materia prima valiosa para la producción de biogás, lo que reduce la contaminación ambiental y aumenta la recuperación de energía renovable. (Kang, Appels, Tan & Dewil 2014. Citado por Patinvoh, Osadolor, Chandolias, Sárvári-Horvát & Taherzadeh 2016)

Esta tecnología podría responder al aumento de la demanda de energía y también aportar en el tema de control y mitigación de la contaminación ambiental generada por la acumulación de residuos en rellenos sanitarios o vertederos, además hay que tener en cuenta que el residuo producido durante la digestión anaerobia es un tipo de fertilizante orgánico de alta calidad llamado digestato, que es rico en nitrógeno, fósforo y otros microelementos (Wei, 2016), fuente importante de ingresos para hacer viable el proceso.

Aunque muchos descartan algunas biomásas porque son difíciles de degradar para los microorganismos anaerobios, otros apoyan el uso e investigación de estas biomásas para que puedan ser utilizadas como materia prima para la digestión anaerobia o el procesamiento de biocombustibles.

Para ello es de vital importancia alcanzar los azúcares atrapados en el interior de la estructura vegetal, donde los azúcares más fáciles de sintetizar por los microorganismos se encuentran en el interior de la celulosa y rodeada por cadenas de hemicelulosa y ambas en el interior de la capa más rígida e impermeable de la estructura vegetal, la lignina.

A partir de las características de los materiales lignocelulósicos, algunos documentos y libros como el Manual del biogás, que fue realizado por el Ministerio de Energía de Chile, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y Global Environment Facility (2011) han afirmado que:

La velocidad de degradación de los materiales lignocelulósicos es tan lenta que suele ser la etapa limitante del proceso de hidrólisis. Esto es debido a que la lignina es muy resistente a la degradación por parte de los microorganismos anaeróbicos afectando también a la biodegradabilidad de la celulosa, de la hemicelulosa y de otros hidratos de carbono. Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa son celobiasa y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, hexosas y ácidos urónicos. La tasa de hidrólisis, en general, aumenta con la temperatura. La tasa de hidrólisis depende, también, del tamaño de las partículas, debido fundamentalmente a la disponibilidad de superficie para la adsorción de las enzimas hidrolíticas. (p. 21)

Para ello, es necesario usar alguno de los diferentes pretratamientos y garantizar el acceso de los microorganismos anaerobios al interior de la estructura vegetal y así poder

sintetizar los azúcares presentes en la celulosa, algunos de ellos son los tratamientos físicos, químicos, fisicoquímicos y biológicos.

Este estudio se centra en la comprensión de cómo los cambios provocados por los diferentes pretratamientos son útiles para optimizar la conversión de materiales lignocelulósicos a biogás a través de la DA y después de revisar los métodos recientes de pretratamiento, identificar la metodología más eficiente y de bajo costo para realizar el pretratamiento de los residuos de poda y similares (material lignocelulósico).

Los métodos de pretratamiento se compararán en términos de eficiencia, equilibrio energético, costo y sostenibilidad del proceso.

Hay que tener en cuenta que un pretratamiento ideal elimina la necesidad de reducir el tamaño de partícula de la biomasa, previene la reducción de la celulosa y limita la formación de compuestos inhibidores microbianos (Arantes & Goodell, 2012; Mosier et al., 2005. Citado por Kato Elía, Flythe & Lynn 2014).

Se ha informado que la biodegradación de biomasa lignocelulósica natural no tratada es muy lenta, lo que da lugar a un grado de degradación bajo, a menudo por debajo del 20%. Esta baja tasa y grado de conversión inhibe el desarrollo de un proceso de hidrólisis económicamente viable.

El pretratamiento es un paso crucial para el proceso de eliminación de la lignina, porque aumenta el grado de disponibilidad de la biomasa para la enzima encargada de la hidrólisis y esto depende directamente del tipo de pretratamiento que se ocupe (Madadi, Tu & Abbas 2017).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad Colombia dispone aprox. 12 millones de toneladas de residuos sólidos por año y sólo recicla el 17% de este total (Murillo 2017. Citado por Dinero, 2017), generando así una problemática en los rellenos sanitarios y una baja conciencia en cuanto al reciclaje debido a la falta de requisitos para la adopción de energías renovables y la aplicación de tecnologías de reciclaje (Feng & Lin 2017).

Diariamente generamos residuos sólidos de una u otra manera por el tipo de sociedad en la que vivimos, muchos desconocen que la mayoría de estos residuos que generamos pueden ser aprovechados a partir de diferentes maneras, ya sea para reciclarlos o incluso usarlos como materia prima para diferentes procesos.

Actualmente, existen diversos tipos de tratamientos para el aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos, algunas prácticas de aprovechamiento para todos los residuos que existen son: reutilización, reciclaje, alimentación animal, lombricultivo, biocombustibles, biofertilizantes, biofermentos, digestión anaerobia (generación de biogás), compostaje, entre otros (Mejía & Ramírez 2013).

En este documento se hará énfasis en el proceso de digestión anaeróbica que es un proceso utilizado para descomponer materia orgánica en ausencia de oxígeno, que da lugar a un gas energéticamente aprovechable (biogás), compuesto en su mayor parte por metano y dióxido de carbono (Hidaka, Arai, Okamoto, & Uchida 2013. Citado por Cadavid & Bolaños 2015).

Dichos residuos que son procesados por las bacterias anaeróbicas deben tener unas características que favorezcan a la mayor obtención de biogás posible, por lo tanto, para transformar estos residuos muchas veces es necesario un pretratamiento porque algunos tipos de materia orgánica en bruto pueden causar retrasos en la producción de biogás o incluso la muerte total del sistema si se descuidan algunos parámetros importantes durante el proceso.

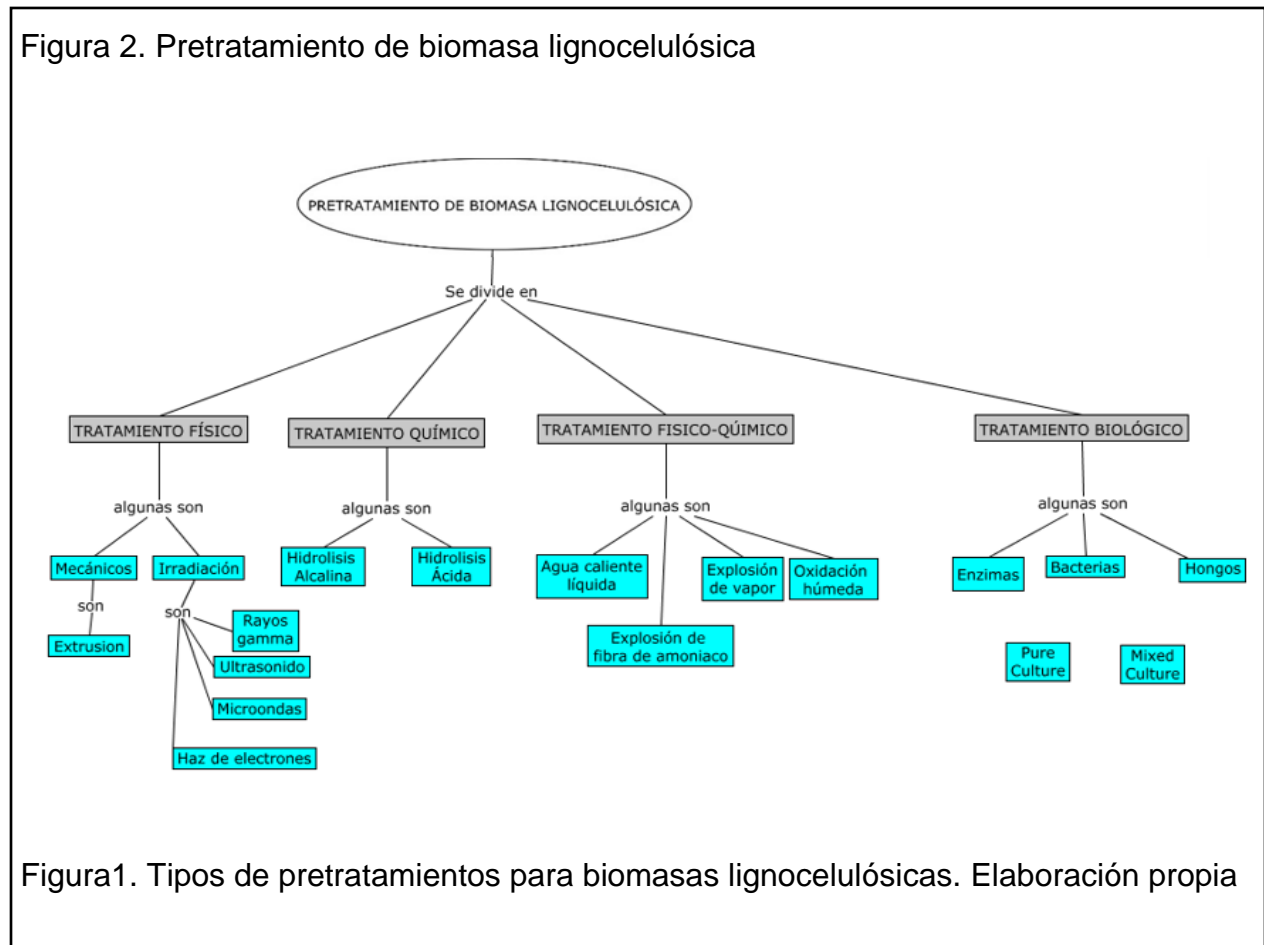
Entre ellos están los residuos de poda y restos vegetales o agrícolas, estos poseen características que proporcionan una baja producción de biogás, ya que cuentan con una capa compuesta de celulosa, hemicelulosa y lignina las cuales tienen como función proteger la pared celular de la planta, siendo la lignina el mayor reto por su estructura aromática compleja de degradar para la mayoría de los microorganismos anaeróbicos.

Diferentes estudios han demostrado que los residuos orgánicos han encaminado a países como Brasil, China y Finlandia a utilizar estas tecnologías de aprovechamiento de biomasa para su desarrollo energético, este tipo de tecnología que ataca directamente el problema de acumulación de residuos orgánicos, también contribuye al tratamiento de residuos sólidos urbanos, además aportar productos como el biogás y el digestato (lodo) que siendo tratados correctamente pueden generar energía eléctrica en el caso del biogás o fertilizantes orgánicos en el caso del lodo (por su alto contenido de nutrientes) y así generar ingresos que hagan de éste un proceso económicamente viable.

Existen diferentes tratamientos que son capaces de mejorar la hidrólisis de estos tejidos lignocelulósicos para así aumentar el rendimiento en la producción de biogás, indudablemente algunos de estos pretratamientos son costosos porque requieren de agentes reactivos y equipos que son los encargados de proporcionar las condiciones

necesarias para romper enlaces en estructuras como la lignina y la hemicelulosa mejorando así la disponibilidad de la celulosa, que es la que posee la D-glucosa, un azúcar necesario por las bacterias anaeróbicas para llevar a cabo las diferentes reacciones que se dan durante la DA.

Algunos de estos pretratamientos son:



Entonces, surge la pregunta:

¿Cuál es el mecanismo más efectivo para realizar el pretratamiento de los residuos de poda y similares (biomasa lignocelulosa), para obtener una mayor hidrolisis de la materia y así mejorar la eficiencia en la digestión anaerobia?

Objetivos

Objetivo general

Realizar una revisión del estado del arte para evaluar los diferentes tipos de pretratamiento del residuo de poda y similares, su viabilidad y ventajas.

Objetivo específico

Obtener datos relevantes acerca de los enfoques teóricos de los diferentes tipos de pretratamientos para residuos de poda y similares, nuevas metodologías y perspectivas metodológicas.

Evaluar un estudio de caso de pretratamiento de residuo de poda y similares.

Identificar la metodología más eficiente y de bajo costo para realizar el pretratamiento de los residuos de poda y similares.

Marco teórico

Bibliometría

La bibliometría es una subdisciplina de la cienciometría y proporciona información sobre los resultados del proceso investigador, su volumen, evolución, visibilidad y estructura.

Así permiten valorar la actividad científica, y el impacto tanto de la investigación como de las fuentes. De acuerdo con esto los indicadores bibliométricos se pueden clasificar en dos grandes grupos, los indicadores de actividad y los de impacto. Los indicadores de actividad visualizan el estado real de la ciencia y dentro de estos se encuentran número

y distribución de publicaciones, productividad, dispersión de las publicaciones, colaboración en las publicaciones, vida media de la citación o envejecimiento, conexiones entre autores, entre otros. Entre los indicadores de impacto se encuentran la evaluación de documentos muy citados “Hot papers” y el factor de impacto (FIN); siendo este último el más conocido (Camps 2008. Citado por: Escorcía 2008)

El siguiente análisis básico de bibliometría se realizó usando las bases de datos de Web of Science y la base de datos de SCOPUS, se utilizaron las siguientes palabras clave de búsqueda:

Pretreatment - pretratamiento

Green Grass - pasto

Anaerobic digestion – digestión anaerobia

Hydrolysis – hidrólisis

Del análisis se obtuvieron diferentes resultados, representados en las siguientes gráficas, en las cuales se puede observar un aumento de manera exponencial en las citaciones que se hacen cada año referentes al tema, por lo que se puede evidenciar un aumento en las investigaciones realizadas sobre el tema, infiriendo de esta manera la importancia y pertinencia de este en la investigación actual de esta disciplina.

