

## Procesos de Transformación: Perspectiva de Aprovechamiento para los Residuos de la Agroindustria del Plátano<sup>1</sup>

James Andrés Gómez Soto<sup>2</sup>, Óscar Julián Sánchez Toro<sup>3</sup>, Luis Gerónimo Matallana Pérez<sup>4</sup>

### Resumen

**Introducción:** los residuos agrícolas están aumentando en todo el mundo, siendo necesario identificar nuevas estrategias para su valorización. **Objetivo:** analizar los principales procesos de transformación de biomasa para ser implementados en el aprovechamiento de los residuos de la agroindustria del plátano. **Metodología:** la consulta de la información se realizó en diferentes bases de datos como: Web of Science, Scopus y Google Scholar. Se utilizaron diferentes palabras claves en inglés y español como: “waste”; “process”; “transformation”; “banana” and “plantain”. La información se

analizó en MS Excel. **Resultados:** los procesos de conversión física y biológica pueden ser una alternativa para la valorización de los residuos de la agroindustria del plátano en diferentes productos de valor agregado como alimentos para animales y biocombustibles debido a la cantidad y composición de este tipo de residuos. El alto contenido de humedad de estos residuos puede representar un inconveniente para su aprovechamiento. Es necesario extraer agua de la matriz para aumentar la eficiencia en la transformación. **Conclusiones:** diseñar y evaluar tecno-económica, ambiental y socialmente los procesos de transformación físicos y biológicos en el contexto de las biorrefinerías puede

1 Artículo original derivado del proyecto de investigación: Diseño de una Biorrefinería para el Aprovechamiento de los Residuos Lignocelulósicos y Amiláceos de la Agroindustria del Plátano. Financiado por el Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación de Colombia (Min Ciencias). Período de realización: marzo de 2017 a 2021. Grupo de Investigación en Alimentos y Agroindustria, Departamento de Ingenierías, Doctorado en Ingeniería, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.

2 Doctorado (c) en Ingeniería, Ingeniero de Alimentos, M.Sc. Ingeniería de Alimentos.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2822-0465>.

3 Ingeniero Químico, M.Sc. en Biotecnología, Ph.D en Ingeniería, profesor asociado, email: [osanchez@ucaldas.edu.co](mailto:osanchez@ucaldas.edu.co)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2372-0647>.

4 Ingeniero Químico, Ph.D en Ingeniería Química, profesor asistente, email: [luis.matallana@ucaldas.edu.co](mailto:luis.matallana@ucaldas.edu.co)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8713-0411>.

**Autor para Correspondencia:** James Andrés Gómez Soto, e-mail [jags04@gmail.com](mailto:jags04@gmail.com)

Recibido: 02/06/2020 Aceptado: 06/08/2021

\*Los autores declaran que no tienen conflicto de interés

apoyar la toma de decisiones de inversión e investigación en este tipo de tecnologías para ser implementadas a nivel industrial.

**Palabras clave:** Biomasa, conversión de energía, proceso químico, termoquímica.

---

### Processes of Transformation: Perspective of use for the Residues of the Plantain Agro-industry

#### Abstract

**Introduction:** agricultural waste is increasing worldwide. It is necessary to identify new strategies for its valorization. **Objective:** analyze the main processes of transformation of biomass to be implemented in the use of the waste of the plantain agroindustry. **Methodology:** the information was consulted in different databases such as Web of Science, Scopus and Google Scholar. Different keywords in English and Spanish were used: waste; process; transformation; banana and plantain. The information was analyzed in MS Excel. **Results:** the physical and biological

conversion processes can be an alternative for the waste valorization of plantain agroindustry in different value-added products such as animal feed and biofuels due to the quantity and composition of this type of waste. The high moisture content of this waste is an inconvenience to its valorization. It is necessary to extract an amount of water from the matrix to increase the efficiency in the transformation. **Conclusions:** the design and techno-economic, environmental and social assessment of physical and biological conversion processes in the context on biorefineries can support investment and research decisions in this type of technologies to be implemented at a large scale.

**Keywords:** Biomass, chemical processes, energy conversion, thermochemistry.

---

### Processos de Transformação: Perspectiva da Aproveitamento para os Resíduos da Agroindústria do Plátano

#### Resumo

**Introdução:** os resíduos agrícolas estão a aumentar em todo o mundo. É necessário identificar novas estratégias para a sua valorização. **Objetivo:** analisar os principais processos de transformação de biomassa para implementar no aproveitamento dos resíduos

da agroindústria do platano. **Metodologia:** a informação foi consultada em bases de dados como: Web of Science, Scopus e Google Scholar. Diferentes palavras chaves em inglês e espanhol foram utilizadas: “waste”; “process”; “transformation”; “banana” e “plantain”. A informação foi analisada em MS Excel. **Resultados:** os processos de conversão física e biológica podem ser uma alternativa para a valorização dos resíduos da agroindústria do platano em diferentes produtos de valor agregado como para a

alimentação animal e os biocombustíveis, devido à quantidade e composição deste tipo de resíduos. O elevado teor de humidade destes resíduos pode constituir um inconveniente para o seu aproveitamento. É necessário extrair água da matriz para aumentar a eficiência na transformação. **Conclusões:** desenhar e avaliar tecnono- económica, ambiental e socialmente os

procesos de transformação física e biológica no contexto das biorrefinarias pode apoiar a tomada de decisões de investimento e investigación neste tipo de tecnologías para serem implementado a nível industrial.

**Palavras-chave:** Biomassa, conversão de energia, processo químico, termoquímica.

---

## Introducción

En Colombia la generación de residuos agrícolas estimada a partir de los cultivos más representativos para el año 2017 fue de 218.007.204 t aproximadamente. De esta cantidad, el plátano generó aproximadamente 26.547.871 t de residuos (Gómez et al., 2019). De la cosecha del fruto del plátano solo se aprovecha entre el 20 % y el 30 % de la planta (Blanco et al., 2013). El 79% de los pseudotallos, el 65 % del raquis y el 10 % de los frutos de rechazo (fruta que no cumple con las especificaciones de calidad en la cosecha y poscosecha) (ICONTEC, 1976) son dejados en las parcelaciones agrícolas o tratados como residuos sólidos urbanos (Mazzeo et al., 2015; Superservicios, 2019).

Los residuos de la agroindustria del plátano pueden definirse como biomasa residual compuesta por materiales de la actividad agrícola y residuos urbanos (Chen, 2014). Esta biomasa está compuesta mayoritariamente por carbohidratos como celulosa, hemicelulosa y almidón que pueden recuperarse mediante procesos físicos, termoquímicos, químicos y biológicos en diferentes productos de valor agregado

como alimentos, biocombustibles y energía, entre otros (IEA Bioenergy, 2009, 2012; Julio et al., 2017). En este sentido, se requiere analizar nuevos procesos o mejorar los procesos de transformación existentes para la recuperación de la biomasa residual desde el contexto de las biorrefinerías. Las biorrefinerías son sistemas productivos que aprovechan sosteniblemente la biomasa para obtener diferentes productos comercializables (Gómez et al., 2019).

Analizar los procesos físicos, termoquímicos, químicos y biológicos desde su definición puede apoyar la toma de decisiones de investigación e inversión por parte del sector académico y productivo en nuevas líneas y tecnologías para el aprovechamiento de los residuos de la agroindustria del plátano. El objetivo del presente trabajo fue revisar diferentes procesos de transformación de biomasa para ser analizados desde el aprovechamiento de los residuos de la agroindustria del plátano.

## Materiales y Métodos

### Consulta y análisis de la información

La consulta de la información se realizó en las bases de datos de Scopus, Web of Science y Google Scholar. Se siguió el procedimiento descrito por Arango et al. (2017). La combinación de las palabras claves y de los operadores utilizados en las consultas se muestran a continuación: 1) use\* AND waste\*. 2) (use\* OR process\*) AND waste. 3) (process\* OR transformation) AND waste. 4) (process\* OR transformation OR use\*) AND waste. 5) ((process\* OR transformation\* OR use\*) AND waste. 6) plantain AND use\* AND waste\*. 7) plantain AND (use\* OR process\*) AND waste. 8) (process\* OR transformation) AND waste AND plantain OR banana. 9) (process\* OR transformation OR use\*) AND waste AND plantain OR banana. 10) (process\* OR transformation OR use\*). El procedimiento descrito por Pérez and Muñoz (2014) fue utilizado para seleccionar la cantidad de documentos a analizar. 150 documentos fueron analizados utilizando MS Excel.

