

Revista Boliviana de Química 40 años

ISSN 0250-5460 Rev. Bol. Quim. Sep./Oct. 2023 Paper edition
ISSN 2078-3949 Rev. boliv. quim. Sep./Oct. 2023 Electronic edition
Received 02 16 2022 Accepted 10 26 2023 Published 10 30 2023
Revista Boliviana de Química, 40(4), 97-116
Bolivian Journal of Chemistry 40(4), 97-116
DOI: <https://doi.org/10.34098/2078-3949.40.4.2>

PERSPECTIVAS EN LA UTILIZACIÓN DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DE LA CASTAÑA: PROCESOS TERMOQUÍMICOS, REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Review

Peer-reviewed

Gabriela M. Marín M., Rodrigo Surculento Villalobos, Luis Lopez N.*

Instituto de Investigaciones Químicas IIQ, Universidad Mayor de San Andrés UMSA, Av. Villazón N° 1995, La Paz, Bolivia, 0201-0220, iiq@umsa.bo

Keywords: Amazon nut shell, Amazon nut husk, Pyrolysis, Gasification, Hydrothermal liquefaction.

Palabras clave: Cáscara de castaña, Coco de castaña, Castaña, Pirólisis, Gasificación, Licuefacción hidrotermal.

ABSTRACT

Perspectives in the use of waste from the chestnut industry: thermochemical processes, a review.

Commercial technologies for the valorization of Bolivian biomass such as chestnuts were reviewed in the literature. Three technologies showed promise: gasification, pyrolysis and hydrothermal liquefaction. The final products in the three technologies are: solids (biochar), liquids (bio-oil) and gas (synthesis gas), in different proportions. Gasification generates 85% gas, 10% solid and 5% liquid. Pyrolysis generates between 30-75% liquids, 12-35% solids and 13-35% gases. Hydrothermal liquefaction generates between 20-50% biocrude, 40-60% aqueous phase, 10-20% solid phase and less than 5% gas. In the case of gasification, the main focus is energy production. Pyrolytic processes focus on producing bio-oils. In hydrothermal liquefaction processes, the most important product is biocrude. Based on the type of product desired, the physicochemical characteristics of the biomass, the pretreatment stages, the types of reactors to be used, the operating conditions and complementary processes must be considered. All these topics are of great importance when implementing a technology for the conversion of waste from the chestnut industry. *Mail to: llopez@umsa.bo

RESUMEN

Se revisaron en bibliografía tecnologías comerciales para la valorización de biomasa boliviana como la castaña. Tres tecnologías resultaron promisorias: gasificación, pirólisis y licuefacción hidrotermal. Los productos finales en las tres tecnologías son: sólidos (biochar), líquidos (bioaceite) y gas (gas de síntesis), en diferentes proporciones. La gasificación genera 85% de gas, 10% de sólido y 5% líquido. La pirólisis genera entre 30-75% de líquidos, 12-35% de sólidos y 13-35% de gases. La licuefacción hidrotermal genera entre 20-50% de biocrudo, 40-60% de fase acuosa, 10-20% de fase sólida y menos de un 5% de gas. En el caso de la gasificación, el enfoque principal es la producción de energía. Los procesos pirolíticos se enfocan en producir bioaceites. En los procesos de licuefacción hidrotermal, el producto más importante es el biocrudo. En base al tipo de producto deseado se deben considerar las características fisicoquímicas de la biomasa, las etapas de pretratamiento, los tipos de reactores a utilizar, las condiciones de operación y los procesos complementarios. Todos estos tópicos son de gran importancia al momento de implementar una tecnología para la conversión de residuos de la industria castañera.



1. INTRODUCCIÓN

Bolivia es el país con mayor producción de castaña en el mundo, ocupando el primer puesto como país exportador desde el año 2001. En el primer semestre del año 2022 se han exportado casi 14 000 toneladas de castaña por un valor de \$US 104 millones, los cuales fueron un 3% más a la cantidad registrada en el año 2021 para este mismo periodo [1].

De un fruto de castaña aproximadamente el 85 % p/p corresponde a la cáscara (tegumento) y al coco (pericarpio) como residuos generados durante la producción [2] (Ver Figura 5). Son generadas aproximadamente 20 000 toneladas de residuos en un año, a partir de una producción promedio anual de 25 000 toneladas de castaña en Bolivia. Parte de estos residuos son utilizados por las propias empresas productoras para la combustión y generación de energía térmica en sus calderos. Sin embargo, la mayor parte de estos residuos no son aprovechados y son comúnmente abandonados y/o acumulados en campos al aire libre [3]. Esto provoca impactos negativos como la necesidad de disponer de nuevas áreas para la acumulación, y una disminución de la circulación natural de aire y agua hacia el suelo [4].



Figura 1. Residuos de castaña a cielo abierto [5].