Figuras 2. Citación anual de las temáticas

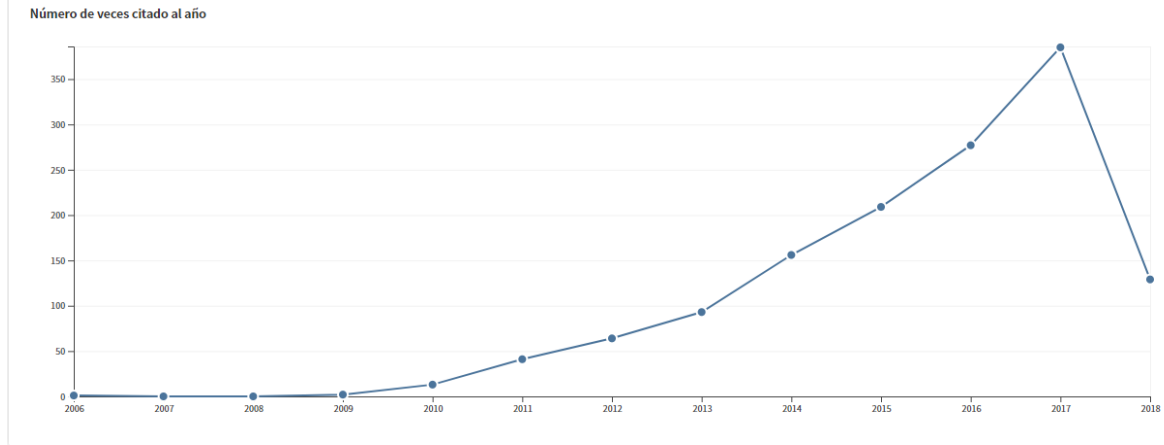


Figura 2. Número de veces citado al año. Web of Science (2018)

Figuras 3. Publicaciones anuales Web of Science

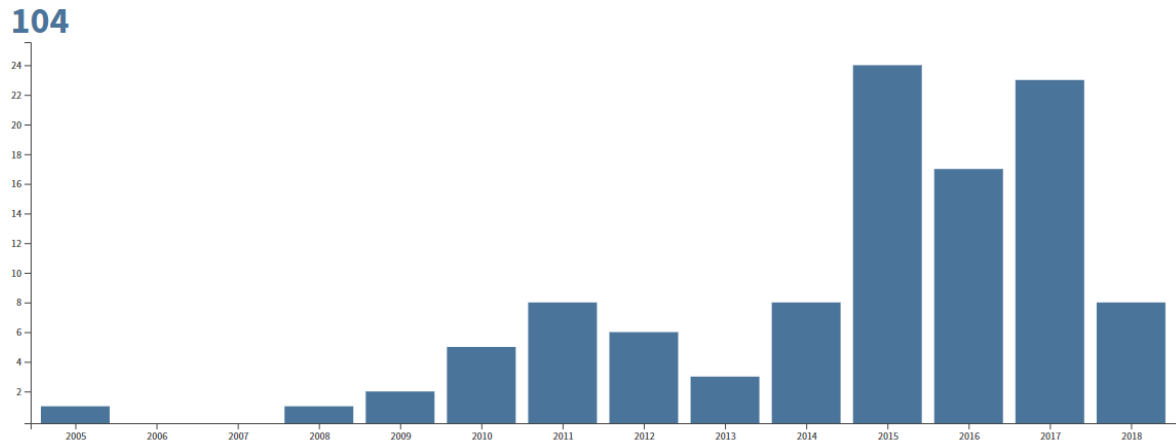
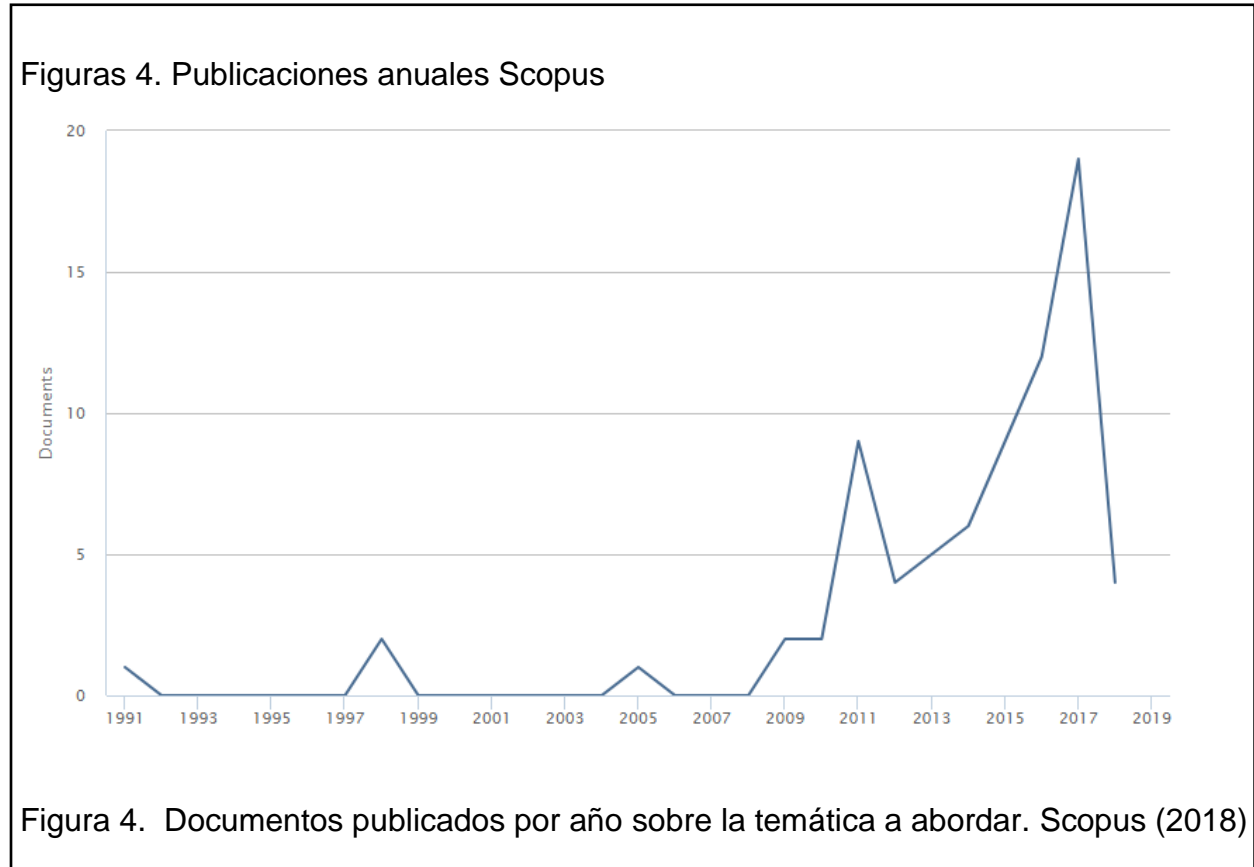


Figura 3. Publicaciones desde el 2005 hasta la fecha. Web of science (2018)

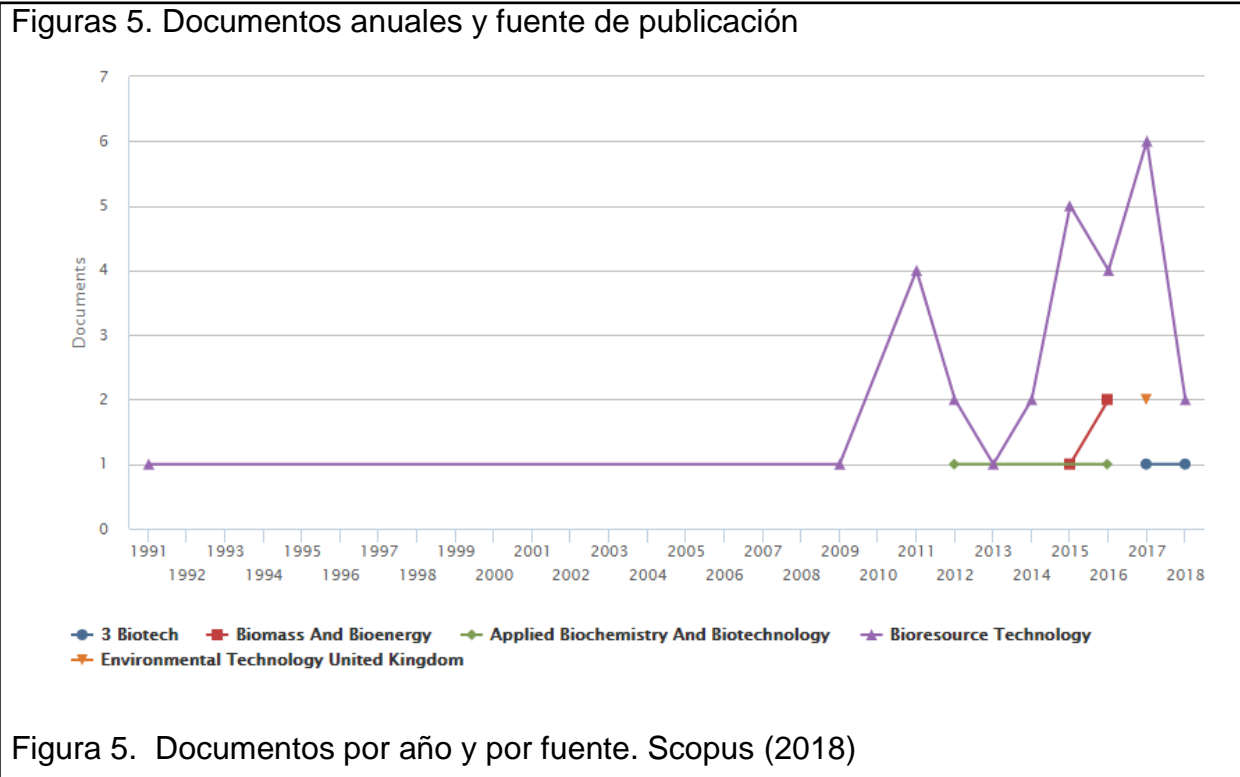
En la figura 3 se puede evidenciar que en la plataforma de Web of science se recibieron un total de 104 artículos relacionados con el tema en los últimos 14 años, sin embargo, gran parte de estos artículos se han publicados desde el 2015, hasta la actualidad. Dejando claro que el tema ha incrementado el interés de los investigadores,

principalmente por la cantidad de ventajas ambientales y sociales que tiene el aprovechamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, debido a la transformación social y profesional en relación con el manejo integral de residuos.



En cuanto a la figura 4 se puede determinar que en la base de datos Scopus el aumento de artículos publicados por año viene desde el 2011, observando que en el 2017 se aceptaron la mayor cantidad de artículos, por lo que se considera que el nivel de las investigaciones ha mejorado considerablemente, esto se pudo dar debido al creciente número de investigaciones sobre el tema realizado por parte de universidades, centros

de investigación y diferentes entidades privadas que cada vez estudian este tema más al detalle.



En la figura 5 se puede identificar que la revista holandés Bioresource Technology, es la que ha mostrado mayor actividad en la publicación continua, de artículos relacionados con el tema de pretratamiento de materiales lignocelulósicos como el residuo de poda y similares para ser aprovechado eficientemente en el proceso de digestión anaerobia.

Figuras 6. Publicaciones por autor

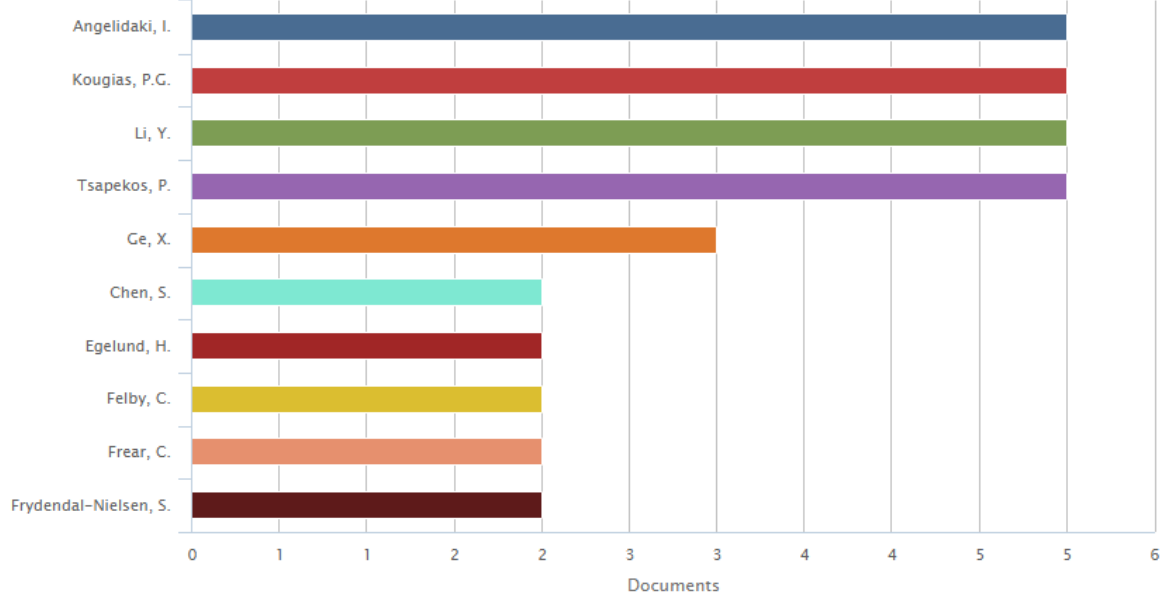


Figura 6. Documentos publicados por cada autor, por medio del cual se identifican a los 12 autores que más han publicado en torno al tema. Scopus (2018)

En la figura 6 se puede apreciar que los investigadores que más publicaciones realizan sobre el tema son Ph.D. en producción de biocombustibles a partir de las tecnologías como el biogás, expertos en optimización de procesos anaeróbicos y desarrollo de soluciones sostenibles para residuos orgánicos y tratamiento de aguas residuales, quienes basan sus investigaciones en proyectos relacionados con la mejora de biogás in situ y ex situ, explotación de pastos y fibras para la producción de biocombustibles y análisis metagenómicos en reactores de biogás.