## Resultados

### Conversión física

#### *Densificación*

La densificación se considera una compactación de las partículas de biomasa sometándose a altas presiones para dar lugar a unos biocombustibles sólidos denominados como *pellets* o *briquetas*. Los *pellets* están constituidos por piezas de tamaño homogéneo, generalmente

cilíndricas de 3 a 12 mm de diámetro y las *briquetas* son piezas de forma cilíndrica o poliédricas de 5 a 15 cm de diámetro y 30–40 cm de largo. Adicional a su forma, los *pellets* y las *briquetas* tienen una densidad específica de 1–1,3 kg/dm<sup>3</sup>, lo que junto a su bajo grado de humedad (igual o inferior al 10%), las convierten en biocombustibles de fácil manejo y de menor costo comparado con la biomasa en bruto (Carrasco, 2007).

Diferentes investigaciones relacionadas con el aprovechamiento de la biomasa en *pellets* y *briquetas* se muestran en la Tabla 1. Estas investigaciones sugieren que el valor calorífico de la biomasa densificada aumenta en comparación con la biomasa en bruto. Esta condición puede estar influenciada por el tratamiento térmico que sufre el material antes de ser compactado, generando una despolimerización (compuestos simples con una mayor capacidad de oxidación) y una mayor cantidad de masa por volumen. Las investigaciones (Tabla 1) también sugieren que estudios más detallados sobre las formas de los *pellets* y las *briquetas* (helicoidales, rizadas, etc.) pueden aportar información sobre la eficiencia en la combustión de este tipo de biocombustibles. Las nuevas formas de esta biomasa pueden contener una mayor cantidad de oxígeno a presión en el interior de la matriz. Por otra parte, las investigaciones de nuevos aditivos que proporcionan información sobre cómo aumentar la eficiencia energética de los *pellets* y las *briquetas*, y cómo disminuir las emisiones de compuestos nocivos al ambiente, son convenientes. La combustión de la biomasa puede generar compuestos

como óxidos nitrosos (Zhan et al., 2017) que afectan negativamente al medio ambiente.

La densificación de la biomasa representa una alternativa para el aprovechamiento de los residuos forestales, especialmente para aquellos con un alto grado de cristalinidad y polimerización (biomasa leñosa) (Pérez

& Samain, 2010). La densificación por ser un proceso físico, puede tener una menor complejidad de operación comparado con otros procesos de conversión (químicos, biológicos, etc.) debido al consumo energético y al tipo de tecnología utilizada (adecuada, intermedia o de punta) (Hazeltine, 2003).

**Tabla 1.** Investigaciones en la fabricación de pellets y las briquetas.

Producto	Equipo	Presión/temperatura de proceso	Biomasa utilizada	Poder calorífico producto final	Referencia
<i>Pellets</i>	Torrefactor	Atmosférica/230°C -270°C	Paja y lodo de carbón	29,2 MJ/kg	Isemin et al. (2017)
	Compactador cilíndrico de pistón a presión hidráulica	147,5 kN/22°C	Residuos de cartón y aserrín	16,94 MJ/kg	Lela et al. (2016)
	Compactador cilíndrico de pistón a presión manual	6 MPa/ambiente	Residuos de aserrín de madera y papel de embalaje	~20 MJ/kg	Kong et al. (2012)
	Prensa de matriz anular /torrefacción	4000 N/100°C	Cáscara de avena enriquecida con prolina y lignina	21,8 MJ/kg	Abedi and Dalai (2017)
	Prensa de matriz anular	-/90°C	Residuos industriales de corcho	20,62 MJ/kg	Nunes et al. (2013)
<i>Briquetas</i>	Compactador cilíndrico de pistón a presión hidráulica	122MPa/21°C	Residuos de eucalipto	18,2 MJ/kg	Eufrade et al. (2017)
	Compactador cilíndrico de pistón a presión hidráulica	30 t/ambiente	Hojas de caña de azúcar, estiércol de vaca, cactus, hojas de mopani, cáscaras de nueces	21,53 MJ/kg	Shuma and Madyira (2017)
	Prensa de matriz anular	7MPa/150-250°C	Residuos de palma aceitera (racimo, torta, etc.)	19,37 MJ/kg	Nasrin et al. (2008)
	Briqueteadora de pistón	Ambiente	Mezcla 50:50 Paja, torta de colza	17,28 MJ/kg	Stolarski et al. (2013)
	Compactador cilíndrico de pistón a presión hidráulica	10 t/ambiente	Papel y aserrín, cáscara de arroz	16,8 MJ/kg	Romallosa and Kraft (2017)

## Conversión termoquímica

### *Combustión*

La combustión de la biomasa representa una serie de reacciones químicas por las cuales los compuestos orgánicos se oxidan hasta dióxido de carbono y agua. El proceso se realiza a altas temperaturas (entre 800°C y 1000°C), utilizando aire como agente oxidante e involucra una etapa inicial de pirólisis y otra de gasificación previas a la de combustión propiamente. La deficiencia de oxígeno conduce a la combustión incompleta y a la formación de diferentes productos, como, por ejemplo, vapor de agua, sales minerales (cenizas), óxidos de nitrógeno y de azufre, entre otros (Carrasco, 2007; Demirbaş, 2007). Este proceso es utilizado para generar energía térmica y eléctrica en diferentes actividades industriales como la generación de vapor en calderas, la generación de energía en termoeléctricas y el tratamiento térmico directo de diferentes sustancias por medio de superficies.

### *Licuefacción*

La licuefacción de la biomasa es la descomposición de los compuestos macromoleculares en moléculas de menor tamaño en presencia de un catalizador adecuado. Al mismo tiempo, estas moléculas que son inestables y reactivas, se repolimerizan en compuestos oleosos que tienen diferentes pesos moleculares. La licuefacción suele llevarse a cabo entre los 252°C y 327°C y una presión entre 5 MPa–20 MPa (Demirbaş, 2009). Este proceso es utilizado principalmente para la obtención de bioaceites y como productos secundarios,

carbón y gases para ser utilizados como biocombustibles.

### *Pirólisis*

La pirólisis es el tratamiento de la biomasa a temperaturas moderadas entre 300°C y 600°C en ausencia de oxígeno para causar despolimerización parcial del material (Clements & Van Dyne, 2006). Para un correcto desarrollo de la pirólisis, es necesario el secado de la biomasa. Por lo general, el proceso de pirólisis utiliza presiones entre 0,1 MPa y 0,5 MPa. En este proceso un catalizador suele ser innecesario, y los fragmentos ligeros descompuestos se convierten en compuestos oleosos a través de reacciones homogéneas en la fase gaseosa (Demirbaş, 2000). Un ritmo lento de calentamiento en la pirólisis tiende a favorecer la producción de gases volátiles (monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno, metano, etileno), agua, ácidos orgánicos y aldehídos, fenoles mixtos y carbón. Un ritmo alto de calentamiento tiende a minimizar la producción de líquidos y maximizar la producción de gas (Clements & Van Dyne, 2006).

### *Gasificación*

La gasificación es la combustión parcial de biomasa para producir gas y carbón (Demirbaş, 2009). La biomasa se trata a altas temperaturas (>700°C) en ausencia de oxígeno, pero con la adición de vapor y eventualmente dióxido de carbono para maximizar la producción de gas de síntesis. Una mezcla de hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y metano puede usarse directamente como combustible o como producto químico intermedio



en la producción de amoníaco, metanol y alcoholes superiores, ácidos orgánicos y aldehídos, gasolina sintética (usando el procesamiento de Fischer–Tropsch) e isobuteno o isobutano (Clements & Van Dyne, 2006). Adicionalmente, el gas de síntesis se puede utilizar para la generación de calor y energía (Brown, 2006).

A nivel mundial, el proceso de conversión termoquímico es uno de los más utilizados para el aprovechamiento de la biomasa debido a la gran variedad de productos que se obtienen (Gírio et al., 2017). Diferentes

investigaciones sobre los procesos de conversión termoquímicos se muestran en la Tabla 2. Se identifica en estas investigaciones, la tendencia a estudiar la transformación de la biomasa con un alto grado de cristalinidad y polimerización (Pérez & Samain, 2010). Posiblemente, esta característica hace que sea más eficiente obtener productos intermedios empleando procesos agresivos a altas temperaturas y presiones controladas, comparado con la obtención de azúcares fermentables por métodos bioquímicos (ejemplo, hidrólisis enzimática).