Estos residuos de la industria castañera (Figura 1) presentan características en su estructura química potencialmente aprovechables. Mediante procesos termoquímicos, pueden ser transformados en diferentes formas de energía (electricidad) y/o productos con valor agregado (biochar, carbón activado, bioaceite, biodiesel, gasolina, etc., Figura 5). Entre los procesos termoquímicos más utilizados para la conversión de biomasa se tiene la pirólisis, la licuefacción hidrotermal, y la gasificación entre otros [6,7].

En este artículo se evaluarán tecnologías termoquímicas promisorias para la conversión de residuos de la industria castañera en productos finales, se analizarán las características fisicoquímicas de la castaña, los tipos de procesos termoquímicos y los tipos de reactores.

2. LOCALIZACIÓN Y PROPIEDADES DE LOS RESIDUOS DE LA INDUSTRIA CASTAÑERA

Los mayores productores de castaña en Bolivia se localizan principalmente en los departamentos de Beni y Pando (Figura 2), con una densidad de árboles de castaña por hectárea de 5 a 10 árboles en Beni y de 1 a 9 árboles en Pando [8].

La castaña es un árbol nativo de la Amazonía de la especie *Bertholletia excelsa*, Bonpl. de la familia *Lecythidaceae* [9]. El fruto del árbol de castaña es una cápsula esférica maderosa grande denominada coco de castaña, dentro del cual se pueden encontrar de 12 a 24 nueces o semillas. La semilla de castaña consiste de una cáscara externa dura y delgada, y un grano blanco (parte comestible de las semilla) [10].

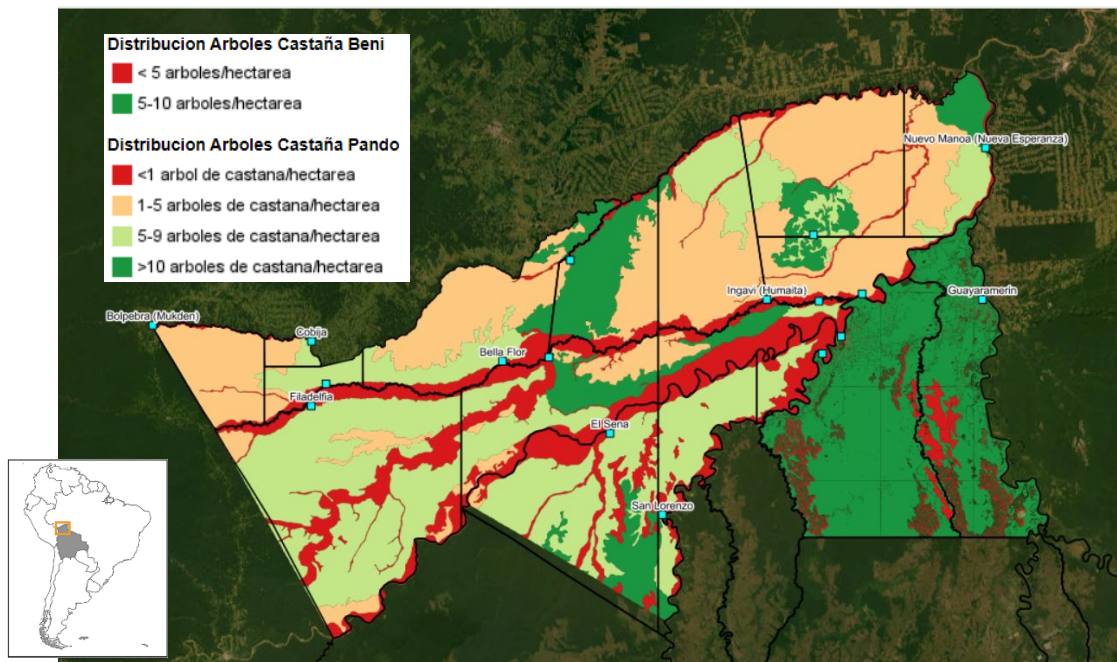


Figura 2. Distribución de árboles de castaña en los Departamento de Beni y Pando en Bolivia [8].



COCO

CÁSCARA

CASTAÑA

a)

b)

c)

d)

e)

Figura 3. Árbol de castaña, la castaña y sus residuos lignocelulósicos [11,12]. Reproducido bajo licencias Creative Commons. a) árbol de castaña, b) fruto de castaña completo, fotografía por C. E. Timothy Paine, c) coco d) cáscara que recubre la castaña, e) castaña

Bolivia reporta una gran cantidad de castañas de exportación como castañas sin cáscara, frescas o secas. Se estima alrededor de 25.144 toneladas de semillas de castaña en el año 2020. Como resultado de este proceso, se genera una gran cantidad de residuos al descascarar las semillas. Una castaña tiene un peso promedio total de 480 g, de los cuales, el 76 % corresponden al coco, 12 % a la cáscara y 12 % a la semilla. Es decir, que el 88 % p/p de la castaña corresponde a la cáscara y al coco como residuos [12] (ver Figura 5). Estos residuos se utilizan comúnmente para la elaboración de muebles o como combustibles sólidos para la generación de calor [13,14].