Figuras 7. Publicaciones por instituciones afiliadas

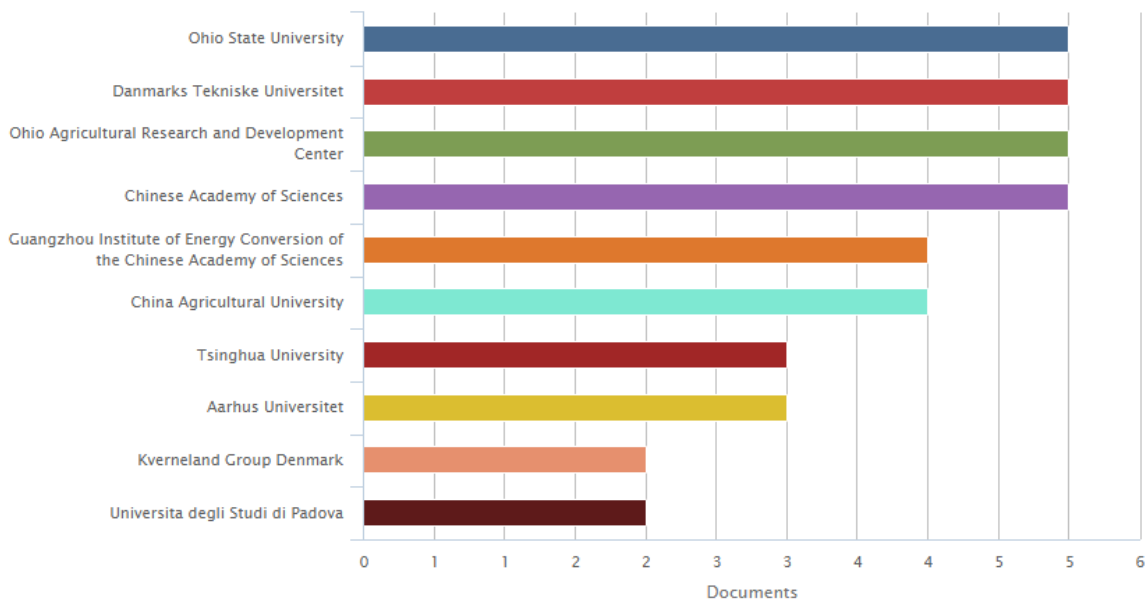


Figura 7. Documentos publicados por las diferentes instituciones afiliadas. Scopus (2018)

En la figura 7 se identifica que las instituciones que más aportan artículos para la plataforma Scopus son en su mayoría Universidades y centros de investigación, que es donde se enlaza el interés de los estudiantes y profesionales con las problemáticas actuales para así presentar soluciones viables y ayudar a engrosar el conocimiento.

Figura 8. Publicaciones por país

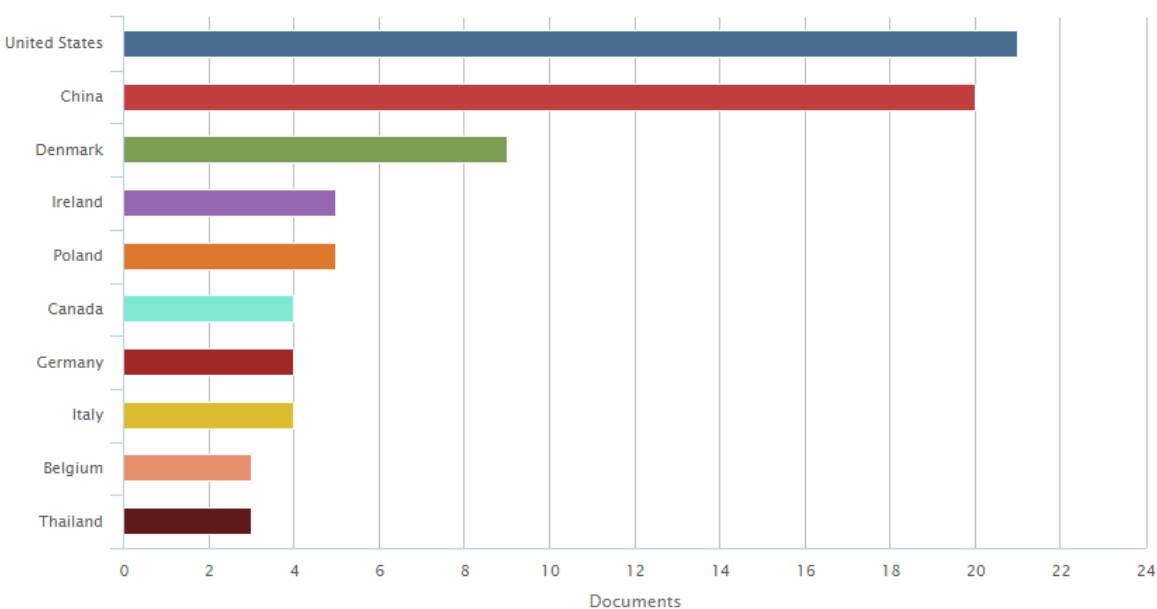


Figura 8. Documentos publicados por país. Scopus (2018)

La figura 8 representa a los países que más han publicado en Scopus artículos relacionados con el tema, mostrando un alto interés por parte de países como Estados Unidos y China, los cuales son reconocidos por sus interesantes investigaciones en temas de aprovechamiento de residuos. Además de despertar el interés de países como Dinamarca, Canadá y Alemania que son ejemplo a seguir en temas de innovación tecnológica y desarrollo sostenible.

Figuras 9. Tipos de documentos publicados

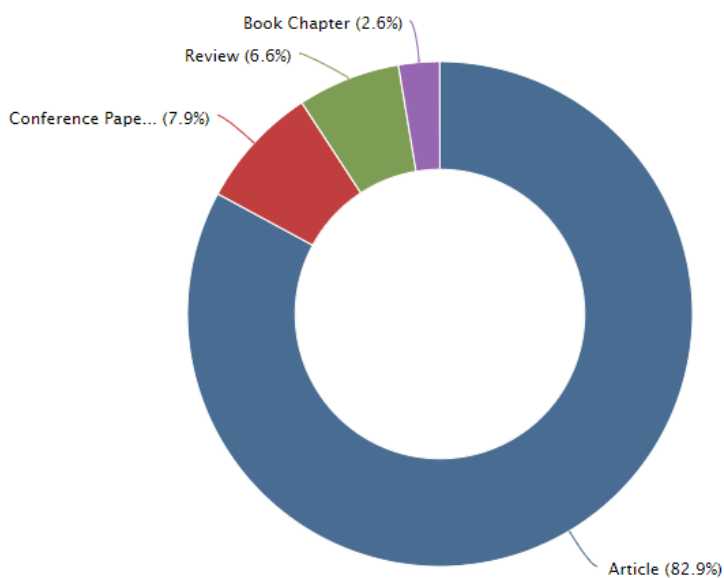


Figura 9. Tipos de documentos publicados, artículo indexado, artículo de conferencia revisiones y capítulos de libro. Scopus (2018)

De la figura 9 se puede concluir que se han realizado una gran cantidad de artículos indexados, por lo que podemos concluir que con cada investigación se engrosa el conocimiento acerca de los pretratamientos existentes para la biomasa lignocelulósica, por lo que se considera importante realizar un artículo de revisión y así agrupar los diferentes resultados obtenidos por los investigadores, para que dicho artículo sirva de base para nuevos investigadores o estudiantes interesados en realizar trabajos de grado o proyectos acerca del tema.

Figuras 20. Área de estudio de los documentos

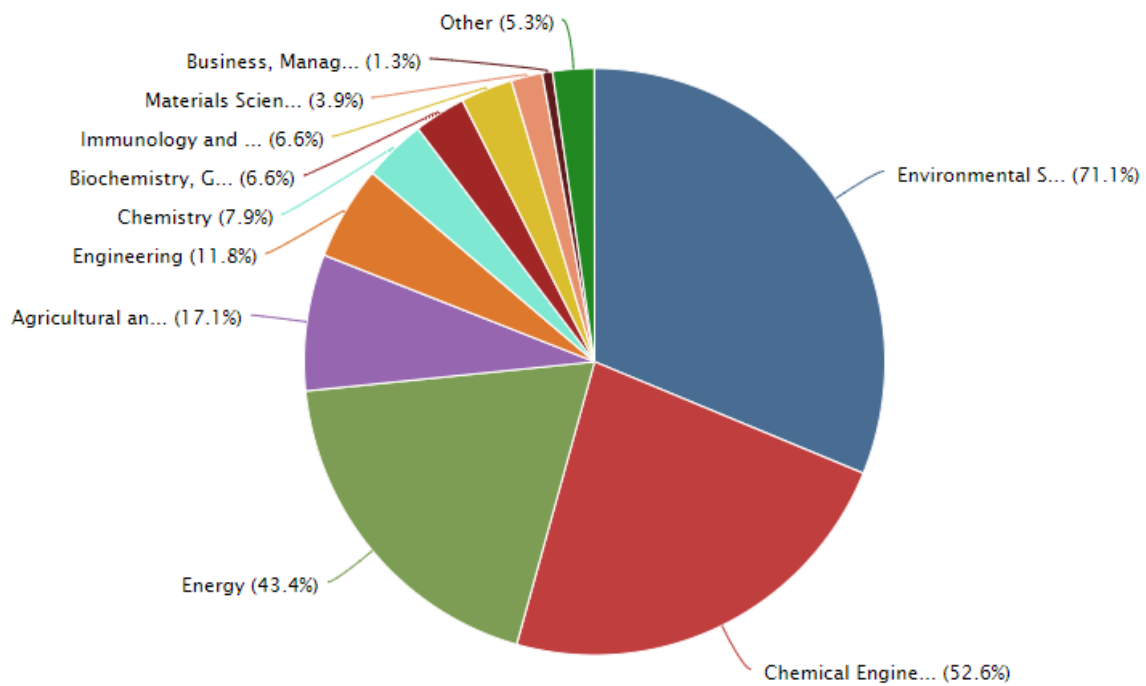


Figura 10. Tipos de documentos por área de estudio. Scopus (2018)

Finalmente, la figura 10 muestra las diferentes áreas que han decidido investigar y aportar artículos al tema de pretratamiento de sustratos para proponer soluciones ante los diferentes retos que la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos impone en la sociedad y por lo que se considera necesario el aprovechamiento de estos. A continuación, se mostrará una tabla que recopila la cantidad de publicaciones realizadas para cada área de estudio presentada en la figura 10.

Tabla 1. Cantidad de publicaciones realizadas por cada área de estudio

Área de estudio	Publicaciones
Environmental Science	54
Chemical Engineering	40
Energy	33
Agricultural and Biological Sciences	13
Engineering	9
Chemistry	6
Biochemistry, Genetics and Molecular Biology	5
Immunology and Microbiology	5
Materials Science	3
Business, Management and Accounting	1
Computer Science	1
Economics, Econometrics and Finance	1
Medicine	1
Multidisciplinary	1
TOTAL	173

Por medio de lo cual se evidencia que la mayor cantidad de documentos y publicaciones, se encuentran en las áreas de Ingeniería química, Ciencias ambientales y energía, permitiendo inferir la pertinencia e impacto que las mismas han adquirido en desarrollo e investigación de esta temática, siendo áreas que permiten la ampliación del conocimiento, así como la propuesta e implementación de nuevas practicas que puedan disminuir los impactos ambientales, fortaleciendo el uso de procesos acordes a las demandas y necesidades actuales de la sociedad.

Métodos de aprovechamiento de fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU)

Alimentación animal

En las zonas rurales separan la fracción orgánica generada en el inmueble para la alimentación de animales, en su mayoría ganado y cerdos, pero los residuos orgánicos tienen un alto contenido en humedad lo que implica dificultades para el almacenamiento, el consumo debe ser rápido con el fin de evitar problemas de fermentación o descomposición de este. Para incorporar el producto orgánico como complemento importante en la alimentación animal, es necesaria una correcta planificación en la que se tenga en cuenta: de qué productos se dispone, en qué cantidades y en que periodos de tiempo (Arroyave & Vahos 1999. Citado por: Mejía & Ramirez 2013).

Compostaje

Es un proceso natural y biooxidativo, en el que intervienen numerosos y variados microorganismos aerobios que requieren una humedad adecuada y sustratos orgánicos heterogéneos en estado sólido, implica el paso por una etapa termófila dando al final como producto de los procesos de degradación de dióxido de carbono, agua y minerales, como también una materia orgánica estable, libre de patógenos y disponible para ser utilizada en la agricultura como abono acondicionador de suelos sin que cause fenómenos adversos (Castillo 2007. Citado por: Mejía & Ramirez 2013).

Lombricultivo

Es la técnica de criar lombrices en cautiverio, utiliza para su alimentación materiales biodegradables de origen agrícola, pecuario, agroindustrial y casero, produciendo como resultado la transformación de los desechos en biomasa y humus (abono orgánico) de alta calidad. (Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural pesca y alimentación, 2014)

Biofertilizantes.

Es el proceso mediante el cual la materia orgánica es transformada en fertilizantes a través del aumento en el contenido de nutrientes como el nitrógeno, para mejorar la fertilidad del suelo y aumentar la disponibilidad de este.

Biofermentos.

Es el proceso mediante el cual la materia orgánica es fermentada con una fuente láctica y sales minerales. Con el fin de aumentar los niveles de microorganismos benéficos para los cultivos, útiles en el control de algunas plagas y enfermedades de los cultivos. Estos microorganismos también son capaces de liberar y poner a disposición nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

Biocombustibles.

Bioetanol: se define como compuesto orgánico líquido, que tiene en su molécula un grupo hidroxilo (OH) enlazado a un átomo de carbono. El alcohol carburante es obtenido

a partir de la biomasa. La obtención de alcohol carburante resulta de tres (3) procesos diferentes:

- Fermentación de los compuestos orgánicos, acompañada de un proceso de destilación y secado. Este proceso es el que se utiliza con materias primas como la caña de azúcar o remolacha azucarera.
- Segregación molecular, proceso en el que se fragmenta la biomasa separando las proteínas del almidón, la fibra, etc. El almidón, convertido en azúcar fermentable puede producir alcohol. Mediante este proceso se obtiene bioetanol a partir de distintas materias primas, como yuca, maíz, papa.
- Hidrólisis de la celulosa, permite utilizar cualquier materia que contenga celulosa, por ejemplo, desechos o residuos agrícolas. El proceso está en investigación en muchas partes del mundo y se calcula que será económicamente viable muy pronto. (Universidad Autónoma de Bucaramanga, 2013. p.43)

Biodiesel: es un combustible para motores Diesel, que puede ser producido partiendo de materias primas agrícolas (aceites vegetales y/o grasas animales), aceites o grasa de fritura usados y metanol o etanol, que también pueden obtenerse a partir de productos agrícolas. La palma, la colza, el girasol y la soya son las más utilizadas. Siendo la palma el cultivo con mejor posibilidad de convertir su aceite en biodiesel.