**Tabla 2.** Investigación realizada en la conversión termoquímica de los residuos.

Proceso	Temperatura °C	Presión	Catalizador	Productos	Biomasa utilizada	Posible utilización	Referencia
Combustión	800-1000 °C	Atmosférica	-	Cenizas	Diferentes tipos de residuos	Fertilizante, material de construcción, combustible	Pels et al. (2005)
	900-980 °C	Atmosférica	Óxidos de hierro	Dióxido de carbono, monóxido de carbono y hidrógeno y metano	Aserrín de pino, piedra de oliva y cáscara de almendra	Cultivo de algas, combustible, síntesis de plásticos, vidrio, gas de barrido, metanol	Mendiara et al. (2018)
	800-1000 °C	Atmosférica	-	Calor, energía eléctrica	Biomasa con una humedad <50%	Estufas, hornos, calderas, turbinas de vapor	Dell'Antonia (2007)
Licuefacción	700-1000 °C	Atmosférica	-	Ceniza modificada	Residuos de madera y paja	Captura de CO <sub>2</sub>	Wang et al. (2017)
	400 °C	300 bar	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Biocrudo	Compost de champiñones usados	Producción de biocombustibles y productos químicos	Jasiūnas et al. (2017)
	180-260 °C	Atmosférica	-	Gas, residuo acuoso, aceite pesado	Aserrín de pino	Producción de biocombustibles (biogolina, biodiesel) y productos químicos	Hardi et al. (2017)
	250-540 °C	Atmosférica	-	Cenizas	Tallos, copas, hojas y bagazo de caña	Fertilizantes, neutralizadores de acidez del suelo	Dirbeba et al. (2017)

Proceso	Temperatura °C	Presión	Catalizador	Productos	Biomasa utilizada	Posible utilización	Referencia
Pirólisis	400 °C	43 bar	-	Bioaceite	Residuos de pino amarillo	Producción de biodiesel y productos químicos	Haverly et al. (2018)
	300-450 °C	-	Dióxido de carbono	Bioaceites, gas, biocarbón	Paja de arroz	Producción de biodiesel, alimentación de calderas, extracción de compuestos químicos, neutralizador de acidez	Biswas et al. (2018)
	500 °C	-	Nitrógeno, Helio	Aceite fenólico	Residuos de roble rojo	Estufas, hornos, calderas, turbinas de vapor	Rover et al. (2018)
	300-700 °C	-	Argón	Biocarbón	Cáscara de maní y paja de trigo	Calderas	Yousaf et al. (2017)
	400-800 °C	-	Amoniaco	Bioaceite, hidrógeno, metano	Residuos de bambú	Producción de biodiesel y derivados plásticos	Chen et al. (2018)
Gasificación	850 °C	-	Arena de sílice y cal dolomítica	Carbón y alquitrán	Virutas de madera	Producción de biocombustibles y productos químicos	Jeremiáš et al. (2017)
	800-900 °C	-	Oxígeno	Gas de síntesis, biocarbón	Estiércol de pollo, astillas de madera	Producción de biocarbón para la eliminación de contaminantes y gas de síntesis como biocombustibles	Ng et al. (2017)
	440 °C	250 bar	Hierro, níquel, rutenio, aluminio y ozono	Hidrógeno	Biomasa de algas	Utilización en celdas de combustibles y producción de derivados plásticos y del nailon	Norouzi et al. (2017)
	380 °C	221 bar	Óxido de níquel cobre y zinc	Hidrógeno	Fronda de palma	Utilización en celdas de combustibles, síntesis de los plásticos, del poliéster y del nailon	Mastuli et al. (2017)

## Conversión química

### *Hidrólisis química*

La hidrólisis química es la reacción que implica la ruptura de un enlace en una molécula con la participación de agua usando

un catalizador químico. Normalmente los catalizadores son ácidos y bases fuertes (Binder & Raines, 2010). Estos catalizadores pueden mejorar la hidrólisis enzimática de la biomasa lignocelulósica para liberar azúcares fermentables (Binod & Pandey, 2015).



La hidrólisis ácida requiere condiciones severas junto con la formación de productos de degradación de azúcares tales como el furfural e hidroximetilfurfural, que inhiben el crecimiento microbiano en etapas de fermentación (Juturu & Wu, 2014; Karimi & Taherzadeh, 2016). A partir de la hidrólisis ácida se puede obtener productos como la xilosa y glucosa (Kumar et al., 2009).

El pretratamiento con bases fuertes se refiere a la aplicación de soluciones alcalinas para obtener, por lo general, hemicelulosa y lignina. Estos procesos utilizan temperaturas y presiones bajas y tiempos más prolongados (horas-días) en comparación con otras tecnologías de pretratamiento (ejemplo, líquidos iónicos). El sodio, el potasio, el calcio y el hidróxido de amonio son sustancias químicas apropiadas para este tipo de proceso. El tratamiento de la biomasa lignocelulósica con hidróxido de sodio causa alteración en su estructura (hinchazón, aumento del área superficial interna, disminución de la cristalinidad, separación de los enlaces estructurales entre la lignina y los carbohidratos) (Balat, 2011), permitiendo que otros catalizadores (ejemplo, enzimas o ácidos) actúen con mayor eficiencia.

#### *Conversión supercrítica*

La conversión supercrítica de la biomasa está basada en la utilización de fluidos supercríticos para oxidar o extraer compuestos. Un fluido supercrítico es un gas o líquido en condiciones de presión y temperatura a las de su punto crítico. Se considera punto crítico aquél en el que las fases líquidas y de vapor se vuelven indistintas. En este punto, el fluido posee

propiedades especiales como mayor poder de difusión, mayor interacción entre las moléculas del solvente y del soluto, y se puede variar su densidad controlando su poder de solvencia. Algunos fluidos que se pueden considerar como supercríticos son el agua, el dióxido de carbono, el amoníaco y el hexano (Esquível & Bernardo, 1993).

El agua por encima de su temperatura y presión crítica (374°C, 22 MPa) tiene especial importancia en la conversión de la biomasa debido a que, los enlaces de hidrógeno por molécula de agua disminuyen gradualmente a medida que el proceso avanza hacia las condiciones supercríticas, convirtiéndose en un buen disolvente para las moléculas orgánicas (Akgül, 2014).

## **Conversión biológica**

### *Digestión anaerobia*

La digestión anaerobia es un proceso biológico que sucede de forma natural o artificial donde la materia orgánica se degrada en ausencia de oxígeno para producir principalmente biogás. La digestión anaerobia por lo general se lleva a cabo en dos sistemas: sistema de digestión convencional de una etapa (Figura 1) y de dos etapas (Figura 2) (Nallathambi Gunaseelan, 1997). En el primer sistema (Figura 1), las diferentes transformaciones bioquímicas y reacciones (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis, metanogénesis) se realizan simultáneamente en un mismo reactor de tanque con agitación continua (CSTR por sus siglas en inglés); a diferencia del sistema de dos etapas (Figura 2), donde las transformaciones y reacciones se llevan a

cabo en al menos dos reactores (Vandevivere et al., 2003). La carga de sólidos totales del efluente para la digestión anaerobia debe ser baja (entre 3 % y 8 %) con un máximo de 25 % (Nallathambi Gunaseelan, 1997) para evitar que disminuya la movilidad de los microorganismos y su contacto con

el sustrato. Adicionalmente los sólidos, especialmente los lignocelulósicos, deben recibir un pretratamiento (físico, químico y/o biológico) con el objetivo de hidrolizar los compuestos para que los microorganismos puedan utilizarlos eficientemente.

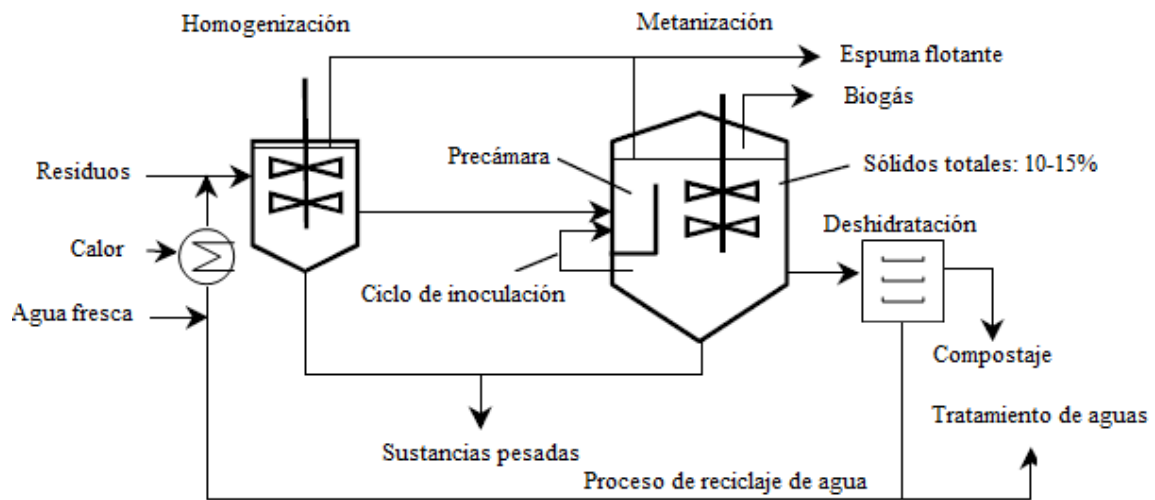


Figura 1. Sistemas de digestores de mezcla completa de una etapa. Adaptado de Vandevivere et al. (2003).