La Tabla 1 resume la composición química y análisis proximal de los residuos de castaña (cáscara y coco).

Estos residuos de la industria castañera con altos niveles de lignina, carbón fijo y bajos contenidos de cenizas demuestran un potencial para quema directa, y a su vez, para la generación de energía, carbón vegetal, carbón activado y biochar [15]. Las características mostradas en la Tabla 1 le dan a la cáscara de castaña la capacidad de obtener un carbón con cualidades energéticas de valores aproximados de 29.7 MJ/Kg (Mega Joules por kg) para el



40 años



poder calorífico superior (PCS), 28.9 MJ/Kg para el poder calorífico inferior (PCI) y 28.8 MJ/Kg para el poder calorífico neto [23].

Tabla 1. Composición química y análisis proximal de los residuos de castaña. Los valores reportados son HU: Humedad, CE: Cenizas, MV: Material Volátil, CF: Carbón Fijo, C: Carbono, H: Hidrógeno, N: Nitrógeno, O: Oxígeno, HC: Holoceululosa, HL: Hemicelulosa, CL: Celulosa, LG: Lignina, ET: Extractivos, PCS: Poder Calorífico Superior. Elaboración propia en base a referencias.

Residuo de castaña	HU (%)	CE (%)	MV (%)	CF (%)	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	HC (%)	CL (%)	HL (%)	LG (%)	ET (%)	PCS (MJ/Kg)*	Ref
Residuos	10.6	2.1	65.7	21.6	53.5	5.69	1.6	37.0	37.1			55.8	5.5		[15]
Cáscara		1.7	76.1	22.2	50	5.8	0.7	43.5	48.5			59.4	3.4		[16]
Cáscara	4.3	0.1	54.6	42.5										23.5	[17]
Cáscara	16.6	1.9	76	5.5					37.2			34.6		13.8	[18]
Cáscara		2.2			47.6	5.71		44.5							[19]
Cáscara										53		54			[20]
Cáscara										50.7	28.9	20.4			[21]
Cáscara	14.7														[22]
Cáscara														29.7	[23]
Coco	8.8	11.5	61.4	18.4	43.2	5.09	1.2	50.5						16.4	[24]
Coco	8	3.4	84.6	4					40.5			48.6		14.6	[18]
Coco	9.7	6.2							31.6	15.9	15.7	58.2	2.5		[25]
Coco										38.2		35.8			[20]
Coco	10.3														[22]

*Megajoules per kilogram

Estos valores de poder calorífico superior (PCS) reportados para los residuos de castaña desde 13.8 hasta 29.7 MJ/Kg, son considerados altos respecto a otros tipos de biomasa como la cascarilla de arroz (16.24 MJ/K), paja de trigo (18.9), y eucalipto (19.4 MJ/K) [26]. Por tanto, presentan un gran potencial de aplicación en un proceso de pirólisis para la generación de energía renovable [18].

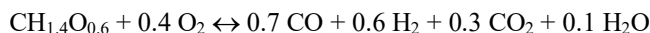
Los valores de poder calorífico superior que se obtienen para la biomasa de residuos agrícolas en literatura generalmente se encuentran en un rango de 15 a 20 MJ/Kg, los cuales, son mucho menores al rango que se obtiene en el carbón que varía desde 22 a 35 MJ/Kg [17]. Por tanto, se puede obtener mayor provecho energético de los residuos agrícolas mediante procesos termoquímicos para la obtención de un biochar con mayores cualidades energéticas.

3. PROCESOS TERMOQUÍMICOS PARA LA CONVERSIÓN DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA CASTAÑERA

“Los procesos de conversión termoquímica utilizan la energía térmica para deshidratar, desvolatilizar, despolimerizar y oxidar parcialmente o completamente los materiales lignocelulósicos para la producción de calor, energía, biocombustibles y otros bioproductos” [27]. Durante los procesos termoquímicos ocurren muchas reacciones químicas complejas, como por ejemplo el craqueo, reformado, hidrogenólisis y desoxigenación [26]. La conversión termoquímica se puede clasificar según la severidad del proceso en: pirólisis, gasificación, combustión y licuefacción hidrotermal [28]. Las variables más relevantes que se estudian en estos procesos son la presión, temperatura, concentración de oxidante, tiempo de residencia para diferentes tipos de biomasa y productos esperados [29,30]. También se evalúan parámetros físicos como el nivel de la tolva, tamaño, forma irregular, rugosidad superficial, humedad, y densidad aparente de las partículas de biomasa en los rendimientos finales [31].

Los tres principales componentes en la estructura química de biomasa lignocelulósica, como en los residuos de castaña son: la celulosa, la hemicelulosa y la lignina, como se puede corroborar en la Tabla 1. Los principales mecanismos de reacción que ocurren en los procesos termoquímicos de gasificación, pirólisis y licuefacción hidrotermal de biomasa lignocelulósica se describen a continuación.