El proceso de producción se basa en la transesterificación, en la cual al agregar al aceite un alcohol (metanol o etanol) y un catalizador (por ejemplo, hidróxido de potasio KOH), se obtiene biodiesel y como productos adicionales glicerina, agua y residuo que puede utilizarse como fertilizante.

Biogás: La digestión de la materia orgánica en un ambiente sin oxígeno, produce un gas compuesto en su mayor parte por metano, dióxido de carbono y otras trazas. Este efecto se ve normalmente en rellenos sanitarios, donde este gas debe ser extraído para evitar inconvenientes con el manejo del relleno sanitario, luego de la extracción es quemado o utilizado como biocombustible.

Tipos de residuos orgánicos aprovechados en la DA

Existen diversos tipos de residuos orgánicos debido a su origen, estos residuos poseen diferentes características y composiciones, en la siguiente tabla se clasifican algunos de los residuos que pueden ser aprovechados por metodologías como la digestión anaerobia, pirolisis y biorrefinerías.

Tabla 2. Residuos orgánicos de diversos

Residuos de origen animal	Estiércol, guano, residuos de centrales de aprovechamiento, residuos de pescados.
Residuos de origen vegetal	Malezas, rastrojos de cosechas, pajas, poda.
Residuos de origen humano	Heces, basura, orina.
Residuos Agroindustriales	Salvado de arroz, melazas, cosetas, residuos de semillas, bagazo de diferentes frutas o vegetales.
Residuos forestales	Hojas, vástagos, ramas y cortezas.
Residuos de cultivos acuáticos.	Algas marinas, jacintos y malezas acuáticas.

Fuente: (Vamero & Arellano 1991. Citado por: Manual del biogás 2011)

Las características bioquímicas que presenten estos residuos deben permitir el desarrollo y la actividad microbiana del sistema anaeróbico. El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno, sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores) (Manual del biogás 2011).

Los residuos de origen vegetal, forestales y agroindustriales, son en los que se centrará este documento, debido a que son los que poseen estructuras lignocelulósicas complejas que necesitan ser pretratadas para lograr una hidrólisis mayor de la materia prima y así esperar a mejores rendimientos en la producción de biogás.

Bioquímica de la biodigestión anaerobia

Durante el proceso de digestión anaerobia la materia prima usada para la producción de biogás se somete a diferentes reacciones químicas para que el proceso de digestión anaerobia sea eficaz, para ello durante el proceso ocurren 4 etapas.

Hidrólisis

Es el proceso en el cual la materia prima se desintegra por la acción de las bacterias hidrolíticas, ya que transforma materiales orgánicos solubles y componentes más

grandes de masa molecular como lípidos, carbohidratos, polisacáridos, proteínas, grasas y ácidos nucleicos, entre otros (Adekunle & Okolie, 2015. Citado por: Parra 2015) en azúcares simples, aminoácidos y ácidos grasos.

Los principales géneros que hacen parte de los microorganismos hidrolíticos se encuentran: Clostridium, acetovibrio, micrococcus, staphylococcus y bacillus (Hernández, 2005. Citado por: Parra 2015)

Esta primera etapa es muy importante debido a que grandes moléculas orgánicas son demasiado grandes para ser absorbidas y utilizadas directamente por los microorganismos como sustrato/fuente de alimento.

Acidogénesis

En esta etapa los azúcares simples de la hidrólisis se convierten en ácidos orgánicos de cadena corta, alcoholes, algunos compuestos de nitrógeno orgánico y azufre orgánico, junto con hidrógeno y dióxido de carbono (Vavilin et al., 1996. Citado por: Patinvoh, Osadolor, Chandolias, Sárvári-Horváth & Taherzadeh, 2016).

Si la materia prima tiene una baja alcalinidad y la carga orgánica es alta, la acumulación de ácidos grasos volátiles puede provocar una caída de pH, que inhibiría a los microorganismos metanogénicos que producen metano en el paso final.

Acetogénesis

En esta etapa los microorganismos homoacetogénicos reducen el hidrógeno y el dióxido de carbono a ácido acético. En este paso, las bacterias acetogénicas solo pueden sobrevivir a una concentración de hidrógeno muy baja, por lo que la producción excesiva de hidrógeno a partir de la etapa de acidogénesis puede inhibir estas bacterias (Deublein & Steinhauser, 2011. Citado por: Patinvoh et al., 2016).

Metanogénesis,

En la fase metanogénica, la producción de metano y dióxido de carbono a partir de productos intermedios se lleva a cabo por bacterias metanogénicas bajo condiciones anaeróbicas estrictas. La metanogénesis es un paso crítico en la totalidad del proceso de digestión anaeróbica, ya que es la reacción bioquímica más lenta del proceso (Adekunle & Okolie, 2015. Citado por: Parra 2015).

El acetato, H_2 y CO_2 son transformados en CH_4 por dos tipos de microorganismos: metanógenos acetotróficos utilizando acetato como sustrato y produciendo 70 % de metano en la digestión anaeróbica como *Methanosaeta concilii* o *Methanosarcina acetivorans* y Metanógenos hidrogenotrófico utilizando CO_2 e H_2 como sustratos, tales como *Metanobacterium bryantii* o *Metanobrevibacter arboriphilus* (Cazier et al., 2015. Citado por: Parra 2015).

Figura 11. Esquema de la digestión anaeróbica de materia orgánica compleja

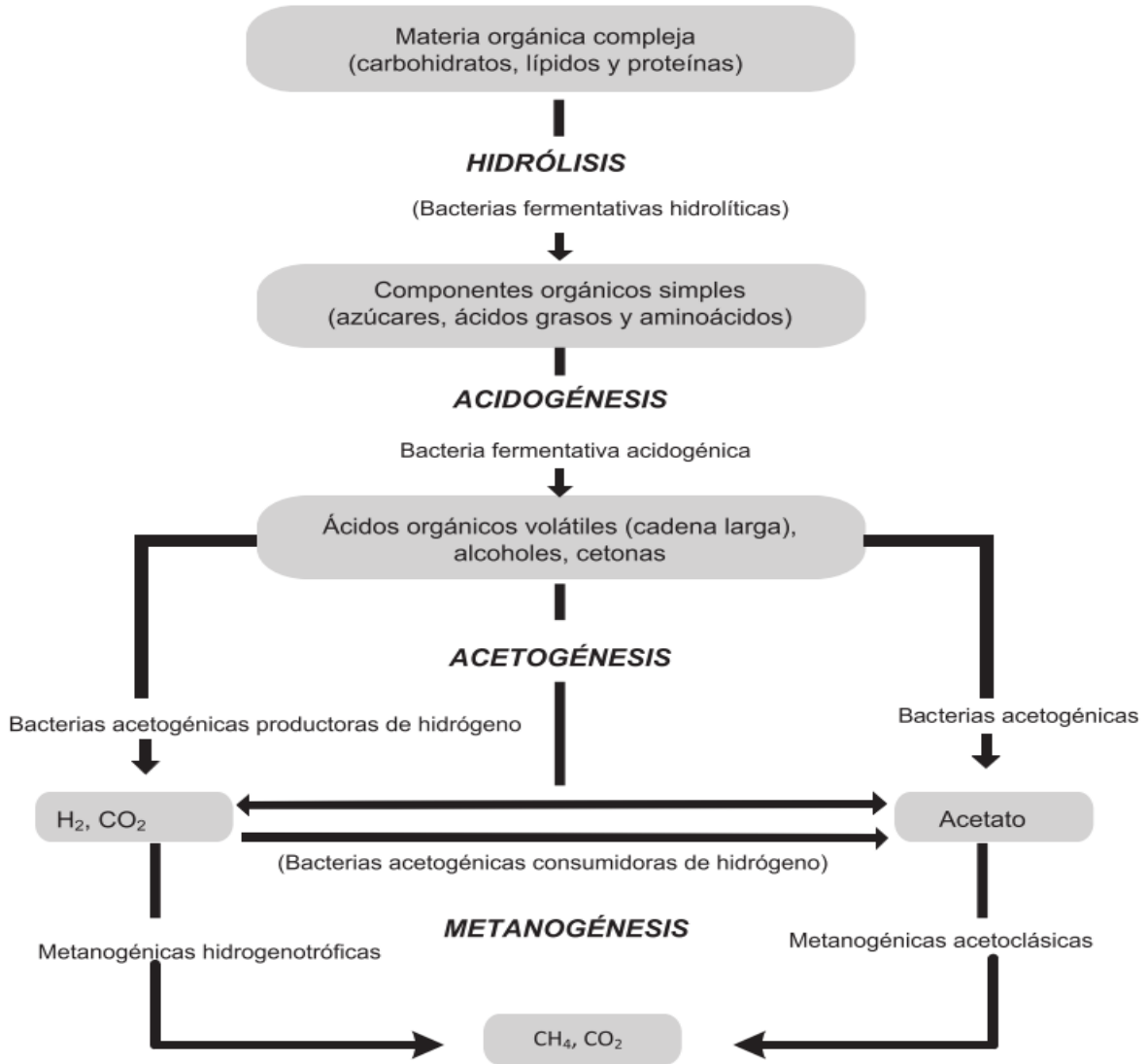


Figura 11. Representación esquemática de la bioquímica en el proceso de digestión anaerobia de materia orgánica compleja. (Moraes, Zaiat & Bonomi 2015)

Hidrolisis

La hidrolisis se considera la etapa más importante en la transformación de biomasa lignocelulósica a biogás, debido a su naturaleza compleja y estructura recalcitrante. Por lo tanto, los lignocelulósicos deben descomponerse antes del proceso de hidrólisis para una degradación biológica efectiva.

Para lograr esta degradación biológica efectiva, es necesario un pretratamiento que sea capaz de aumentar el área superficial hidrolizable de la materia prima y así apoyar directamente a los microorganismos hidrolíticos que finalmente serán los encargados de transformar las estructuras complejas en cadenas simples.

Según Parra (2015) la descomposición de la celulosa y hemicelulosa usualmente es más lenta que la descomposición de las proteínas y lípidos.

Algunos autores han afirmado que además de un buen pretratamiento es necesario tener una buena relación de C:N (Behera, Arora, Nandhagopal & Kumar 2014. Citado por: Anjum, Khalid, Mahmood & Aziz 2015), para ello se ha recomendado realizar codigestiones y así equilibrar el alto contenido de carbono que poseen los lignocelulósicos con sustratos ricos en nitrógeno.

Es importante tener en cuenta que durante la etapa actuaran diferentes microorganismos, entre ellos están las enzimas celulasas que actúan en polímeros como la celulosa y la hemicelulosa, algunas de estas encimas son: endocelulosa, exocelulosa y celobiasas, las cuales son las encargadas de romper los enlaces de 1,4- β glucosídicos que conforman a los polímeros. (Almeida, et. al 2011. Citado por: Corrales, Antolinez, Bohórquez & Corredor 2015).

El pretratamiento de la lignocelulosa modifica la cristalinidad de la celulosa, disminuye la cantidad de hemicelulosa y lignina, lo que genera un aumento en la hidrólisis de la materia prima (Silverstein, Chen, Sharma-Shivappa & Boyette 2007. Citado por Guilherme, Dantas, Santos, Fernandes & Macedo 2015).

Estructura de materiales lignocelulósicos

Las estructuras lignocelulósicas se ubican en un tejido medio de la pared celular y en las capas de esta; junto a la hemicelulosa forman una matriz alrededor de las microfibrillas de la celulosa (Salazar A & Gamboa A, 2013). Por este motivo es que la celulosa de la biomasa lignocelulósica es difícil de degradar por parte de los microorganismos anaerobios. Además, representa a los tres polímeros más abundantes en el planeta.

La biomasa lignocelulósica está compuesta principalmente de celulosa (35-45%), hemicelulosa (25-40%) y lignina (5-25%) (Zhang et al., 2015). Los dos primeros son carbohidratos, mientras que el último es un polímero tridimensional aromático (Wei 2016).

Figura 12. Unidades básicas que componen el polímero de la lignina|

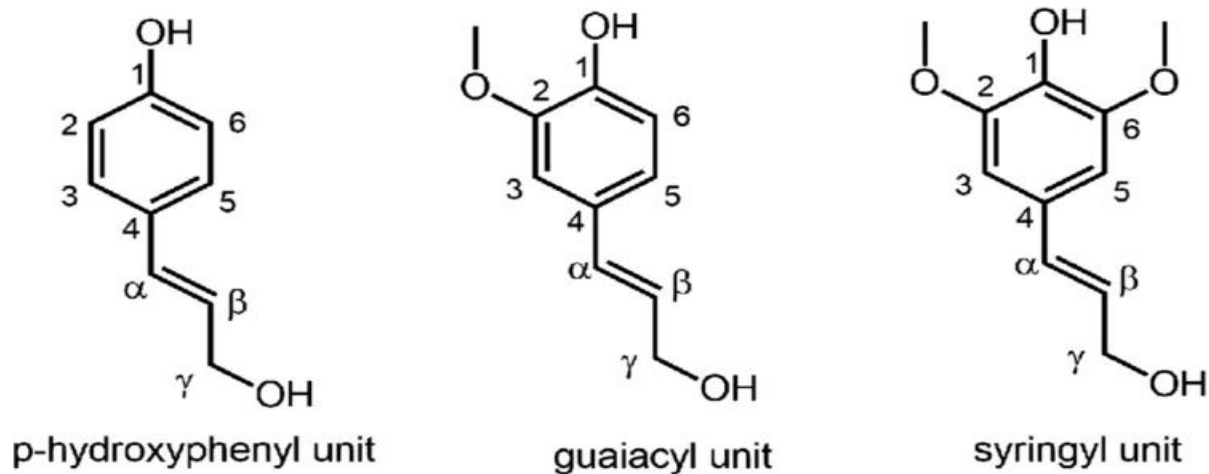


Figura 12. Estructuras poliméricas que componen la lignina. (Wang, Dai, Yang & Luo, 2017)

La celulosa

La celulosa es un homopolisacárido lineal que consiste en unidades de glucosa anhidra (500-15,000) unidas por enlaces β -1,4 glicosídicos con celobiosa como la unidad menos repetitiva es uno de los principales componentes de la pared celular de la planta (Saini, Saini & Tewari 2015. Citado por Fatma et al., 2018). Los enlaces de hidrógeno intramoleculares e intermoleculares (enlace H) formados debido a los enlaces glicosídicos β -1, 4 hacen que la celulosa nativa sea muy dura, cristalina e inmune a la acción de la enzima. (Meng & Ragauskas 2014. Citado por Citado por Fatma et al., 2018).