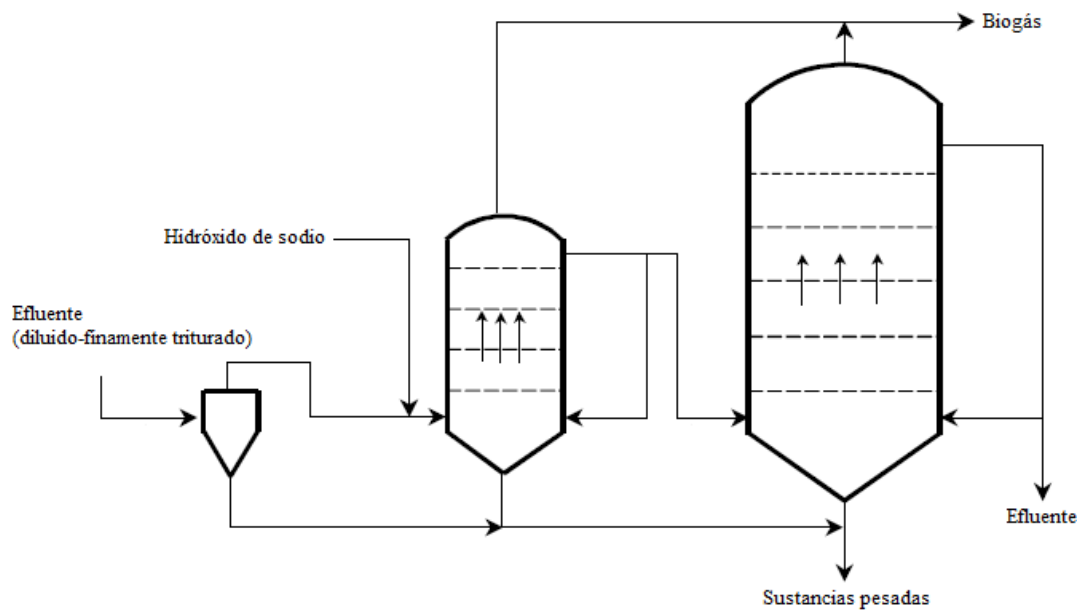


Figura 2. Sistema de digestores de dos etapas. Adaptado de Vandevivere et al. (2003).

### *Enzimólisis*

La enzimólisis es un proceso por medio del cual, la biomasa es transformada en otros productos utilizando enzimas como catalizadores. En este proceso, se proporciona una ruta de reacción alterna con una menor energía de activación. Las enzimas celulíticas (celulasas y hemicelulasas) son las enzimas más importantes en la conversión de la biomasa lignocelulósica, al ser responsables de convertir la celulosa en glucosa y la hemicelulosa en xilosa respectivamente. Las enzimas celulíticas se producen a partir de organismos como bacterias y hongos. Las enzimas celulíticas se pueden dividir en endoglucanasas, exoglucanasas, y  $\beta$ -glucosidasas; todas tienen la capacidad de hidrolizar el enlace 1,4- $\beta$ -glucosídicos entre las moléculas de D-glucosa (Keshk, 2016).

### *Fermentación*

La fermentación es otra vía anaeróbica para descomponer los azúcares obtenidos de la biomasa. Los procesos de fermentación son realizados por células para extraer energía de un compuesto de partida, por ejemplo, glucosa o xilosa, entre otros. Los procesos de fermentación ocurren en ambientes libres de oxígeno (la ausencia total de oxígeno no es un requisito estricto para que ocurra la fermentación, pero el oxígeno no está involucrado en las reacciones químicas) (Godbey, 2014). Los procesos de fermentación poseen las siguientes características: producen energía, no consumen oxígeno, el proceso no modifica la relación NADH/NAD<sup>+</sup> y la relación de hidrógeno a carbono no cambia entre el reactivo y el producto (Godbey, 2014). La

fermentación es el proceso más utilizado para la producción de bioetanol.

### **Discusión**

El plátano es cultivado en diferentes zonas agrícolas desde el nivel del mar hasta los 2.000 metros de altura y dentro de un rango de temperatura de 17°C a 35°C (Ministerio de Agricultura, 2005). La producción del plátano comienza aproximadamente a los 18 meses después de la siembra (Norton et al., 2017). En Colombia el plátano está principalmente orientado al mercado interno, pero también representa la segunda exportación después del banano. Entre enero y abril del año 2018 se exportaron 45.418 t de plátano fresco (DANE, 2020). El mercado nacional se abastece principalmente con los clones de plátano Dominico, Dominico-Hartón y Hartón, entre otros (Cayón et al., 2000; Ministerio de Agricultura, 2005). Entre las variedades de mayor interés económico en Colombia está el clon Dominico-Hartón (*Musa AAB Simmonds*), el cual es uno de los más cultivados para la alimentación humana (Belalcázar, 1992; Cayón et al., 2000).

La composición de los residuos de algunas musáceas es presentada en la Tabla 3. Se resalta de esta información el alto contenido de humedad y almidón que poseen estos residuos. El contenido excesivo de agua puede representar un inconveniente para su aprovechamiento debido a la dispersión de los compuestos de interés como carbohidratos, grasas, proteínas y minerales. En este sentido, es necesario extraer agua para concentrar los compuestos y generar un aprovechamiento eficiente.

**Tabla 3.** Composición de algunas variedades de musáceas.

Composición	Tallo floral	Vainas foliares	Cáscara	Pulpa	Raquis
Humedad	92,9 <sup>a</sup>	91,7 <sup>a</sup>	87,16 <sup>c</sup> -86,0 <sup>d</sup>	73,5 <sup>e</sup> -60,5 <sup>f</sup>	93,5 <sup>a</sup>
Proteína total	3,20 <sup>a</sup>	1,90 <sup>a</sup>	10,29 <sup>d</sup>	1,0 <sup>e</sup> -0,9 <sup>f</sup>	2,00 <sup>a</sup>
Grasa/Extractivos	17,6 <sup>a</sup>	12,6 <sup>a</sup> -8,1 <sup>b</sup>	5,02 <sup>d</sup>	0,5 <sup>f</sup>	17,6 <sup>a</sup>
Celulosa	15,70 <sup>a</sup>	37,30 <sup>a</sup> -40,2 <sup>b</sup>	13,1 <sup>d</sup>	0,38 <sup>e</sup>	31,00 <sup>a</sup>
Hemicelulosa	5,90 <sup>a</sup>	12,60 <sup>a</sup> -25 <sup>b</sup>	4,61 <sup>d</sup>	1,61 <sup>e</sup>	9,50 <sup>a</sup>
Lignina	10,70 <sup>a</sup>	13,30 <sup>a</sup> -12,7 <sup>b</sup>	1,71 <sup>d</sup>	0,04 <sup>e</sup>	10,50 <sup>a</sup>
Almidón	26,30 <sup>a</sup>	8,40 <sup>a</sup>	29,0 <sup>c</sup> -39,29 <sup>d</sup>	20,7 <sup>e</sup> -84,0 <sup>f</sup>	1,40 <sup>a</sup>
Otros carbohidratos	NR	NR	37,64 <sup>d</sup>	NR	NR
Ceniza:	26,1 <sup>a</sup>	19,0 <sup>a</sup> -14,6 <sup>b</sup>	12,7 <sup>d</sup>	0,9 <sup>e</sup>	26,8 <sup>a</sup>
Sílice	7,80 <sup>a</sup>	2,70 <sup>a</sup>	NR	NR	1,20 <sup>a</sup>
Calcio	0,60 <sup>a</sup>	5,50 <sup>a</sup>	0,12 <sup>h</sup>	0,724 <sup>g</sup>	0,60 <sup>a</sup>
Fósforo	0,70 <sup>a</sup>	0,90 <sup>a</sup>	0,15 <sup>h</sup>	0,60 <sup>i</sup>	1,70 <sup>a</sup>
Potasio	23,10 <sup>a</sup>	21,40 <sup>a</sup>	9,32 <sup>i</sup>	38,0 <sup>g</sup>	28,00 <sup>a</sup>
Magnesio	0,50	1,90 <sup>a</sup>	0,01 <sup>h</sup>	0,46 <sup>g</sup>	0,30 <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Dwarf Cavendish, <sup>bcd</sup>*Musa acuminata*, <sup>e</sup>Cavendish valery, <sup>f</sup>Dominico Hartón, <sup>ghi</sup>*Musa paradisiaca*. NR: no reporta.

**Fuente:** <sup>a</sup>Oliveira et al. (2007), <sup>b</sup>Cordeiro et al. (2004), <sup>c</sup>Hernández et al. (2017), <sup>d</sup>Agama et al. (2015), <sup>e</sup>Kayisu et al. (1981), <sup>f</sup>Chávez et al. (2017), <sup>g</sup>Ekpete et al. (2013), <sup>h</sup>Okareh et al. (2015), <sup>i</sup>Okorie et al. (2015).