La ecuación que representa el proceso de gasificación de biomasa de manera general es la siguiente:



Donde $\text{CH}_{1.4}\text{O}_{0.6}$ representa una fórmula simplificada para biomasa seca libre de cenizas, y ésta reacciona con el agente oxidante (oxígeno) a altas temperaturas produciendo monóxido de carbono, hidrógeno, dióxido de carbono y vapor de agua [32].

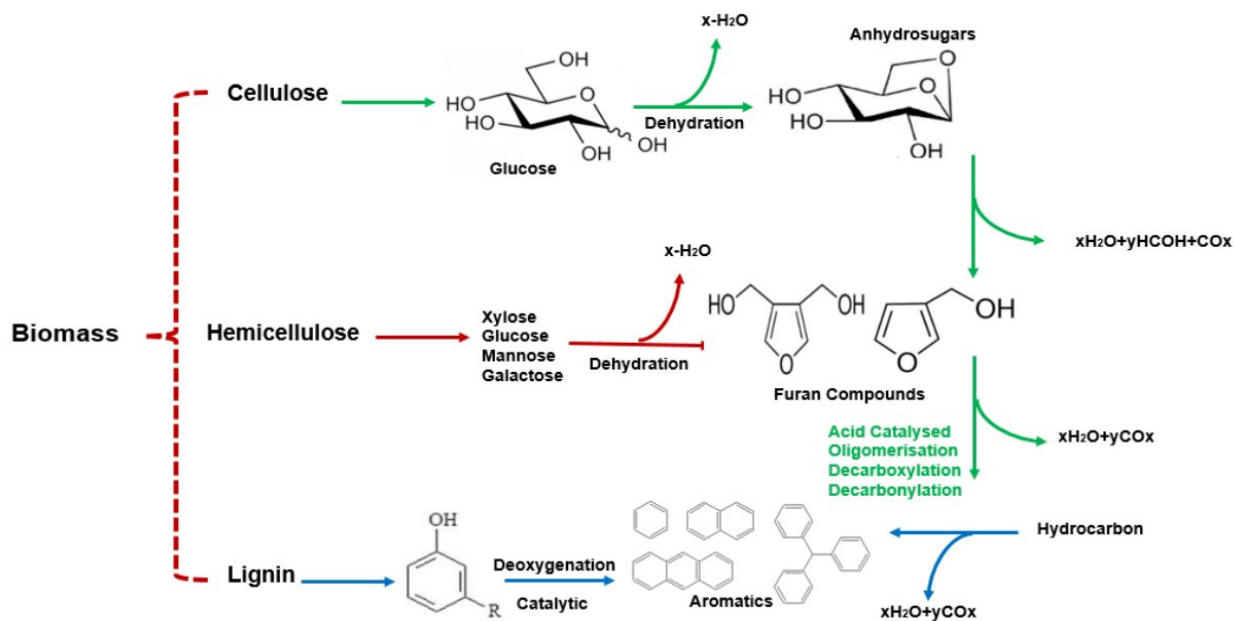


Figura 4. Mecanismo de reacción de biomasa en un proceso pirolítico [33]. Reproducido bajo licencias Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

En la figura 4. se muestra el mecanismo de degradación de biomasa por pirólisis. Los productos de la descomposición de la celulosa son ácidos, alcoholes, azúcares anhidros, biochar y gases. La hemicelulosa que está compuesta de varios azúcares (glucosa, xilosa, manosa, arabinosa y galactosa) se descompone a bajas temperaturas para producir CO_2 y biochar. En cambio, la lignina se descompone principalmente en biochar [33]. Los residuos de castaña están compuestos principalmente de celulosa y lignina. La degradación térmica de la celulosa ocurre de la siguiente manera: debajo de los 300°C , la celulosa se deshidrata y se rompen algunos enlaces de hidrógeno. Entre 300°C y 500°C , la celulosa se degrada en oligosacáridos, ácidos, cetonas, CO_2 , CO y otros productos. Encima de los 500°C , la celulosa pierde oxígeno incrementando la producción de CO , mientras que los oligosacáridos se deshidratan para formar el biochar. Entre 600°C y 800°C , el biochar cambia su estructura a una más cristalina [34]. Por otra parte, la degradación de la lignina comienza aproximadamente a 200°C . Entre $200\text{-}300^\circ\text{C}$, se produce una reacción de [escisión del enlace](#) de la cadena lateral en la lignina, generando gases de moléculas pequeñas como CO y CO_2 y un pequeño número de compuestos aromáticos. Con el aumento de la temperatura, los grupos funcionales reaccionan con unidades de fenilpropano como grupos hidroxilo fenólico, grupos carboxilo y grupos bencilo para formar compuestos fenólicos e hidrocarburos aromáticos. Entre $600\text{-}800^\circ\text{C}$, se forman más estructuras de anillos fusionados en el biochar [34].