Así, la celulosa es insoluble en agua, alcoholes, éteres, cloroformo, fenol, acetona, benzol, álcalis diluidos y en la mayoría de los disolventes orgánicos. Algunas

disoluciones concentradas de bases, ácidos, o sales son capaces de disolverla, pero, sin embargo, producen alteraciones permanentes en la celulosa como consecuencia del proceso de disolución (Wise, 1946; Wang, Gurau & Rogers 2012 Citado por: Rubio, 2016)

Hemicelulosa

La hemicelulosa tiene una estructura amorfa y variable que se origina a partir de heteropolímeros que incluyen hexosas (D-glucosa, D-galactosa y D-manosa) junto con pentosa (D-xilosa y L-arabinosa) y puede contener ácidos de azúcar (ácidos urónicos) cómo D-glucurónico, D-galacturónico y ácidos metil galacturónicos.

Los fundamentos de esta cadena se forman a partir de los enlaces de xilano β (1/4) que comprenden D-xilosa 90% aprox. y L-arabinosa 10% aprox. (Limayem & Ricke 2012. Citado por Fatma et al., 2018). La ocurrencia de ramas depende de la fuente y la naturaleza de las materias primas (Ali, Charles & Glick 2014; Socha et. al 2014). El componente de hemicelulosas de la madera blanda es glucomananos naturales, mientras que la hemicelulosa de madera dura está compuesta de xilanos. La función de la hemicelulosa es formar un vínculo entre la lignina y la celulosa (Alonso, Wettstein, Mellmer, Gurbuz & Dumesic 2013. Citado por Fatma et al., 2018).

Lignina

La lignina tiene una compleja estructura amorfa y recalcitrante que consta de tres unidades diferentes de fenilpropano (p-coumaryl, coniferyl y sinapyl alcohol) que se mantienen unidas por diferentes tipos de enlaces (Gallert & Winter 1999; Hendriks & Zeeman 2009. Citado por Hu, Y., Hao, X., Wang, J & Cao, Y 2015).

La lignina es considerada como el polímero aromático más abundante que contiene estructuras no fenólicas y fenólicas. Forma la parte integral de la pared secundaria y juega un papel importante en la conducción del agua en las plantas vasculares. Además, es el segundo componente principal de la biomasa después de los materiales celulósicos.

Muchos hongos, bacterias e insectos tienen la capacidad de disminuir esta lignina produciendo enzimas. Entre estos hongos son los principales actores en la degradación de la lignina (Madadi & Abbas 2017).

La presencia de lignina genera una barrera que impide la exposición adecuada de la celulosa para los procesos de hidrólisis enzimática, la cual es la primera fase de la digestión anaerobia. (Pantoja, Cuatin & Muñoz, 2015.)

Figura 13. Estructura general de la lignocelulosa.

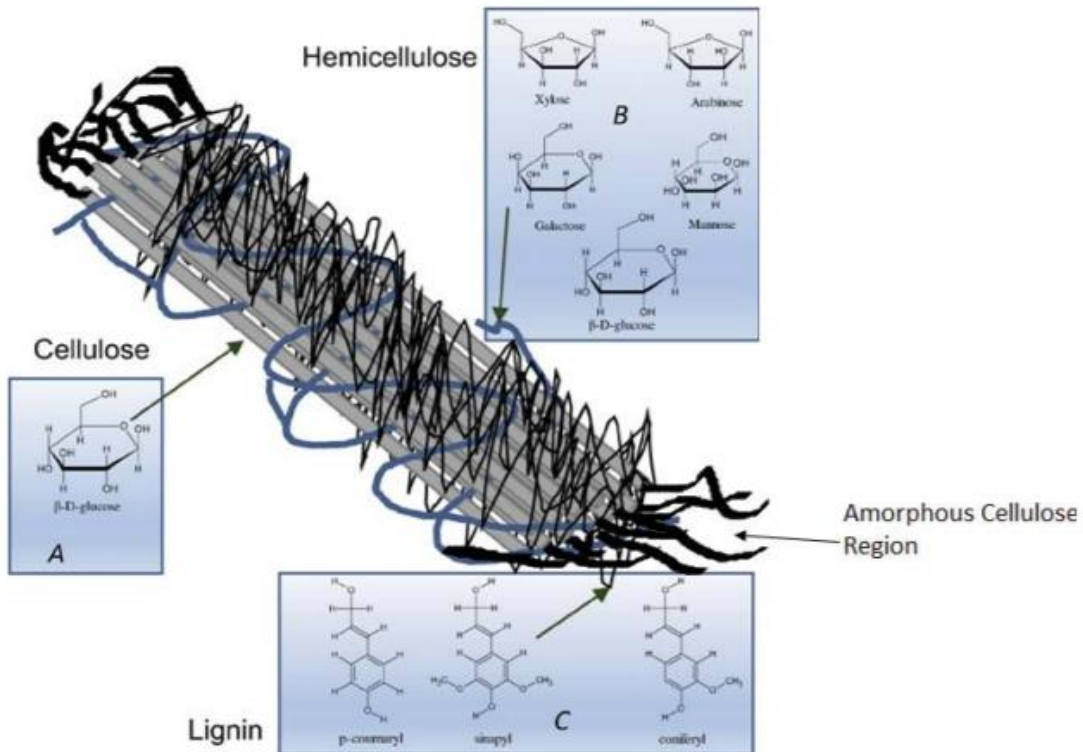


Figura 13. Componentes de la estructura lignocelulósica. Celulosa, Hemicelulosa y Lignina. (Institute of Nuclear Chemistry and Technology, 2017)

Enfoques teóricos de los diferentes tipos de pretratamientos para residuos de poda y similares, nuevas metodologías y perspectivas metodológicas

Pretratamiento físico

Los pretratamientos físicos están constituidos por operaciones mecánicas y diferentes tipos de irradiaciones. En breve, revisaremos estas técnicas de pretratamiento.

Pretratamiento mecánico

El pretratamiento mecánico del material lignocelulósico es un paso esencial para mejorar la distribución, la accesibilidad enzimática y la efectividad de la bioconversión. También aumenta la densidad aparente, mejora las propiedades de flujo, aumenta la porosidad y genera una superficie ideal sin la producción de corrientes secundarias tóxicas. La reducción del tamaño de la biomasa aumenta el área de superficie accesible del material y reduce la cristalinidad de la celulosa. (Barakat, Mayer-Laigle, Solhy, Arancon, de Vries, Luque, 2014. Citados por Bhutto, et al., 2017)

Las técnicas mecánicas de pretratamiento, como la molienda, trituración, o corte, ya están disponibles para el proceso de biogás a gran escala; los efectos en los rendimientos de gas a través del tratamiento mecánico dependen generalmente de las propiedades del material y la técnica utilizada (Lindmark et al., 2012. Citado por Lindner, Zielonka., Oechsner, & Lemmer 2015).

En general, el tratamiento mecánico de material orgánico conduce a una reducción en el tamaño de partícula y produce un área de superficie mayor, lo que proporciona un área de contacto mayor para los microorganismos y por lo tanto aumenta los rendimientos de biogás (Lindmark, Leksell, Schnürer, Thorin, 2012; Sharma, Mishra, Sharma, Saini, 1988. Citados por Lindner, Zielonka, Oechsner & Lemmer 2015).

En comparación con los métodos químicos y termoquímicos, la principal ventaja del tratamiento mecánico es que no se producen tóxicos, ni se producen subproductos inhibidores durante el paso de desintegración (Hendriks y Zeeman, 2009. Citados por

Lindner, Zielonka, Oechsner & Lemmer 2015). Sin embargo, un efecto perjudicial es el calentamiento del sustrato durante el tratamiento, que puede dar como resultado la pérdida de sustancias orgánicas volátiles y, por lo tanto, puede llegar a reducir el potencial de metano (Carlsson, Lagerkvist, Morgan-Sagastume, 2012. Citado por Lindner, Zielonka, Oechsner & Lemmer 2015).

Pretratamiento de irradiación

Este tipo de pretratamiento es muy conveniente cuando se trata de materiales poliméricos que necesitan una modificación estructural, para poder simplificar sus estructuras a aquellas que son susceptibles de ser biodegradadas.

Algunas técnicas que se revisan en el presente artículo son los rayos gamma, haz de electrones y microondas. Es así como para comprender mejor el proceso de rayos gamma se han revisado algunos libros como el Application of ionizing radiation in materials processing realizado por el Institute of Nuclear Chemistry and Technology (2017) en donde se ha afirmado que:

La energía de los rayos gamma se transfiere a los átomos de la biomasa y da como resultado la formación de radicales. La escisión de los enlaces da como resultado la degradación de los polisacáridos, así como la destrucción de las paredes celulares. La irradiación gamma sola es una técnica efectiva para el pretratamiento de biomasa y cuando el proceso de irradiación se combina con

otros (químicos, físicos) hay un aumento en la eficiencia de todo el proceso que puede producir los mismos resultados usando una dosis más baja (p.450)

Sin embargo, se considera que en sí no existe un proceso de destrucción de las paredes celulares, sino más bien es el proceso de separación de los enlaces que componen a cada uno de los tejidos lignocelulósicos causando una disminución en los componentes de la pared celular (Al-Masri y Zarkawi, 1994. Citado por Betiku, Adetunji, Ojumu Solomon, 2008)

Irradiación con haz de electrones

El pretratamiento de irradiación con haz de luz es un método eficiente desde el punto de vista energético, además de ser ambientalmente benigno, dando como resultado la disminución de la cristalinidad y el peso molecular, así como el aumento del área superficial del material lignocelulósico.

La irradiación de material lignocelulósico se lleva a cabo bajo las condiciones de 1MeV y 80 kGy a 0.12 mA (Sundar, Bergey, Salamanca-Cardona, Stipanovic & Driscoll 2014; Bak et al, 2009. Citados por Bhutto., et al., 2017) en donde se ha encontrado una fuerte correlación entre la cristalinidad y la digestibilidad enzimática de las muestras lignocelulósicas pretratadas por es haz de electrones bajo diferentes condiciones

Irradiación por microondas

La irradiación por microondas es un método alternativo al calentamiento convencional. La irradiación por microondas puede producir rápidamente calor directo y enfocado, además de cambiar la orientación dipolar de las moléculas polares (Toteci, Kennedy & Droste 2009. Citados por Li, Kong, Yang, Li, Qi & Sun, 2011). El pretratamiento puede ser eficaz en la degradación de la lignina y la hemicelulosa al mejorar la hidrólisis con los ácidos formados a partir del tratamiento, además al aumentar la temperatura, éste actuará como un catalizador aumentando la eficiencia del proceso (Nizami, Korres & Murphy 2009. Citados por Li, Kong, Yang, Li, Qi & Sun, 2011).

Debido a que el calentamiento de la biomasa en el proceso de irradiación por microondas es desde el interior hacia el exterior, en el sistema se produce un aumento abrupto de la temperatura y la presión dentro de la biomasa, por lo tanto, provocaría una interrupción completa de la estructura de la biomasa (Binod et al., 2012; Wang et al., 2012. Citados por Feng, Li, Li, Zhu, Xiao, Li & Wang 2016). lo que podría generar un aumento en el área superficial, aprovechable por los microorganismos anaerobios.

Cabe resaltar que la eficiencia del método varía según los diferentes tipos de lignocelulosas (componentes y porcentajes de lignina, hemicelulosa y celulosa).

Pretratamiento Químico

El pretratamiento químico se ha investigado utilizando diferentes tipos de productos químicos, principalmente ácidos y bases de diferentes resistencias bajo diferentes condiciones. El pretratamiento químico se utiliza para lograr la disociación de algunos compuestos orgánicos mediante ácidos fuertes, álcalis u oxidantes.

El principio de este pretratamiento es que, a través de diferentes tipos de productos químicos, se pueda modificar la estructura del material lignocelulósico, generando así, una solubilización de los complejos de lignina y una separación de la hemicelulosa y la celulosa, para que este último tenga un aumento en su área superficial y así aumentar la hidrólisis del material lignocelulósico. El efecto del pretratamiento químico depende del tipo de método aplicado y las características de los sustratos.

El pretratamiento químico no es adecuado para sustratos fácilmente biodegradables que contienen altas cantidades de carbohidratos, debido a su degradación acelerada y la posterior acumulación de AGV (Wang, Mattsson, Rundstedt & Karlsson 2011. Citados por Ariunbaatar, Panico, Esposito, Pirozzi & Lens 2014). En cambio, puede tener un claro efecto positivo en sustratos ricos en lignina ya que está compuesto de polímeros aromáticos difíciles de degradar. Los altos costos de los productos químicos y las inversiones en equipos de requisitos previos son un obstáculo para la implementación de esta técnica a gran escala.

Tratamiento alcalino

Los materiales lignocelulósicos son resistentes a la hidrólisis debido a su estructura y composición. El pretratamiento con álcali elimina los grupos de acetato de la hemicelulosa, lo que hace que las hemicelulosas sean más accesibles a las enzimas hidrolíticas, mejorando así la digestibilidad del sustrato.