De acuerdo con las características de los procesos de transformación mencionadas en este trabajo en las secciones anteriores, las tecnologías que más se ajustan al aprovechamiento de los residuos de la agroindustria del plátano son los procesos físicos y biológicos. La conversión física permite la transformación de los residuos de plátano por medio de operaciones mecánicas en productos que conservan las propiedades químicas del material original y sus compuestos. Por otra parte, la conversión biológica permite por medio de la acción de diferentes tipos de microorganismos y/o enzimas que estos compuestos sean transformados en otros con mayor valor biológico (glucosa y xilosa, entre otros).

La conversión física puede aplicarse al aprovechamiento del pseudotallo de plátano para la extracción de fibras (Cadena et al., 2017; Gañán et al., 2008) y para obtener alimentos para animales (producción de bloques nutricionales y ensilaje) (Díaz et al., 2013; Gómez, Sánchez, Teixeira, et al., 2020; Suárez et al., 2018). Por otra parte, la conversión biológica es una alternativa para obtener productos como jarabes de fructosa y glucosa (Gómez, Sánchez, & Correa, 2020; Hernández et al., 2008) y compuestos prebióticos como los derivados de la maltosa (Chockchaisawasdee & Poosaran, 2012; Gómez et al., 2021) y azúcares fermentables para la obtención de bioetanol (Souza et al., 2014) y biogás.

La conversión química puede ser apta para el tratamiento de los residuos de plátano si es utilizada como un método de pretratamiento. Los residuos de plátano poseen un bajo grado de cristalinidad de la celulosa (16%) (Daza et al., 2016); esto puede influir positivamente, debido a que con cantidades mínimas de ácido se puede hidrolizar la hemicelulosa y en menor proporción, la celulosa; generando en mínima cantidad, compuestos inhibidores (hidroximetilfurfural) (Kadam, 1996).

Por otra parte, la conversión termoquímica puede ser no muy adecuada para el aprovechamiento de los residuos de

plátano debido a las altas temperaturas del proceso. En este sentido, la baja cristalinidad de la matriz del residuo puede ser un factor que acelere la oxidación por completo de la biomasa a dióxido de carbono y agua. Adicionalmente, los procesos termoquímicos requieren biomasa con bajo contenido de humedad (Demirbaş, 2009) y los residuos de plátano poseen un alto contenido de agua.

Diferentes antecedentes investigativos de los residuos de las musáceas se muestran en la Tabla 4. Estos antecedentes permiten visualizar el potencial uso de los residuos en biorrefinerías (Gómez et al., 2019).

**Tabla 4.** Antecedentes investigativos sobre residuos de musáceas.

Residuo utilizado	Producto	Observaciones	Referencia
Cáscara	Almidón	Extracción de almidón del 29% (5,7 g/150 g materia seca)	Hernández et al. (2017)
Pseudotallo	Fibras de refuerzo	La resistencia a la flexión del poliéster mejoró en un 28%. Índice de cristalinidad de las fibras del 61,3%	Cadena et al. (2017)
Cáscara	Pectina	Cantidad de pectina extraída del 14,6% del residuo	Happi et al. (2008)
Plátano	Proteína unicelular ( <i>Candida</i> sp.)	Producción de proteína cruda del 8,5%	Adoki (2008)
Cáscara	Etanol Biogás	Producción de 0,289 L alcohol/kg materia seca. 357 mL CH <sub>4</sub> /g materia seca	Miezah et al. (2017)
Cáscara	β-amilasa ( <i>A. niger</i> )	Actividad enzimática β-amilasa de 33,2	Adeniran et al. (2010)
Cáscara	Biogás	Producción de 208 a 303 mL CH <sub>4</sub> /g material seca	Awedem et al. (2017)
Cáscara	Carbón activado	Producción del 46,5% y con un poder calorífico de 19,8 MJ/kg	Ogunjobi and Lajide (2015)
Pseudotallo	Fibra de refuerzo	Fuerza específica de la fibra 0,47 N/tex, comparable con la de yute o cáñamo	Gañán et al. (2008)
Cáscara	Carbón activado	Absorción de iones de metales pesados en un 98,56%	Oluyemi et al. (2009)

Residuo utilizado	Producto	Observaciones	Referencia
Cáscara	Adsorbente	Capacidad de adsorción de 2,6-diclorofenol de 14,25 mg/g	Agarry et al. (2013)
Cáscara	Carbón activado	Capacidad de adsorción en el sistema binario de plomo (II) y azul de metileno de 300 mg/dm <sup>3</sup>	Inam et al. (2016)
Pseudotallo	Etanol	Producción del 21,7% de alcohol (p/v)	Amadi et al. (2018)
Cáscara	Fructosiltransferasa	Máxima actividad enzimática de 27,77 U/g	Lateef et al. (2012)
Cáscara	Resina polifenólica	Retención de plomo, níquel y cromo de 79,01, 98,48% y 94,14% respectivamente	Cordero et al. (2015)
Pseudotallo	Acetato de celulosa	Producción de di-acetato del 39% y de tri-acetato del 38,7%	Israel et al. (2008)

Fuente: Elaborado por los autores, Tex: Unidad de medida de la industria textil.

En este sentido, los procesos de conversión físicos y biológicos orientados al aprovechamiento de los residuos de la agroindustria del plátano deben ser evaluados desde el contexto de las biorrefinerías como

proyectos sostenibles (El-Halwagi, 2012; Sikdar, 2003). Una propuesta de biorrefinería para el aprovechamiento de los residuos de la agroindustria del plátano se muestra en la Figura 3.

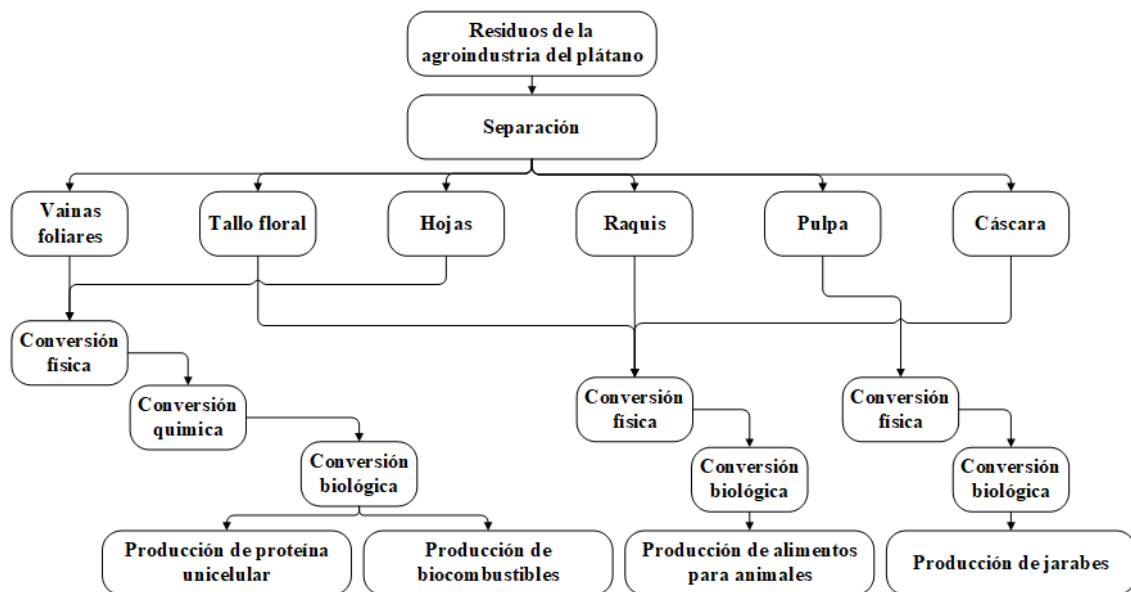


Figura 3. Potenciales usos de los residuos de la agroindustria del plátano.



En la propuesta de la biorrefinería (Figura 3), se observa cómo los residuos son inicialmente separados (manual o mecánicamente) en grupos de acuerdo a las características composicionales de la biomasa. Los residuos que poseen una mayor cantidad de material lignocelulósico son enviados a procesos físicos de conversión donde su tamaño y/o cantidad de agua son reducidos. Seguido, los residuos son enviados a procesos de conversión biológica donde son tratados con enzimas o microorganismos para obtener productos como proteína unicelular, biocombustibles y alimentos para animales. De otro lado, los residuos que posean una mayor cantidad de almidón son reducidos de tamaño y enviados a procesos biológicos de conversión para la obtención de jarabes. Esta opción de biorrefinería (Figura 3) puede aprovechar de una mejor forma los residuos de la agroindustria del plátano debido a que los procesos que conforman el sistema pueden ser transversales, permitiendo optimizar las cantidades que ingresan a cada proceso y recuperar las corrientes residuales de unos procesos para ser aprovechados en otros.