En el proceso de licuefacción hidrotermal de biomasa, la celulosa y la hemicelulosa reaccionan con agua a una elevada temperatura. Los enlaces de hidrógeno se rompen y se forman moléculas de glucosa, fructuosa y otras unidades monoméricas. Posteriormente, estos compuestos se degradan a hidrocarburos simples. De manera general, la celulosa y la hemicelulosa se degradan hasta formar ácidos, ésteres alquilo de ácidos grasos, cetonas, aldehídos, furanos, alcoholes y éter, mientras que la lignina se degrada para formar compuestos aromáticos [35].

A continuación, se pueden observar las diferentes rutas que pueden seguir los residuos de la industria castañera (coco y cáscara) para la producción de productos intermedios mediante procesos de conversión termoquímica. A partir de estos productos intermedios (biochar, bioaceite y syngas) se pueden obtener diferentes productos finales de gran valor agregado mediante diferentes técnicas y procedimientos de transformación, como se observa en la Fig. 3.

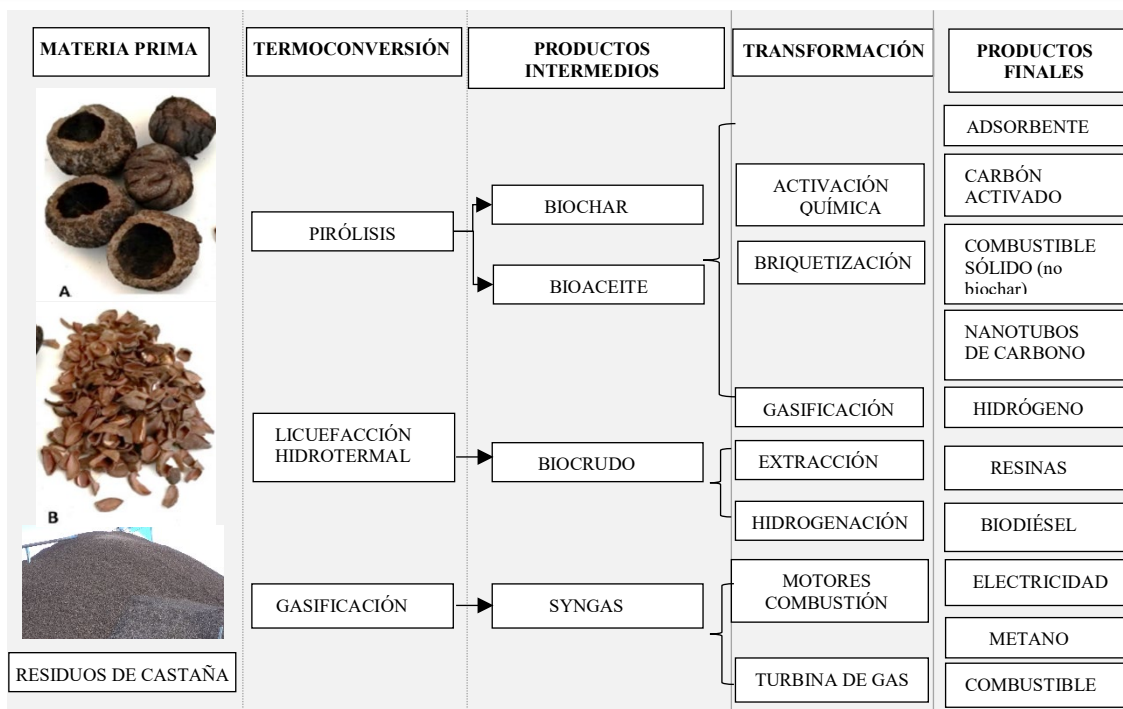


Figura 5. Procesos termoquímicos para la conversión de residuos de castaña en productos de valor agregado. A: Coco de castaña y B: Cáscara de castaña [12]. Elaboración propia en base a referencias [2,19,36,37].

La tabla 2 muestra un resumen de las principales características de cada uno de los procesos mencionados.

Tabla 2. Comparación de los procesos y fracciones de productos de conversión termoquímica. Elaboración propia en base a referencias [36,38]

Proceso	Temperatura (°C)	Presión (Mpa)	Fracción Líquida (%)	Fracción Sólida (%)	Fracción Gas (%)	Catalizador	Secado
Licuefacción	250-330	5-20	20-50	10-20	<5	Esencial	No requiere
Pirólisis	380-530	0.1-0.5	30-75	12-35	13-35	No requiere	Necesario
Combustión	700-1400	>0.1	5	15	80	No requiere	No esencial, pero puede ayudar
Gasificación	500-1300	>0.1	5	10	85	No esencial	Necesario

De estos procesos se puede obtener bioaceite, biochar y syngas. La distribución de estos productos en los procesos depende de las condiciones de operación, el tipo de reactor y las características fisicoquímicas de la materia prima a utilizar. También, se deben tomar en cuenta las etapas de pretratamiento y los procesos posteriores adicionales para transformar los productos de procesos termoquímicos en productos finales.