El tratamiento con hidróxido de sodio (NaOH) diluido u otras bases, produce un hinchamiento de la biomasa, lo que conduce a un aumento del área superficial interna, un descenso de la cristalinidad, una separación de las uniones estructurales entre la lignina y los carbohidratos y una rotura de la estructura de la lignina. La efectividad de este tratamiento depende del contenido en lignina, ya que una biomasa con un contenido en lignina superior al 26%, la efectividad tiende a disminuir (Domínguez 2003. Citado por Valiente 2016). Bajo condiciones fuertes de alcalinidad ocurre, además de la hidrólisis alcalina, la degradación y descomposición de los polisacáridos disueltos y rotura de radicales. La lignina también se solubiliza parcialmente mediante pretratamiento con álcali, permitiendo un mayor acceso a celulosa y hemicelulosa.

El tratamiento alcalino se puede llevar a cabo con diferentes concentraciones de cal, hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de potasio (KOH). Ha habido varios informes de que el tratamiento alcalino es efectivo para la digestión anaeróbica en estado sólido (Bochmann & Montgomery 2013).

Tratamiento ácido

Es un proceso químico que emplea catalizadores ácidos para transformar las cadenas de polisacáridos que contiene la biomasa (hemicelulosa y celulosa) en sus monómeros elementales. Este tipo de hidrólisis utiliza diferentes clases de ácidos: sulfuroso, clorhídrico, sulfúrico, fosfórico, nítrico y fórmico y a nivel industrial los ácidos clorhídrico y sulfúrico. Los métodos industriales de hidrólisis ácida se pueden dividir en dos grupos: los que emplean ácidos concentrados y trabajan a bajas temperaturas (170- 190°C) y que requieren un mayor tiempo de operación y los que utilizan ácidos diluidos a temperaturas más altas (190-240°C) y tiempos de reacción entre 6-12 segundos (Sánchez 2010. Citado por Citado por Valiente 2016). La principal reacción que se produce es la hidrólisis de la hemicelulosa, produciendo monómeros, como el furfural, hidroximetilfurfural (HMF) y otros productos. La lignina sufre una condensación y precipita.

A pesar de la alta eficiencia de este método, el alto costo de recuperación del ácido, para proteger el medio ambiente, se considera una desventaja; también en el caso de usar ácido sulfúrico, el azufre restante podría conducir a la producción de H₂S (Wyman 1996; Sun, Xu, Sun, Fowler, Baird 2005. Citado por Neshat, Mohammadi, Najafpour & Lahijani 2017).

Pretratamiento Físicoquímico

Los procesos físicoquímicos, representan el efecto ocasionado por la combinación de la acción física (cambio de temperaturas, presiones, etc.) y química (empleo de ácidos, bases, solventes, etc.), los cuales permiten la modificación estructural de la biomasa lignocelulósica, facilitando el aprovechamiento de sus componentes. Los sistemas físicoquímicos más empleados son la explosión por vapor (SE), el pretratamiento con agua caliente en fase líquida o termohidrólisis (LHW), la explosión de fibra de amoníaco (AFEX) y la oxidación húmeda (WO).

Pretratamiento a partir de explosión de vapor.

La explosión de vapor es el método más estudiado y ampliamente utilizado para la biomasa lignocelulósica debido a su idoneidad y eficacia para un amplio rango de materias primas.

La explosión de vapor es un método en el que la biomasa se somete a la acción de vapor saturado (20-50 bar, 160-290°C) luego de 3-6min se provoca una descompresión súbita hasta presión atmosférica produciendo así, rotura de enlaces lignocelulósicos, degradación de la hemicelulosa y aumento en la liberación de la celulosa.

En la figura 14. Podemos identificar como se da la generación de diferentes compuestos inhibidores durante el pretratamiento, los cuales son derivados principalmente de la solubilización parcial de la lignina y de la degradación de la hemicelulosa, supone la

principal desventaja de esta tecnología de pretratamiento (Panagiotou & Olsson 2007. Citado por Moreno 2013). Estos compuestos afectan principalmente a los procesos de hidrólisis y metanogénesis, se pueden clasificar dependiendo de su naturaleza en derivados del furano, ácidos alifáticos y derivados fenólicos.

Figura 14. Compuestos inhibidores formados durante el pretratamiento mediante explosión por vapor de los materiales lignocelulósicos.

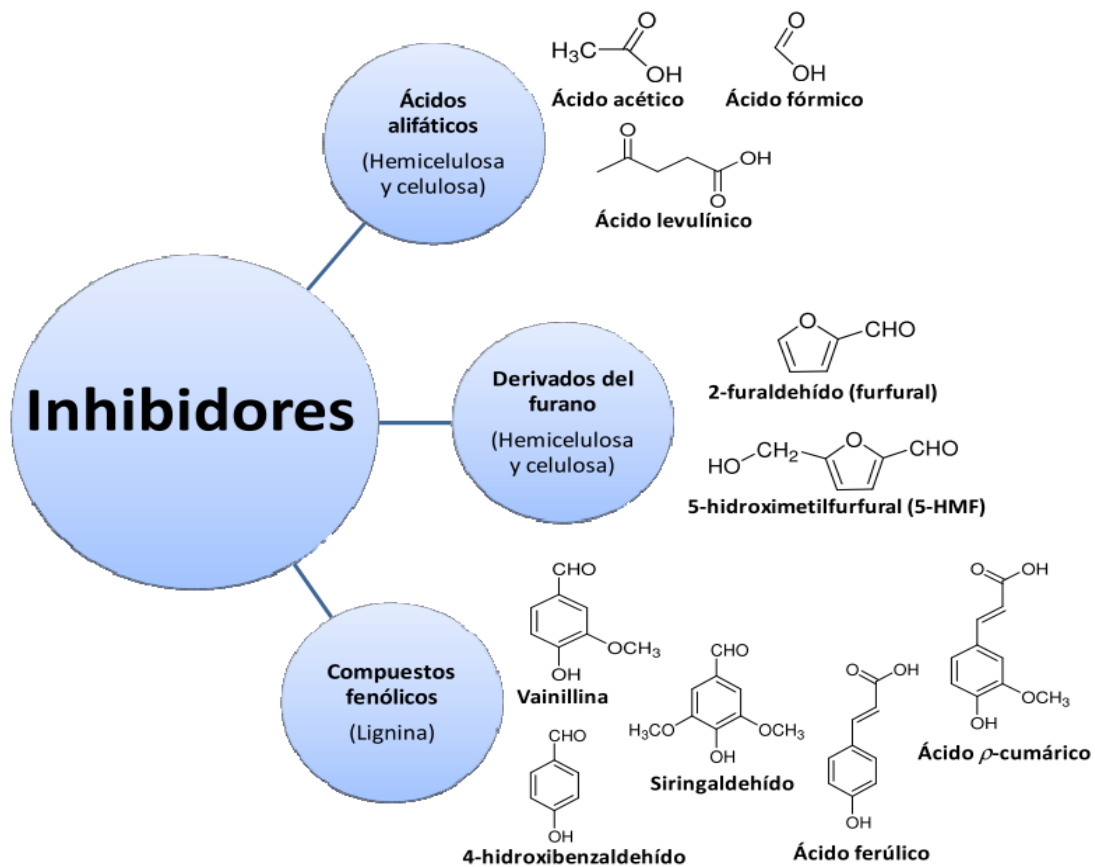


Figura 14. Origen de algunos inhibidores formados durante el pretratamiento de explosión de vapor. (Moreno 2013)

Estos compuestos pueden eliminarse por medio de lavado o de mecanismos de detoxificación como el uso de carbonato cálcico o carbón activo en una gran variedad de materiales lignocelulósicos (Kuhad, Gupta, Khasa & Singh 2010; Arslan & Eken-Saraçoglu, 2010; Cantarella, Cantarella, Gallifuoco, Spera, Alfani 2004. Citado por Bellido 2013). También se puede realizar un proceso de adaptación a dichos compuestos tóxicos de tal forma que se cree un microorganismo altamente tolerante (Yang, Zhang, Zuo, Men & Tian 2011. Citado por Bellido 2013).

Pretratamiento a partir de Termohidrólisis (LHW)

Consiste en someter a la biomasa a un proceso con agua caliente a presión durante un determinado tiempo. Los valores típicos de las variables de operación de este proceso son temperatura dentro del rango 160-230°C y presión superior a 50 bar durante 20 minutos. Esta tecnología presenta elevadas tasas de recuperación de azúcares y no produce inhibidores (Pérez, González, Oliva, Ballesteros & Manzanares 2007; Sousa, Chundawat, Balan & Dale 2009. Citados por Bellido 2013).

El pretratamiento hidrotermal con agua caliente líquida (LHW) es capaz de reducir sustancialmente la recalcitrancia de la pared celular de la biomasa lignocelulósica., además mejora la sacarificación de polisacáridos, principalmente de la celulosa (Li et al., 2017).

Pretratamiento a partir de explosión de fibra de amoniaco (AFEX)

Su fundamento es similar al de la explosión de vapor, pero realizado a temperaturas inferiores (60-100°C) durante un tiempo de residencia entre 5 y 30 minutos, sometiendo posteriormente a la biomasa impregnada en amoníaco a una descompresión repentina. Este pretratamiento presenta elevadas eficiencias en materiales herbáceos (Himmel et al., 1997; Sun y Cheng, 2002; Sarkar, Ghosh, Bannerjee, Aikat 2012. Citados por Bellido 2013). Dicho pretratamiento puede generar hidrolisis parcial de la hemicelulosa, ruptura y desfibrilación de la biomasa lignocelulósica, descristalización parcial de la lignina y debido a esto generar un aumento en la eficiencia de la hidrolisis enzimática.

Pretratamiento a partir de Oxidación Húmeda (WO)

Durante oxidación húmeda, el material lignocelulósico está expuesto a una temperatura de 140-210°C y una presión de hasta 200 bar con oxígeno o aire. Al alcanzar la temperatura objetivo, el oxígeno se purga en el reactor y el material lignocelulósico se trata durante un período de tiempo (5-120 min).

Sin embargo, el oxígeno/aire es preferible debido a su bajo costo y no requiere ningún paso adicional, como la desintoxicación posterior al tratamiento o la neutralización o recuperación del químico. El proceso abre la estructura cristalina de la celulosa al solubilizar la hemicelulosa y descomponer la lignina en dióxido de carbono, agua, ácidos

carboxílicos y fenoles. En paralelo a la reacción química, el material también sufre una ruptura física.

Este método es más adecuado para residuos de biomasa enriquecida en lignina. La eficacia de la oxidación húmeda depende de tres factores: presión de oxígeno, temperatura y tiempo de reacción. En este proceso, cuando la temperatura sube a más de 170 ° C, el agua se comporta como un ácido y cataliza reacciones hidrolíticas. Las hemicelulosas se descomponen en monómeros de pentosa más pequeños y la lignina se oxida, mientras que la celulosa se ve menos afectada por el pretratamiento por oxidación en húmedo. Además de estos, los informes sobre la adición de agentes químicos como carbonato de sodio y peróxido alcalino en la oxidación húmeda redujeron la temperatura de reacción, mejoraron la degradación de hemicelulosa y disminuyeron la formación de componentes inhibidores tales como furfurales y furfuraldehídos (Banerjee et al., 2011. Citado por Kumar & Sharma 2017).

Pretratamiento Biológico

Los métodos de pretratamiento físicos y químicos requieren costosos equipo, productos químicos y entrada de alta energía para procesamiento biomaterial en cambio, el pretratamiento biológico proporciona una solución razonable a tales desventajas (Keller, Hamilton, Nguyen 2003. Citado por Fatma, et al 2018).

Sin embargo, este método también posee algunas desventajas. En primer lugar, es un proceso extremadamente lento requiere semanas para degradar la biomasa lignocelulósica.

En segundo lugar, este proceso da como resultado la pérdida de una cantidad significativa de biomasa. Además, la lignina, azúcares fermentables de la celulosa y las hemicelulosas, se degradan por microbios y extraen el carbono de los azúcares los cuales usan para su propio crecimiento (Steffen, Hofrichter & Hatakka 2000. Citado por Fatma et. al 2018).

En la actualidad los pretratamientos biológicos que existen para mejorar la eficiencia del material lignocelulósico son: el pretratamiento enzimático, microbiano, hongos de podredumbre y rumen.

El pretratamiento enzimático, en comparación con el pretratamiento microbiano (puro), está atrayendo más interés en el tratamiento de material lignocelulósico para la producción de biogás debido a varios méritos de las enzimas:

1. La condición de trabajo de la enzima es más simple que la de las células vivas ya que las enzimas no necesitan nutrientes para crecimiento.
2. Las enzimas pueden funcionar en presencia de bacteriófagos, varias toxinas e inhibidores de algunos tipos de metabolismo microbiano.
3. Es fácil para las enzimas acceder al sustrato debido a su menor tamaño, mayor solubilidad y movilidad que los microbios (Romero-Güiza, Vila, Mata-Alvarez, Chimenos & Astals 2016. Citados por Wei 2016)

Aunque la actividad enzimática se presenta como una alternativa viable, los costos de algunas enzimas comerciales son un poco elevados y si además tomamos en cuenta la relación enzima-sustrato (Sawatdeenarunat, Surendra, Takara, Oechsner, Khanal 2014) los costos seguirán aumentando y sostener el proceso se hará poco viable para la aplicación de un proyecto a gran escala. (Mshandete, Björnsson, Kivaisi, Rubindamayugi & Mattiasson 2008; Soundar & Chandra, 1987. Citados por Wen, Yuan, Li, Liu, Ren, Wang & Cui 2015).

La actividad de deslignificación de biomasa lignocelulósica ha sido investigada para los siguientes tipos de organismos: enzimas, bacterias, hongos (Hongos de podredumbre blancos, marrones y blandos) y rumen (bacterias y protozoarios).

En cuanto a los pretratamientos microbianos y los hongos cabe resaltar que pueden ser de tipo puro o mixto, los puros no llaman mucho la atención de algunos investigadores como (Yu et al. 2016. Citado por Wei 2016) el cual afirma que los cultivos puros poseen pocas enzimas que puedan degradar de manera eficiente la materia orgánica lignocelulósica y por lo tanto se puede considerar como ineficiente, en cambio los cultivos mixtos contienen ciertas ventajas como son la presencia de enzimas complejas necesarias para la degradación del material lignocelulósico, además cada microorganismo en el consorcio microbiano funciona sinérgicamente y se convierte en un micro-ecosistema funcional con un amplio rango de tolerancia a diversas condiciones físicas y químicas.