### Conclusiones

Existen diferentes procesos de transformación para la biomasa residual aplicables al aprovechamiento de los residuos de la agroindustria del plátano de acuerdo con su composición. Los residuos de la agroindustria del plátano representan un potencial para la producción de proteína unicelular, biocombustibles, alimentos para animales y jarabes. Es necesario llevar estos procesos al diseño conceptual para

desarrollar y evaluar tecno-económica, ambiental y socialmente, estructuras integrales que se alineen con el desarrollo sostenible de los procesos.

### Agradecimientos

Los autores agradecen por el soporte financiero para el desarrollo de este trabajo al Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación de Colombia (Minciencias) a través del proyecto de investigación convocatoria 757 Doctorado Nacional: Diseño de una Biorrefinería para el Aprovechamiento de los Residuos Lignocelulósicos y Amiláceos de la Agroindustria del Plátano (código 1640318); y a la Universidad de Caldas a través del proyecto de investigación: Desarrollo Básico de Procesos de Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales y Urbanos Bajo el Concepto de Biorrefinerías (Código 0240518).

### Referencias

- Abedi, A., & Dalai, A. (2017). Study on the quality of oat hull fuel pellets using bio-additives. *Biomass and Bioenergy*, 106, 166-175. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.08.024>
- Adeniran, H., Abiose, S., & Ogunsua, A. (2010). Production of fungal  $\beta$ -amylase and amyloglucosidase on some Nigerian agricultural residues. *Food and Bioprocess Technology*, 3(5), 693-698. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11947-008-0141-3>
- Adoki, A. (2008). Factors affecting yeast growth and protein yield production

- from orange, plantain and banana wastes processing residues using *Candida* sp. African Journal of Biotechnology, 7(3), 290-295. <https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/58406/46750>
- Agama, E., Sañudo, J., Vélez De La Rocha, R., González, G., & Bello, L. (2015). Potential of plantain peels flour (*Musa paradisiaca* L.) as a source of dietary fiber and antioxidant compound. CyTA—Journal of Food, 14(1), 117-123. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/19476337.2015.1055306>
- Agarry, S., Owabor, C., & Ajani, A. (2013). Modified plantain peel as cellulose-based low-cost adsorbent for the removal of 2,6-dichlorophenol from aqueous solution: adsorption isotherms, kinetic modeling, and thermodynamic studies. Chemical Engineering Communications, 200(8), 1121-1147. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/00986445.2012.740534>
- Akgül, G. (2014). Supercritical conversion of biomass. In A. Hornung (Ed.), Transformation of Biomass (pp. 189-202). John Wiley & Sons.
- Amadi, P., Ifeanacho, M., & Agomuo, E. (2018). The effects of different heating periods and exclusion of some fermentation conditions on bioethanol production from plantain pseudo-stem waste using the digestive juice of *Archachatina marginata*, garlic and *Saccharomyces cerevisiae*. Biofuels, 9(4), 531-539. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1292018>
- Arango, J., Collazos, C., Gutiérrez Vela, F., & Castillo, L. (2017). A systematic review of geolocated pervasive games: A perspective from game development methodologies, software metrics and linked open data. Design, User Experience, and Usability: Designing Pleasurable Experiences, Vancouver.
- Awedem, F., Happi, T., Fokou, E., Boda, M., Gillet, S., Deleu, M., Richel, A., & Gerin, P. (2017). Comparative biochemical methane potential of some varieties of residual banana biomass and renewable energy potential. Biomass Conversion and Biorefinery, 7(2), 167-177. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13399-016-0222-x>
- Balat, M. (2011). Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. Energy Conversion and Management, 52(2), 858-875. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.08.013>
- Belalcázar, S. (1992). El cultivo del plátano (*Musa AAB* Simmonds) en el trópico (The cultivation of plantain (*Musa AAB* Simmonds) in the tropics, in Spanish). Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/12434>
- Binder, J., & Raines, R. (2010). Fermentable sugars by chemical hydrolysis of biomass. Proceedings of the National Academy of Sciences, 107(10), 4516-

4521. <https://doi.org/https://doi.org/10.1073/pnas.0912073107>
- Binod, P., & Pandey, A. (2015). Pretreatment of Biomass. In A. Pandey, S. Negi, P. Binod, & C. Larroche (Eds.), *Pretreatment of Biomass. Processes and Technologies* (pp. 7-25). Elsevier.
- Biswas, B., Singh, R., Kumar, J., Singh, R., Gupta, P., Krishna, B., & Bhaskar, T. (2018). Pyrolysis behavior of rice straw under carbon dioxide for production of bio-oil. *Renewable Energy*, 129(B). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.048>
- Blanco, G., Linares, B., Hernández, J., Maselli, A., Rincón, A., Ortega, R., Medina, E., Hernández, L., & Morillo, J. (2013). Caracterización química de lixiviados de pseudotallos y láminas foliares de plátano “Hartón” en el estado Yaracuy (Chemical characterization of leachates pseudostems and leaf blades of ‘Harton’ plantain in Yaracuy state, in Spanish). *Agronomía Tropical*, 63, 121-134. <https://dialnet.unirioja.es/ejemplar/459991>
- Brown, R. (2006). Biomass Refineries Based on Hybrid Thermochemical-Biological Processing – An Overview. In B. Kamm, P. Gruber, & M. Kamm (Eds.), *Biorefineries-Industrial Processes and Products: Status Quo and Future Directions* (Vol. 1, pp. 227-252). WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.
- Cadena, E., Vélez, M., Santa, J., & Otálvaro, V. (2017). Natural fibers from plantain pseudostem (*Musa paradisiaca*) for use in fiber-reinforced composites. *Journal of Natural Fibers*, 14(5), 678-690. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/15440478.2016.1266295>
- Carrasco, J. (2007). Combustión directa de la biomasa (Direct combustion of biomass, in Spanish). Escuela de Organización Industrial (EOI). [http://api.eoi.es/api\\_v1\\_dev.php/fedora/asset/eoi:45279/componente45278.pdf](http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45279/componente45278.pdf)
- Cayón, D., Giraldo, G., & Arcila, M. (2000). Postcosecha y Agroindustria del Plátano en el Eje Cafetero de Colombia (Post-harvest and Agribusiness of Plantain in the Coffee Region of Colombia, in Spanish). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). Universidad del Quindío.
- Chávez, A., Bello, L., Agama, E., Castellanos, F., Álvarez, C., & Pacheco, G. (2017). Isolation and partial characterization of starch from banana cultivars grown in Colombia. *International Journal of Biological Macromolecules*, 98, 240-246. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.01.024>
- Chen, H. (2014). *Biotechnology of Lignocellulose. Theory and Practice*. Chemical Industry Press and Springer.
- Chen, W., Chen, Y., Yang, H., Li, K., Chen, X., & Chen, H. (2018). Investigation on biomass nitrogen-enriched pyrolysis: Influence of temperature. *Bioresource Technology*, 249(Supplement C), 247-253. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.10.022>

- Chockchaisawasdee, S., & Poosaran, N. (2012). Production of isomaltooligosaccharides from banana flour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(1), 180-186. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jsfa.5747>
- Clements, L., & Van Dyne, D. (2006). The Lignocellulosic Biorefinery. A Strategy for Returning to a Sustainable Source of Fuels and Industrial Organic Chemicals. In B. Kamm, P. Gruber, & M. Kamm (Eds.), *Biorefineries-Industrial Processes and Products: Status Quo and Future Directions* (Vol. 1, pp. 115-128). WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.
- Cordeiro, N., Belgacem, M., Torres, I., & Moura, J. (2004). Chemical composition and pulping of banana pseudo-stems. *Industrial Crops and Products*, 19(2), 147-154. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2003.09.001>
- Cordero, A., Gómez, M., & Castillo, J. (2015). Polyphenolic resin synthesis: Optimizing plantain peel biomass as heavy metal adsorbent. *Polímeros*, 25, 351-355. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.1529>
- DANE. (2020). Comercio Internacional (Commerce International, in Spanish). Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Recuperado May 21, 2020, de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/comercio-internacional/importaciones>
- Daza, L., Solarte, J., Serna, S., Chacon, Y., & Cardona, C. (2016). Agricultural waste management through energy producing biorefineries: The colombian case. *Waste and Biomass Valorization*, 7(4), 789-798. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12649-016-9576-3>
- Dell'Antonia, D. (2007). Biomass combustion. Overview of key Technologies-benchmarking and potentials. *Smart Energy*. <http://smartenergyproject.eu/services-for-you/project-documents/technology-analysis-biomass-combustion-de/>
- Demirbaş, A. (2000). Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reactions of biomass. *Energy Conversion and Management*, 41(6), 633-646. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00130-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00130-2)
- Demirbaş, A. (2007). Combustion of biomass. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 29(6), 549-561. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/009083190957694>
- Demirbaş, A. (2009). *Biofuels. Securing the Planet's Future Energy Needs*. Springer.
- Díaz, B., Elías, A., & Valiño, E. (2013). Nutritional and economical efficiency of three biosilages from agroindustrial wastes in beef cattle. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 47(2), 143-150. <http://cjascience.com/index.php/CJAS/article/view/313>