La conversión de los residuos de castaña mediante estas tres tecnologías produce diferentes productos de interés. Mediante la licuefacción hidrotermal se obtiene principalmente una fracción líquida entre un 20 a 50% para la obtención de biocombustibles como el biodiesel. Según las condiciones de operación, los productos de interés en el proceso de pirólisis son el bioaceite y el biochar. Mientras que, en la tecnología de gasificación, se obtiene principalmente un producto gaseoso con propiedades para la generación de energía eléctrica.

Una ventaja del uso de bioaceite como biocombustible es que éstos generan menos emisiones de SO₂ y NO_x. Esto debido a que la biomasa utilizada en el proceso de obtención de bioaceite contiene una baja cantidad de sulfuro y nitrógeno en comparación a los combustibles de origen fósil [39].

El mayor desafío que se presenta en la conversión termoquímica de los residuos lignocelulósicos en biocombustibles líquidos, es el de obtener un bioaceite con composición similar a las fracciones de petróleo para su uso como combustible líquido de transporte. Una forma de lograr esto es mediante el desarrollo de procesos

catalíticos que modifiquen las propiedades fisicoquímicas del bioaceite para su posterior tratamiento en refinерías de petróleo. También es necesario el desarrollo de nuevos procesos para la conversión directa y sin refinamiento de los bioaceites en biocombustibles [27].

3.1. Tecnología de gasificación para la generación de electricidad (Figura 6)

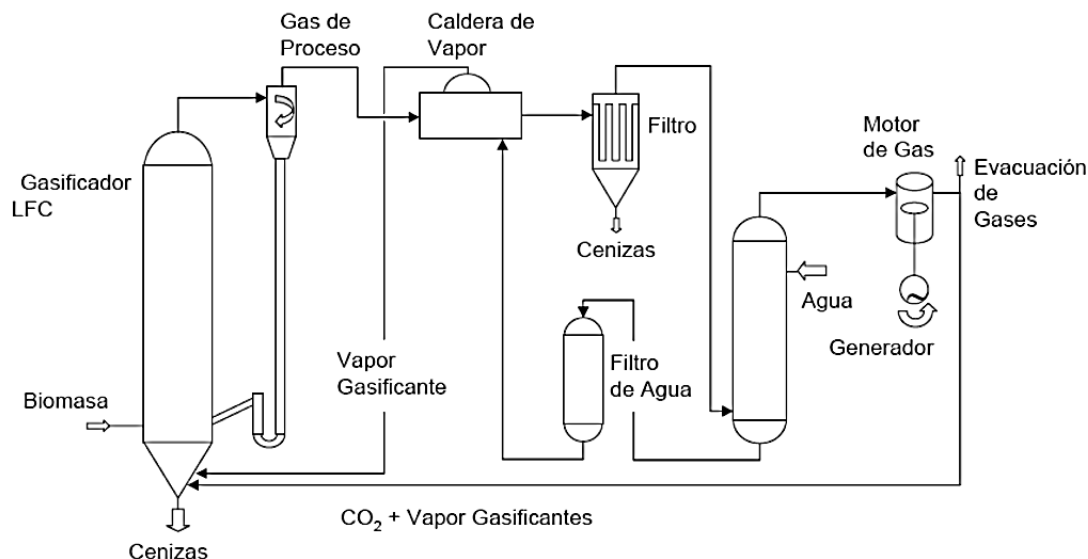


Figura 6. Esquema general de una planta de gasificación [40]. Reproducido bajo licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

A partir de los residuos de castaña se puede obtener un gas de síntesis mediante un proceso de gasificación. La gasificación de biomasa es un proceso de conversión de un material carbonoso en un producto gaseoso conocido como gas de síntesis [41] (Figura 6). Este último está compuesto principalmente de hidrógeno y monóxido de carbono, contiene menores cantidades de dióxido de carbono, agua, metano, hidrocarburos de mayor peso molecular y nitrógeno [42]. El proceso de gasificación se desarrolla en presencia de un agente oxidante (por ejemplo el aire, oxígeno puro o vapor, o mezcla de estos componentes) a elevadas temperaturas entre 500 y 1400 °C, y a presiones atmosféricas elevadas de hasta 33 bares (480 psia) [42]. El proceso de gasificación generalmente involucra cuatro etapas consecutivas: secado, pirólisis, oxidación parcial y reducción.

En la primera etapa de la gasificación la biomasa se somete a un proceso de calentamiento para evaporar parte de la humedad presente en el material. En la siguiente etapa se aplica un aumento de la temperatura del proceso, iniciando así el proceso de pirólisis, es decir, la conversión de la biomasa en volátiles y carbón. Posteriormente, estos productos pasan a una etapa de combustión en la que se suministra un agente oxidante, donde ocurre el craqueo y el reformado de los volátiles y la gasificación del carbón. Finalmente, pasa a una etapa de reducción en la que se obtiene el gas de síntesis [43].