Los hongos de podredumbre poseen enzimas degradadoras de lignina que han demostrado ser muy eficientes, aunque son los hongos de podredumbre blanca los que han mostrado mejores eficiencias reduciendo los niveles de lignina, gracias a los diferentes enzimas que poseen (lignina peroxidasa, lacasas y manganeso peroxidasa, etc).

Los microorganismos del rumen se han empleado con éxito para digerir una variedad de biomasa lignocelulósica, incluidos los residuos agrícolas, la fracción orgánica de los desechos sólidos municipales y las plantas acuáticas (Barnes & Keller 2004; Hu & Yu 2005; Yue et al., 2007. Citado por Yue, Li, & Yu 2013).

Estudio de caso de pretratamiento de residuo de poda y similares.

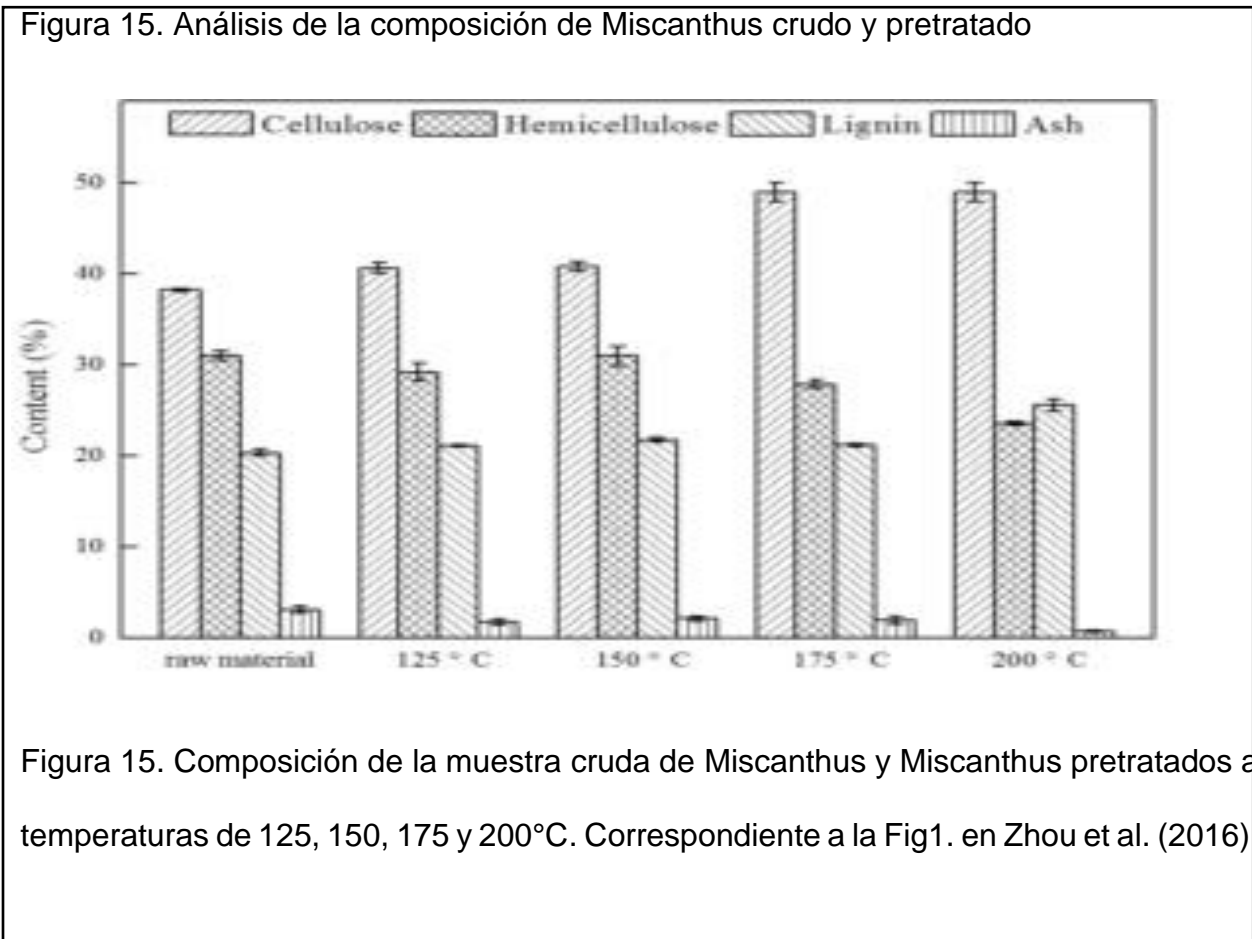
Al revisar algunos estudios relacionados con digestión anaerobia, estructuras lignocelulósicas, pretratamientos para material lignocelulósico, entre otros tópicos de interés; se realizó un rastreo sobre los diferentes pretratamientos, dando paso a la revisión detallada del estudio más relevante, destacado por sus niveles de degradación de lignocelulósicos, aumento de eficiencia en la producción de metano y viabilidad económica del proceso. Además, este artículo fue elegido porque el tipo de sustrato usado pertenece a la familia de las plantas herbáceas, la cual incluye al césped y por la tanto al residuo de poda que es el eje principal en este trabajo.

Este es el documento publicado por Zhou, Li, Zhang & Gu (2016) que lleva por título Effect of hydrothermal pretreatment on Miscanthus anaerobic digestión, teniendo como objetivo mejorar la biodegradabilidad del Miscanthus a partir del pretratamiento hidrotermal a diferentes condiciones que enseguida analizaremos.

Primero, revisaremos las condiciones bajo las cuales se realizó el pretratamiento, luego los resultados y las conclusiones del artículo; y finalmente se darán los análisis y críticas generales.

El pretratamiento hidrotérmico de Miscanthus se realizó en un reactor de acero inoxidable de 100 ml, donde a cada reactor se le agregaron 2,5 g de Miscanthus crudo y 25 ml de agua destilada, cada reactor fue insertado en una cámara de rotación y alta temperatura a 20 rpm, diferentes temperaturas (125, 150, 175 y 200°C) y 30 min.

La composición del Miscanthus crudo y Miscanthus pretratado a diferentes temperaturas se muestra en la figura 15. El contenido de lignocelulosa de Miscanthus utilizado en este estudio fue 89.6% del total de la muestra.



El contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina de Miscanthus crudo fue 38.2, 31.0% y 20,4 respectivamente.

Después del pretratamiento hidrotérmico, aunque la cantidad total de celulosa y hemicelulosa no cambió mucho, la relación fue diferente. El aumento en el contenido de celulosa siempre estuvo acompañado por una disminución en la hemicelulosa.

En las muestras pretratadas a 175°C y 200°C, la degradación de la hemicelulosa fue mucho mayor en ambas muestras por lo que alcanzó el 49.0% de celulosa.

El contenido de lignina también cambió. El aumento de la lignina se contribuye a la degradación de la hemicelulosa, lo cual es positivo porque puede conducir a una mayor biodegradabilidad, ya que la celulosa es más accesible.

La digestión anaeróbica del Miscanthus crudo y pretratado se realizó utilizando como inóculo porquinaza obtenida de una granja, en reactores discontinuos de 100 ml, en los cuales se agregó 0,8g de Miscanthus, 40 ml del inóculo (porquinaza), 40 ml suero y suficiente agua para ajustar el contenido de sólidos totales (ST) a 5% (p/v) los reactores fueron sellados y colocados en una cámara termostática a 35°C.

El grupo en blanco con la misma cantidad de inóculo y volumen de trabajo también se estableció para excluir el biogás producido por el inóculo

Los resultados después del proceso de digestión anaeróbica se ilustran en la figura 16 y 17.

Figura 16. Producción de biogás de las muestras de Miscanthus crudo y pretratado.

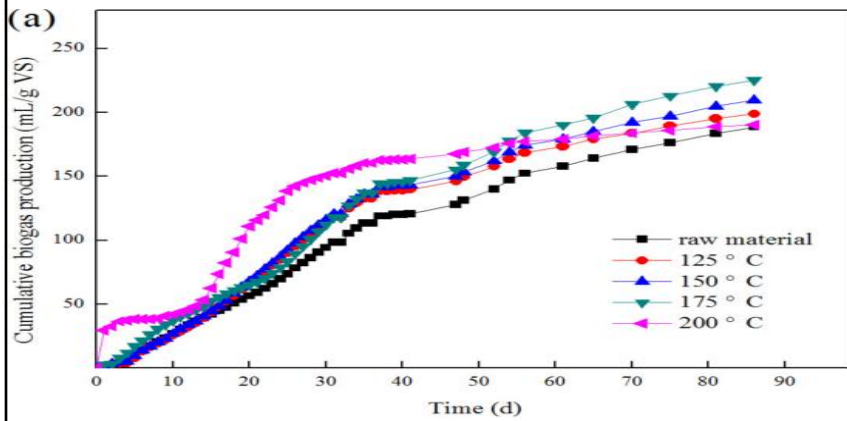


Figura 16. Producción de biogás generado a partir de las muestras de Miscanthus crudo y tratado, a partir del proceso de digestión anaerobia. Correspondiente a la Fig2.(a) en Zhou et al. (2016).

Figura 17. Producción de metano de las muestras de Miscanthus crudo y pretratado

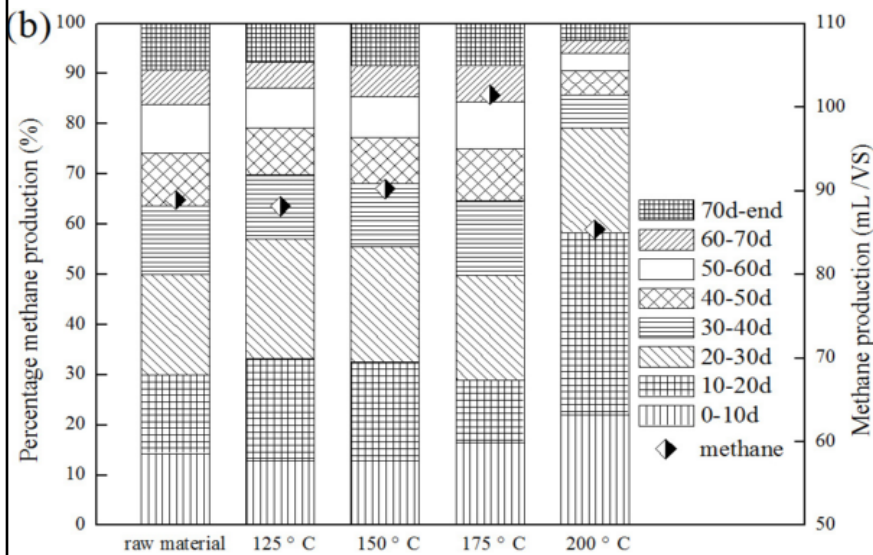


Figura 17. Producción de metano generado cada 10 días hasta el fin del proceso de las muestras de Miscanthus crudo y pretratado. Correspondiente a la Fig2.(b) en Zhou et al. (2016).

La producción de metano más rápida observada en estas cuatro muestras fue entre el día 20 y el día 30. El porcentaje de producción de metano en el Miscanthus pretratado a 200°C fue totalmente diferente al de las demás temperaturas donde más del 80% del metano se produjo en los primeros 30 días, por lo tanto, fue 50% más rápido que las otras muestras.

La mayor producción de metano se obtuvo en las muestras pretratadas de 175 ° C., determinando que el pretratamiento hidrotérmico es un método de pretratamiento efectivo que aumenta la tasa de producción de biogás de Miscanthus en un 49.7% en comparación con la materia prima de este estudio.

En conclusión, la producción de biogás y metano de las diferentes muestras indica que el pretratamiento hidrotermal tuvo efectos evidentes sobre los rendimientos y la producción de biogás respecto al Miscanthus crudo.

Respecto a la producción de biogás, se concentró a los primeros 30 días con pretratamiento hidrotérmico de 200°C, lo que significa que el tiempo de digestión disminuyó en un 50%, por último, el aumento de la cantidad y la velocidad de producción de biogás en las muestras pretratadas a 175 y 200°C, contribuyeron a la eliminación de la hemicelulosa.

Luego de haber revisado el documento, se procederá a realizar un breve análisis y conclusiones de lo ocurrido en el experimento de Zhou, Li, Zhang & Gu (2016).

El proceso hidrotérmico o de termohidrólisis mostró los resultados esperados según la teoría, que nos indica que las condiciones óptimas para este proceso están en un rango

de temperatura entre 160 y 230°C, presiones mayores a 50 bar y una duración del proceso mayor a 20min.

Por ejemplo, Santucci, Maziero, Rabelo, Curvelo & Pimenta (2015) usaron el pretratamiento hidrotérmico en el bagazo de la caña de azúcar y demostraron que, a temperaturas de 170°C y 90 minutos de pretratamiento, los niveles de hemicelulosa disminuían considerablemente convirtiendo 61.7% de la hemicelulosa en azúcares simples.

De esta manera se puede considerar confiable el pretratamiento hidrotérmico debido a que los materiales lignocelulósicos sufrirán cambios en sus estructuras causados por la acción del agua y las altas temperaturas, que acelerarán el proceso de hidrólisis, aumentando la degradación de la hemicelulosa y el área superficial debido a la hinchazón que provoca la presencia de calor y H₂O en la celulosa (Garrote, Domínguez & Parajo, 1999. Citado por: Bochmann & Montgomery 2013), que finalmente será terminada de degradar por los microorganismos hidrolíticos en la primera fase de la DA.

En los resultados obtenidos de las composiciones del *Miscanthus* crudo y pretratado a diferentes temperaturas, se observa una disminución drástica de la hemicelulosa y de manera directa un aumento en la celulosa cuando la temperatura del pretratamiento supera los 175°C, esto sugiere que la hemicelulosa que es un polisacárido se degradó en unidades de D-azúcares β 1,4 (O'Neill & York, 2003. Citado por: Córdoba 2014), ya que está compuesta por xiloglucano, glucomanano, manano, xilanos y compuestos de

arabinosa, los cuales también se encuentran de manera homóloga en la estructura de la celulosa, por tal motivo las concentraciones de celulosa aumentaron al momento de realizar la prueba de concentración de la celulosa después del pretratamiento hidrotérmico a 175 y 200°C.