- Dirbeba, M., Brink, A., DeMartini, N., Zevenhoven, M., & Hupa, M. (2017). Potential for thermochemical conversion of biomass residues from the integrated sugar-ethanol process – Fate of ash and ash-forming elements. *Bioresource Technology*, 234, 188-197. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.021>
- Ekpete, O., Edori, O., & Fubara, E. (2013). Proximate and mineral composition of some Nigerian fruits. *British Journal of Applied Science & Technology*, 3(4), 1447-1454. <https://doi.org/https://doi.org/10.9734/BJAST/2014/4431>
- El-Halwagi, M. (2012). *Sustainable Design Through Process Integration. Fundamentals and Applications to Industrial Pollution Prevention, Resource Conservation, and Profitability Enhancement*. Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-744-3.00001-1>
- Esquivel, M., & Bernardo, M. (1993). El uso de fluidos supercríticos en la industria de aceites alimentarios (The use of supercritical fluids en the edible oil industry, in Spanish). *Grasas y Aceites*, 44(1), 1-5. <https://doi.org/https://doi.org/10.3989/gya.1993.v44.i1>
- Eufrade, H., Tami, G., Minoru, F., Guerra, S., & Wagner, A. (2017). Eucalyptus short-rotation coppice for solid fuel production. *Industrial Crops and Products*, 108(Supplement C), 636-640. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.07.025>
- Gañán, P., Zuluaga, R., Restrepo, A., Labidi, J., & Mondragon, I. (2008). Plantain fibre bundles isolated from Colombian agro-industrial residues. *Bioresource Technology*, 99(3), 486-491. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.012>
- Gírio, F., Marques, S., Pinto, F., Oliveira, A., Costa, P., Reis, A., & Moura, P. (2017). Biorefineries in the World. In M. Rabaçal, A. Ferreira, C. Silva, & M. Costa (Eds.), *Biorefineries. Targeting Energy, High Value Products and Waste Valorisation* (pp. 227-278). Springer.
- Godbey, W. (2014). Chapter 16–Fermentation, Beer, and Biofuels. In W. Godbey (Ed.), *An Introduction to Biotechnology* (pp. 331-351). Woodhead Publishing.
- Gómez, J., Pino, E., Abrunhosa, L., Matallana, L., Sánchez, Ó., Teixeira, J., & Nobre, C. (2021). Valorisation of rejected unripe plantain fruits of *Musa AAB* Simmonds: from nutritional characterisation to the conceptual process design for prebiotic production. *Food & Function*, 12, 3009-3021. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1039/DOF003379K>
- Gómez, J., Sánchez, Ó., & Correa, L. (2020). Techno-economic and environmental evaluation of cheesemaking waste valorization through process simulation using SuperPro Designer. *Waste and Biomass Valorization*,



- 11(11), 6025-6045. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12649-019-00833-4>
- Gómez, J., Sánchez, Ó., & Matallana, L. (2019). Residuos urbanos, agrícolas y pecuarios en el contexto de las biorrefinerías (Urban, agricultural and livestock waste in the context of biorefineries, in Spanish). *Revista Facultad de Ingeniería*, 28(53), 7-32. <https://doi.org/https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n53.2019.9705>
- Gómez, J., Sánchez, Ó., Teixeira, J., & Nobre, C. (2020). *Silage production from the residues of plantain (Musa AAB Simmonds): A nutritional analysis through process simulation* 11th International Conference on Simulation and Modelling in the Food and Bio-industry, Ghent, Belgium.
- Happi, T., Robert, C., Ronkart, S., Wathelet, B., & Paquot, M. (2008). Dietary fibre components and pectin chemical features of peels during ripening in banana and plantain varieties. *Bioresource Technology*, 99(10), 4346-4354. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.08.030>
- Hardi, F., Mäkelä, M., & Yoshikawa, K. (2017). Non-catalytic hydrothermal liquefaction of pine sawdust using experimental design: Material balances and products analysis. *Applied Energy*, 204(Supplement C), 1026-1034. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.033>
- Haverly, M., Schulz, T., Whitmer, L., Friend, A., Funkhouser, J., Smith, R., Young, M., & Brown, R. (2018). Continuous solvent liquefaction of biomass in a hydrocarbon solvent. *Fuel*, 211(Supplement C), 291-300. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.072>
- Hazeltine, B. (2003). Overview. In B. Hazeltine & C. Bull (Eds.), *Field Guide to Appropriate Technology* (pp. 1-16). Academic Press.
- Hernández, F., Morales, Y., Lambis, H., & Pasqualino, J. (2017). Starch extraction potential from plantain peel wastes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(5), 4980-4985. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.09.034>
- Hernández, J., Rodríguez, S., & Bello, L. (2008). Obtención de jarabe fructosado a partir de almidón de plátano (*Musa paradisiaca* L). Caracterización parcial (Obtention of fructose syrup from plantain (*Musa paradisiaca* L.) Starch. Partial characterization, in Spanish). *Interciencia*, 33(5), 372-376. [http://www.scielo.org/ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0378-18442008000500011](http://www.scielo.org/ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442008000500011)
- Norma Técnica Colombiana 1190. Plátanos– Clasificación (Colombian Technical Standard 1190. Bananas–Clasificación, in Spanish), 5 (1976).
- IEA Bioenergy. (2009). Task 42. Biorefineries: Adding value to the sustainable utilisation of biomasa. The



- International Energy Agency (IEA). <http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/Task-42-Booklet.pdf>
- IEA Bioenergy. (2012). Task 42. Bio-based chemicals: Value added products from biorefineries. The International Energy Agency (IEA). <http://www.ieabioenergy.com/publications/bio-based-chemicals-value-added-products-from-biorefineries/>
- Inam, E., Etim, U., Akpabio, E., & Umoren, S. (2016). Simultaneous adsorption of lead (II) and 3,7-Bis(dimethylamino)-phenothiazin-5-ium chloride from aqueous solution by activated carbon prepared from plantain peels. *Desalination and Water Treatment*, 57(14), 6540-6553. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1010236>
- Isemin, R., Mikhalev, A., Klimov, D., Grammelis, P., Margaritis, N., Kourkoumpas, D., & Zaichenko, V. (2017). Torrefaction and combustion of pellets made of a mixture of coal sludge and straw. *Fuel*, 210(Supplement C), 859-865. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.032>
- Israel, A., Obot, I., Umoren, S., Mkpennie, V., & Asuquo, J. (2008). Production of cellulosic polymers from agricultural wastes, . *E-Journal of Chemistry*, 5(1), 81-85. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2008/436356>
- Jasiūnas, L., Pedersen, T., Toor, S., & Rosendahl, L. (2017). Biocrude production via supercritical hydrothermal co-liquefaction of spent mushroom compost and aspen wood sawdust. *Renewable Energy*, 111(Supplement C), 392-398. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.019>
- Jeremiáš, M., Pohořelý, M., Svoboda, K., Manovic, V., Anthony, E., Skoblia, S., Beňo, Z., & Šyc, M. (2017). Gasification of biomass with CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O mixtures in a catalytic fluidised bed. *Fuel*, 210(Supplement C), 605-610. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.006>
- Julio, R., Albet, J., Vialle, C., Vaca, C., & Sablayrolles, C. (2017). Sustainable design of biorefinery processes: existing practices and new methodology. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 11(2), 373-395. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/bbb.1749>
- Juturu, V., & Wu, J. (2014). Microbial cellulases: Engineering, production and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 188-203. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.077>
- Kadam, K. (1996). Cellulase Production. In C. Wyman (Ed.), *Handbook on Bioethanol: Production and Utilization* (pp. 213-252). CRC Press.
- Karimi, K., & Taherzadeh, M. (2016). A critical review of analytical methods in pretreatment of lignocelluloses: Composition, imaging, and crystallinity. *Bioresource Technology*,