La producción, composición y propiedades del gas producido mediante gasificación varía ampliamente con las propiedades de los flujos de entrada, el tipo de reactor de gasificación empleado, las condiciones de operación y el acondicionamiento de salida de gas. Los flujos de entrada se refieren a las materias primas (tipo y componentes) y al agente gasificante o medio (tipo y flujo del agente gasificante). El acondicionamiento de salida de gas comprende el enfriamiento, y eliminación de partículas y alquitrán en el producto gaseoso [44,45]. Las variables de operación en la gasificación incluyen a la temperatura, presión y el tiempo de residencia. Estas variables se utilizan para controlar las reacciones de gasificación [45].

Los gasificadores se pueden dividir en diferentes tipos, como el de lecho fijo (corriente ascendente y descendente), lecho móvil, lecho fluidizado (burbujeante y circulante) y el gasificador de flujo atrapado (Tabla 3).

Los gasificadores pueden clasificarse en diferentes tipos según la manera en la que la biomasa se soporta en el recipiente del reactor, la dirección del flujo tanto de la biomasa como del agente oxidante, y la manera en la que se suministra el calor al reactor [48]. El posicionamiento de las regiones de distribución de la reacción, es decir, secado, pirólisis, combustión y reducción, en un reactor de lecho fijo difiere según el tipo de gasificador [32]. La elección



entre los gasificadores depende en gran medida de los tipos de biomasa y la matriz de composición de los productos finales.

Tabla 3. Parámetros de operación típicos de los tipos de gasificadores. Elaboración propia en base a referencias [41,46,47]

Reactor	Condiciones de Operación	Características
Lecho fijo	T: 1300 -1800°C P: 0-7 Mpa t: 15-30 min	-Diseño simple y operación sencilla -No se pueden utilizar combustibles líquidos -El requisito de vapor es alto -El gas de síntesis contiene alquitrán y compuestos fenólicos
Lecho fluidizado	T: 800-1200 °C P: 0-7 MPa t: 10-	-Lecho de materiales inertes que funcionan como portadores de calor y mezcladores, mientras que el medio gasificante actúa como gas fluidificante -Capacidad de gasificar materias primas de alta reactividad como combustibles de desecho, biomasa y carbón de bajo rango -Gran capacidad de mezcla -Alta tasa de transferencia de masa y calor -Se puede utilizar catalizadores en el lecho que afectan el reformado de alquitrán -Captura de azufre in situ cuando el contenido es <2% p/p-Es necesario el reciclaje de partículas de carbón para una alta conversión -Requerimiento moderado de vapor -El gas de síntesis no contiene alquitrán ni compuestos fenólicos
Lecho atrapado	T: 1000-1500 °C P: 2-7 Mpa t: 1-10 s	-El agente gasificante (generalmente oxígeno puro) es inyectado en co-corriente. -Utilizado para biomasa donde el alquitrán es un problema serio, el alquitrán es completamente destruido en el proceso y el gas de síntesis obtenido no contiene alquitrán ni compuestos fenólicos -El requerimiento de vapor es moderado -Eliminación de azufre in situ -Altamente eficiente y utilizado en gasificación a gran escala
Reactor de transporte	T: 900-1050 °C P: 0.29-1.47 MPa t: 1-10 s	-Alto rendimiento y conversión -No está suficientemente probado

El más empleado es el de lecho fijo, tiro descendente o downdraft, en el cual, se lleva a cabo una combustión parcial de la biomasa cuando se suministra aire (oxígeno) en cantidades menores a las adecuadas para evitar una combustión completa. La combustión parcial produce monóxido de carbono e hidrógeno, los cuales son gases combustibles. Estos gases pueden ser directamente alimentados en un motor de combustión interna para la producción de energía eléctrica [49]. La mezcla de gases generada durante un proceso de gasificación puede ser quemada para la generación de calor y energía. Así mismo, puede ser convertido en electricidad mediante otros procesos complementarios (separación, limpieza, enfriamiento, condensación, filtrado, etc.). Por otro lado, la mezcla de gases generada puede producir combustibles líquidos de transporte, como el biodiesel [50]. El gas producido también puede utilizarse como materia prima en un gran número de síntesis, para la producción de un amplio rango de productos químicos de alto valor y, combustibles, como las olefinas, el formaldehído, los líquidos Fischer-Tropsch, metanol y amoníaco [51,52]. También es usado como una fuente de hidrógeno y monóxido de carbono [53].

Bolivia cuenta con el Sistema Interconectado Nacional (S.I.N.), para la distribución de energía, la cual, se encarga de generar, transmitir y distribuir energía eléctrica a los departamentos de La Paz, Oruro, Cochabamba, Santa Cruz, Potosí, Chuquisaca y Beni [54]. El departamento de Pando cuenta con el Sistema Aislado (SA) de la Amazonía, del cual, el 95 % de su energía proviene de termoeléctricas a base de diésel subvencionado [54]. Si bien el diésel utilizado es subvencionado por el Estado, es importante buscar otras fuentes de generación más amigables con el medio ambiente y bajar las importaciones de diésel.