Luego de la digestión anaerobia de las muestras de Miscanthus, se evidencia una similitud en las curvas acumulativas de producción de biogás para las muestras pretratadas entre 125 y 175°C. A diferencia de la muestra pretratada a 200°C, la cual tuvo una mayor aceleración en la producción de biogás, generando un agotamiento del sustrato en menor tiempo que las demás muestras, como se evidencia en la figura 7.

El Miscanthus pretratado a 175°C generó mayor cantidad de biogás por lo que se cree que el pretratamiento a 200°C ocasionó una transformación en productos no aprovechables en la digestión anaerobia afectando directamente en la producción de metano.

En conclusión, el pretratamiento a 200°C fue 50% más veloz en la producción de metano que las demás muestras, lo cual es una ventaja importante en el aprovechamiento de la biomasa; aunque fue el pretratamiento a 175°C el que generó mayor producción de metano y se mantuvo estable hasta el final del proceso.

Por lo tanto, se considera a la muestra pretratada a 175°C es la más acertada, sí el objetivo es la obtención de la mayor cantidad de metano.

Este pretratamiento presentó varias ventajas, algunas de ellas son: la operación a una temperatura relativamente más baja que otros pretratamientos fisicoquímicos, lo que conlleva a una reducción en el consumo de energía y la no formación de subproductos

de degradación, además de ser una tecnología respetuosa con el medio ambiente, ya que no utiliza ningún agente químico diferente al agua, lo que reduce costosos procesos de recuperación.

Metodología más eficiente y de bajo costo para realizar el pretratamiento de los residuos de poda y similares.

Luego de haber analizado la teoría y las experiencias obtenidas en cada uno de los artículos revisados, se procederá a proponer una metodología eficiente y capaz de generar efectos positivos en la producción de biogás a partir de la DA.

Esta metodología tiene como objetivo prevenir la reducción de la materia ya que los pretratamientos físicos necesitan de equipos caros y/o costosos mantenimientos, además provocan la pérdida de biomasa y generan poca viabilidad económica, además se evitará usar productos químicos que puedan generar problemas al medio ambiente o cuyo costo sea muy elevado para tener viabilidad en el proceso.

Aunque el pretratamiento biológico presenta estas características el tiempo que necesita para que los microorganismos generen los cambios necesarios en la materia prima son muy extensos y las enzimas comerciales que pueden disminuir estos tiempos considerablemente suelen ser muy costosos, por esto se ha elegido al pretratamiento hidrotérmico como el más conveniente para tratar biomasa lignocelulósicas, ya que no generan inhibidores ni reducen el contenido de biomasa.

Varios artículos han demostrado que las temperaturas superiores a 170°C son óptimas para este tipo de biomásas, ya que no generan inhibidores luego de la degradación de la hemicelulosa.

Por esto se propone una metodología basada en este pretratamiento, que tenga como objetivo la mayor liberación de la celulosa y mayor acceso para los microorganismos hidrolíticos, para lograrlo se plantea la siguiente metodología.

Para ello debemos elegir el sustrato y obtener una cantidad de 2,5 g, debe ser una planta de tipo herbácea, es decir, que contenga mayor cantidad de celulosa que de lignina, es necesario que el sustrato esté fresco, luego se procederá a secar la muestra a temperatura ambiente y posteriormente a reducir su tamaño a través de cortes y no de maceración, hasta tener una longitud entre 1-2 cm. El resultado obtenido será mezclado con 25ml de agua destilada y se calentará a una temperatura de aprox. 171°C por 30min, durante este paso es necesaria la agitación constante de la mezcla y garantizar que el agua usada mantenga su estado líquido a través del aumento de la presión interna del reactor

Conclusiones

Los pretratamientos existentes y sus respectivas combinaciones han demostrado que pueden mejorar el proceso de hidrolisis de varios tipos de sustratos, los más acertados para el tratamiento de la biomasa lignocelulósica son el pretratamiento alcalino y el pretratamiento hidrotérmico. Debido a que ambas aumentan considerablemente el acceso a la celulosa. El pretratamiento alcalino a través de la solubilización de la lignina y el pretratamiento hidrotérmico mediante la degradación de la hemicelulosa.

El pretratamiento hidrotérmico es el más recomendado para la biomasa lignocelulosa debido a que no emplea agentes químicos y sus temperaturas no son tan elevadas como para producir inhibidores que afecten su posterior aprovechamiento en la digestión anaerobia.

Referencias

- Anjum, M., Khalid, A., Mahmood, T & Aziz, I (2015). Anaerobic co-digestion of catering waste with partially pretreated lignocellulosic crop residues. In *Journal of Cleaner Production* 117 (1) 56-63
- Bellido, C (2013) Obtención de bioetanol 2G a partir de hidrolizados de paja de trigo. Fermentación de los penta y hexa carbohidratos con *Pichia stipitis* (*Tesis doctoral*) Universidad de Valladolid, Valladolid, España.
- Betiku, E., Adetunji, O., Ojumu, T. & Solomon, B (2008) A comparative study of the hydrolysis of gamma irradiated lignocelluloses. In *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 26 (2) 251-255.
- Bhutto, A., Qureshi, K., Harijan, K., Abro, R., Abbas, T., Bazmi, A., Karim, S. & Yu, G (2017) Insight into progress in pre-treatment of lignocellulosic biomass. In *Energy* 122 (1) 724-745. 10.1016/j.energy.2017.01.005.

Bochmann, G. & Montgomery, L (2013). Storage and pre-treatment of substrates for biogas production. In *The Biogas Handbook 1* (1) 85-103.

Cadavid, L & Bolaños, I (2015). Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de energía renovable en una ciudad colombiana. En *Energética* 46 (1) 23-28.

Córdoba J (2014). Degradación hidrotérmica del olote en condiciones subcríticas y la identificación de los productos químicos de valor agregado. (Tesis Doctoral en Ciencias en Biosistemática, Ecología y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas). Universidad de Guadalajara. Zapopan, Jalisco, México.

Corrales, L., Antolinez, D., Bohórquez J & Corredor A (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. En *NOVA* 13 (23) 55-81.

Dinero (31 de agosto del 2017) Colombia genera 12 millones de toneladas de basura y solo recicla el 17%. Revista Dinero. Recuperado de <http://www.dinero.com/edicion-impresa/pais/articulo/cuanta-basura-genera-colombia-y-cuanta-recicla/249270>

Escorcía, T (2008). El análisis bibliométrico como herramienta para el seguimiento de publicaciones científicas, tesis y trabajos de grado. (*Tesis pregrado*). Universidad Javeriana de Bogotá, Colombia.

Fatma, S., Hameed, A., Noman, M., Ahmed, T., Sohail, I., Shahid, M., Tariq, M. & Tabassum, R (2018). Lignocellulosic Biomass: A Sustainable Bioenergy Source for Future. *Protein & Peptide Letters*. 25 (2) 1 -16.

Feng, Y., Li, G., Li, X., Zhu, N., Xiao, B., Li, J & Wang, Y. (2016). Enhancement of biomass conversion in catalytic fast pyrolysis by microwave-assisted formic acid pretreatment. *Bioresource Technology*. 214 (1) 520 - 527

Feng, Q & Lin, Y (2017) Integrated processes of anaerobic digestion and pyrolysis for higher bioenergy recovery from lignocellulosic biomass: A brief review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77 (1) 1272-1287
doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.022.

Guilherme, A., Dantas, P., Santos, E., Fernandes, F & Macedo, G (2015). Evaluation of composition, characterization and enzymatic hydrolysis of pretreated sugar cane bagasse. In *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 32 (1) 23-33.

Hu, Y., Hao, X., Wang, J & Cao, Y (2015). Enhancing anaerobic digestion of lignocellulosic materials in excess sludge by bioaugmentation and pre-treatment. In *Waste management* 49 (1) 55 - 63

Institute of Nuclear Chemistry and Technology (2017) Radiation pretreatment of biomass. In *Applications of ionizing radiation in materials processing* 2 (1) 450.

Kato, D., Elía, N., Flythe, M & Lynn, B (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass using Fenton chemistry. *Bioresource technology*. 162 (1) 273-278. 10.1016/j.biortech.2014.03.151.

Kumar, A & Sharma, S (2017). Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks. In *Bioresources and Bioprocessing*, 4 (1) 7.

Li, L., Kong, X., Yang, F., Li, D., Qi, W & Sun, Y (2011). Biogas production potential and kinetics of microwave and conventional thermal pretreatment of grass. In *Applied biochemistry and biotechnology*. 166 (5) 1183 - 1191.

Li M., Cao S., Meng X., Studer M., Wyman C., Ragauskas A & Pu Y (2017). The effect of liquid hot water pretreatment on the chemical–structural alteration and the reduced recalcitrance in poplar. In *Biotechnol Biofuels* 10 (237) 1-13 DOI 10.1186/s13068-017-0926-6

Lindner, J., Zielonka, S., Oechsner, H & Lemmer, A (2015) Effects of mechanical treatment of digestate after anaerobic digestion on the degree of degradation. In *Bioresource technology* 178 (1) 194-200

Madadi, M. & Abbas, A (2017). Lignin Degradation by Fungal Pretreatment: A Review. In *Journal of Plant Pathology & Microbiology*. 8 (2) 1-6.

Madadi, M., Tu, Y & Abbas, A (2017). Recent Status on Enzymatic Saccharification of Lignocellulosic Biomass for Bioethanol Production. In *Electronic Journal of Biology* 13 (2) 135-143.

Mejía, A & Ramírez, J (2013). Modelo Económico para el aprovechamiento de los residuos orgánicos de mango y banano generados en la central mayorista de Antioquia. (*Tesis de maestría*). Universidad de Manizales. Manizales, Colombia.

Ministerio de Energía de Chile, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura & Global Environment Facility (2011) Fundamentos de la fermentación metanogénica. *Manual de Biogás* 1 (1) 21.

Moraes, B., Zaiat, M & Bonomi, A (2015). Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44 (1) 888–903.

Moreno, A. (2013). Estudio de enzimas oxidorreductasas en la transformación de biomasa lignocelulósica en biocombustibles: Deslignificación y destoxificación (*Tesis Doctoral*) Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.

Neshat, S., Mohammadi, M., Najafpour, G & Lahijani, P (2017) Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79 (1) 308-322

Pantoja A., Cuatin M & Muñoz D, 2015. Efecto del pretratamiento químico y enzimático en la deslignificación de biomasa agroindustrial típica del cauca. En *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* 13 (1) 45-53

Parra, R (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria, En *Producción + Limpia* 10 (2) 142-159.

Patinvoh, R., & Osadolor, O., Chandolias, K., Sárvári-Horváth, I & Taherzadeh, M (2016). In Innovative Pretreatment Strategies for Biogas Production. *Bioresource Technology*. 224 (1) 13-24, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.083>

Rubio, S 2016. Recuperación de celulosa en un residuo forestal mediante líquidos iónicos. (*Tesis Maestría en ciencia y tecnología ambiental*). Centro de investigación en materiales avanzados. Chihuahua, Chihuahua, México.

Salazar A & Gamboa A (2013). Importancia de las pectinas en la dinámica de la pared celular durante el desarrollo vegetal. En *revista de educación bioquímica* 32 (2) 67-75

Santucci, B., Maziero, P., Rabelo, S., Curvelo A & Pimenta M. (2015) Autohydrolysis of Hemicelluloses from Sugarcane Bagasse During Hydrothermal Pretreatment: a Kinetic Assessment. In *Bioenergy Research* 8 (4) 1778-1787. doi.org/10.1007/s12155-015-9632-z

Sawatdeenarunat, C., Surendra, K., Takara D., Oechsner, H. & Khanal S (2014). Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Challenges and opportunities. In *Bioresource Technology*. 178 (1) 178–186

Scopus (23 de abril 2018). Looking for free journal rankings and metrics Scopus offeres free metrics to non-subscribers. [página web]. Recuperado de <https://journalmetrics.scopus.com>

Secretaria de agricultura, ganadería, desarrollo rural pesca y alimentación (2014) Lombricultura. En *Fichas Técnicas sobre Actividades Agrícolas, Pecuarias y de Traspatio* 6 (1) 2-8

Universidad autónoma de Bucaramanga (2013) Generalidades sobre los biocombustibles. En *Dimensión Y Alcances De Las Oportunidades En El Sector Biocombustibles* 1 (1) 43

Valiente, I (2016). Pretratamiento de hidrolisis hidrotérmica para la degradación de los carbohidratos complejos de residuos de frutas para la obtención de bioetanol (*Tesis de Maestría*). Universidad de Oviedo, Oviedo España.

Wang, S., Dai, G., Yang, H & Luo, Z (2017). Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state of the art review. In *Progress in Energy and Combustion Science* 62 (1) 33-86.

Web of science (23 de abril 2018). Sistema de acceso a recursos científicos. [página web]. Recuperado de <https://idp.fecyt.es>

Wei, S (2016). The application of biotechnology on the enhancing of biogas production from lignocellulosic waste. In *Applied Microbiology and Biotechnology* 100 (23) 9821-9836.

Wen, B., Yuan, X., Li, Q., Liu, J., Ren, J., Wang, X. & Cui, Z (2015). Comparison and evaluation of concurrent saccharification and anaerobic digestion of Napier grass after pretreatment by three microbial consortia. In *Bioresource Technology* 175 (1) 102-111.

Yue, Z., Li, W & Yu H (2013). Application of rumen microorganisms for anaerobic bioconversion of lignocellulosic biomass. In *Bioresource technology* 128 (1) 738-744
10.1016/j.biortech.2012.11.073.

Zhou, X., Li, Q., Zhang, Y & Gu, Y (2016). Effect of Hydrothermal Pretreatment on Miscanthus Anaerobic Digestion. In *Bioresource Technology* 224 (1) 721-726.