- 200, 1008-1018. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.11.022>
- Kayisu, K., Hood, L., & Van Soest, P. (1981). Characterization of starch and fiber of banana fruit. *Journal of Food Science*, 46(6), 1885-1890. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1981.tb04511.x>
- Keshk, S. (2016). Cellulase application in Enzymatic Hydrolysis of Biomass. In V. Gupta (Ed.), *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering* (pp. 185-191). Elsevier.
- Kong, L., Tian, S., He, C., Du, C., Tu, Y., & Xiong, Y. (2012). Effect of waste wrapping paper fiber as a “solid bridge” on physical characteristics of biomass pellets made from wood sawdust. *Applied Energy*, 98, 33-39. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.068>
- Kumar, P., Barrett, D., Delwiche, M., & Stroeve, P. (2009). Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(8), 3713-3729. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/ie801542g>
- Lateef, A., Oloke, J., Gueguim, E., & Raimi, O. (2012). Production of fructosyltransferase by a local isolate of *Aspergillus niger* in both submerged and solid substrate media. *Acta Alimentaria*, 41(1), 100-117. <https://doi.org/https://doi.org/10.1556/AAlim.41.2012.1.12>
- Lela, B., Barišić, M., & Nižetić, S. (2016). Cardboard/sawdust briquettes as biomass fuel: Physical-mechanical and thermal characteristics. *Waste Management*, 47(Part B), 236-245. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.035>
- Mastuli, M., Kamarulzaman, N., Kasim, M., Sivasangar, S., Saiman, M., & Taufiq-Yap, Y. (2017). Catalytic gasification of oil palm frond biomass in supercritical water using MgO supported Ni, Cu and Zn oxides as catalysts for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(16), 11215-11228. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.174>
- Mazzeo, M., Díaz, F., & Mejía, L. (2015). Aprovechamiento de Residuos de Cosecha y Poscosecha del Plátano (Use of Harvest and Post-harvest Residues of Plantain, in Spanish). Universidad de Caldas.
- Mendiara, T., Pérez, A., Izquierdo, M., Abad, A., de Diego, L., García, F., Gayán, P., & Adánez, J. (2018). Chemical looping combustion of different types of biomass in a 0.5kWth unit. *Fuel*, 211(Supplement C), 868-875. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.113>
- Miezah, K., Obiri, K., Kádár, Z., Heiske, S., Fei, B., Mensah, M., & Meyer, A. (2017). Municipal solid waste management in a low income economy through

- biogas and bioethanol production. *Waste and Biomass Valorization*, 8(1), 115-127. <https://doi.org/http://10.1007/s12649-016-9566-5>
- Ministerio de Agricultura. (2005). La cadena del plátano en Colombia. Una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005 (The plantain chain in Colombia. An overview of its structure and dynamics 1991-2005, in Spanish). Agrocadenas. <http://www.asohofrucol.com.co/archivos/cadenas/platano.pdf>
- Nallathambi Gunaseelan, V. (1997). Anaerobic digestion of biomass for methane production: A review. *Biomass and Bioenergy*, 13(1), 83-114. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(97\)00020-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)00020-2)
- Nasrin, A., Ma, A., Choo, Y., Mohamad, M., Rohaya, A., Azali, A., & Zainal, Z. (2008). Oil palm biomass as potential substitution raw materials for commercial biomass briquettes production. *American Journal of Applied Sciences*, 5(3), 179-183. <https://doi.org/https://doi.org/10.3844/ajassp.2008.179.183>
- Ng, W., You, S., Ling, R., Gin, K., Dai, Y., & Wang, C. (2017). Co-gasification of woody biomass and chicken manure: Syngas production, biochar reutilization, and cost-benefit analysis. *Energy*, 139(Supplement C), 732-742. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.165>
- Norouzi, O., Safari, F., Jafarian, S., Tavasoli, A., & Karimi, A. (2017). Hydrothermal gasification performance of *Enteromorpha intestinalis* as an algal biomass for hydrogen-rich gas production using Ru promoted Fe-Ni/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocatalysts. *Energy Conversion and Management*, 141(Supplement C), 63-71. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.083>
- Norton, R., Angel, M., Argüello, R., Balcázar, A., Martínez, H., Samacá, H., & Turner, A. (2017). The Competitiveness of Tropical Agriculture A Guide to Competitive Potential with Case Studies. Elsevier.
- Nunes, L., Matias, J., & Catalão, J. (2013). Energy recovery from cork industrial waste: Production and characterisation of cork pellets. *Fuel*, 113(Supplement C), 24-30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.052>
- Ogunjobi, J., & Lajide, L. (2015). The potential of cocoa pods and plantain peels as renewable sources in Nigeria. *International Journal of Green Energy*, 12(4), 440-445. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/15435075.2013.848403>
- Okareh, O., Adeolu, A., & Adepoju, O. (2015). Proximate and mineral composition of plantain (*Musa Paradisiaca*) wastes flour; a potential nutrients source in the formulation of animal feeds African Journal of Food Science and Technology 6(2), 53-57. <https://doi.org/https://doi.org/10.4314/ajfs.v6i2.1>

- doi.org/http://dx.doi.org/10.14303/ajfst.2015.015
- Okorie, D., Eleazu, C., & Nwosu, P. (2015). Nutrient and heavy metal composition of plantain (*Musa paradisiaca*) and banana (*Musa paradisiaca*) peels. *Journal of Nutrition & Food Sciences*, 5(3), 1-3. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4172/2155-9600.1000370>
- Oliveira, L., Cordeiro, N., Evtuguin, D., Torres, I., & Silvestre, A. (2007). Chemical composition of different morphological parts from 'Dwarf Cavendish' banana plant and their potential as a non-wood renewable source of natural products. *Industrial Crops and Products*, 26(2), 163-172. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.03.002>
- Oluyemi, E., Oyekunle, J., & Olasoji, S. (2009). A comparative study of the removal of heavy metal ions from synthetic wastewaters using different adsorbents. *Adsorption Science & Technology*, 27(5), 493-501. <https://doi.org/https://doi.org/10.1260/0263-6174.27.5.493>
- Pels, J., de Nie, D., & Kiel, J. (2005). Utilization of ashes from biomass combustion and gasification. 14th European Biomass Conference & Exhibition. <https://www.ecn.nl/publications/PdfFetch.aspx?nr=ECN-RX-05-182>
- Pérez, J., & Muñoz, L. (2014). What can't be ignored in service quality evaluation: Application contexts, tools and factors. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 72, 145-160. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-62302014000300013](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302014000300013)
- Pérez, S., & Samain, D. (2010). Structure and Engineering of Celluloses. In D. Horton (Ed.), *Advances in Carbohydrate Chemistry and Biochemistry* (Vol. 64, pp. 25-116). Elsevier.
- Romallosa, A., & Kraft, E. (2017). Feasibility of biomass briquette production from municipal waste streams by integrating the informal sector in the Philippines. *Resources*, 6(1), 1-19. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/resources6010012>
- Rover, M., Smith, R., & Brown, R. (2018). Enabling biomass combustion and co-firing through the use of Lignocol. *Fuel*, 211(Supplement C), 312-317. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.076>
- Shuma, R., & Madyira, D. (2017). Production of loose biomass briquettes from agricultural and forestry residues. *Procedia Manufacturing*, 7(Supplement C), 98-105. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.026>
- Sikdar, S. (2003). Journey towards sustainable development: A role for chemical engineers. *Environmental Progress*, 22(4), 227-232. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ep.670220409>
- Souza, E., Liebl, G., Marangoni, C., Sellina, N., Montagnoli, M., & Souza, O. (2014).

- Bioethanol from fresh and dried banana plant pseudostem *Chemical Engineering Transactions*, 38, 271-276. <https://doi.org/https://doi.org/10.3303/CET1438046>
- Stolarski, M., Szczukowski, S., Tworkowski, J., Krzyżaniak, M., Gulczyński, P., & Mleczek, M. (2013). Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass. *Renewable Energy*, 57(Supplement C), 20-26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.005>
- Suárez, D., Marín, O., Ortiz, J., Puentes, A., Ballesteros, L., & Suárez, M. (2018). Biotechnology as a tool for the agroindustrial exploitation of residues of the chain of *Musa* spp. *Chemical Engineering Transactions*, 64, 571-576. <https://doi.org/https://doi.org/10.3303/CET1864096>
- Superservicios. (2019). Disposición final de residuos sólidos. Informe nacional 2018 (Final disposal of solid waste. National report 2018, in Spanish). Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (Superservicios). Recuperado November 18, 2019, de <https://www.superservicios.gov.co/publicaciones>
- Vandevivere, P., De Baere, L., & Verstraete, W. (2003). Types of Anaerobic Digesters for Solid Wastes. In J. Mata (Ed.), *Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes* (pp. 31). IWA Publishing.
- Wang, P., Guo, Y., Zhao, C., Yan, J., & Lu, P. (2017). Biomass derived wood ash with amine modification for post-combustion CO<sub>2</sub> capture. *Applied Energy*, 201(Supplement C), 34-44. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.096>
- Yousaf, B., Liu, G., Abbas, Q., Wang, R., Ubaid Ali, M., Ullah, H., Liu, R., & Zhou, C. (2017). Systematic investigation on combustion characteristics and emission-reduction mechanism of potentially toxic elements in biomass- and biochar-coal co-combustion systems. *Applied Energy*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.059>
- Zhan, H., Yin, X., Huang, Y., Yuan, H., & Wu, C. (2017). NO<sub>x</sub> precursors evolving during rapid pyrolysis of lignocellulosic industrial biomass wastes. *Fuel*, 207, 438-448. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.06.046>