La Tabla 4 muestra las diferentes plantas de gasificación instaladas a nivel global a escala industrial:

**Tabla 4.** Plantas comerciales con tecnología de gasificación en el mundo. Elaboración propia en base a referencias [41,55].

País	Planta	Tecnología	Materia Prima	Productos	Año
Alemania	Slurry gasification	Lurgi MPG	Aceite y lodo	Electricidad y metanol	1968
Australia	Whytessgully waste to energy	-	Biomasa	Electricidad	1999
Brasil	Brazilian BIGCC	TPS	Biomasa	Electricidad	2003
Canadá	MSW	Thermogenies	Biomasa	Electricidad	2000
Canadá	Enerkem	-	Residuos triturados madera	Methanol y etanol	2016
China	Beijing town gas	Texaco	Carbón	Gas y electricidad	1995
China	Caojing power	Shell	Carbón	Electricidad, syngas	2004
España	Puertollano GCC	PRENFLO	Carbón y coque de petróleo	Electricidad	1997
Estados Unidos	Eastman Chemical Co.	Texaco	Carbón	Metanol y productos químicos	1983
Estados Unidos	Polk Country IGCC	Texaco	Carbón	Electricidad	1996
Estados Unidos	Commercial demonstration	Brightstar Env. Ltd	Biomasa	Electricidad	1996
Estados Unidos	New Bern gasification	Chemrec	Licor negro	Electricidad	1997
Estados Unidos	McNeil IGCC	Future energy resources	Residuos forestales	Electricidad	1997
Estados Unidos	Sierra Pacific Power Co.	KRW	Carbón	Electricidad	1998
Estados Unidos	Tampa Electric Polk power station	E-Gas	Carbón/coque	Electricidad y vapor	1996
Estados Unidos	-	U-GAS	Biomasa	Electricidad	2004
Estados Unidos	Calla GCC	U-GAS	Biomasa	Electricidad	2003
Estados Unidos	-	Texaco	Carbón	Electricidad	2006
Estados Unidos	ThermoChem Recovery International	Steam Reformer Technology	Residuos de madera o cultivos energéticos, basura,	Gasolina, combustibles para avión, productos químicos	-
Europa	-	Shell	Residuo	Electricidad	2005
Francia	Normandie IGCC	Texaco	Aceite combustible	Electricidad, vapor e hidrógeno	2005
Finlandia	Kymijarvi ACFBG	FW ACFBG	Biocombustibles	Electricidad y calor	1998
Finlandia	Sumitomo Foster Wheeler	-	Residuos forestales, corteza, astillas de madera y aserrín.	Syngas, biodiésel	2009
Italia	Suleis IGCC	Shell	Carbón	Electricidad	2004
Japón	Unspecified IGCC	ICGRA	Carbón	Electricidad	2004
Países Bajos	NUON	Shell	Carbón	Electricidad	1994
Países Bajos	Europoort/IGCC pernis	Texaco	Residuos plásticos	Electricity and CO	2006
Reino Unido	Fife electric	BGL	Carbón y lodo	Electricidad	2005
Singapur	Chawan IGCC	Texaco	Aceite residual	Electricidad, vapor e hidrógeno	
Singapur	Singapore Syngas	Texaco	Alquitrán	Hidrógeno, monóxido de carbono (para ácido acético)	2000
Suecia	CHRISGAS	-	Biomasa	Hidrógeno como combustibles	2008/09
Suecia	GoBiGas	Aichernig Engineering	Astillas de madera, residuos forestales y cortezas	Biometano	2015

Son 62 países los que generan electricidad a partir de biomasa. Estados Unidos lidera el 26 % de la producción mundial de energía renovable a partir de residuos de biomasa, seguido de Alemania con un 15%, Brasil y Japón con un 8% cada uno, y el Reino Unido con un 5% [56].

3.2. Tecnología de pirólisis para la generación de biochar y bioaceite (Figura 7)

La pirólisis es un tipo de reacción termoquímica en la que la degradación térmica se lleva a cabo hasta un máximo de 600°C, en ausencia total de oxígeno. Generalmente, se utiliza una atmósfera inerte como nitrógeno o dióxido de carbono. En consecuencia, cuando este proceso es aplicado a materiales biomásicos, se obtienen productos en los tres estados de agregación: biochar (sólido), bioaceite (líquido) y gas [57]. Dependiendo de las condiciones de operación, el proceso de pirólisis puede dividirse en tres subclases: pirólisis lenta convencional (carbonización), pirólisis rápida y pirólisis flash [58]. Los rangos de los parámetros de operación más importantes están en la Tabla 5.

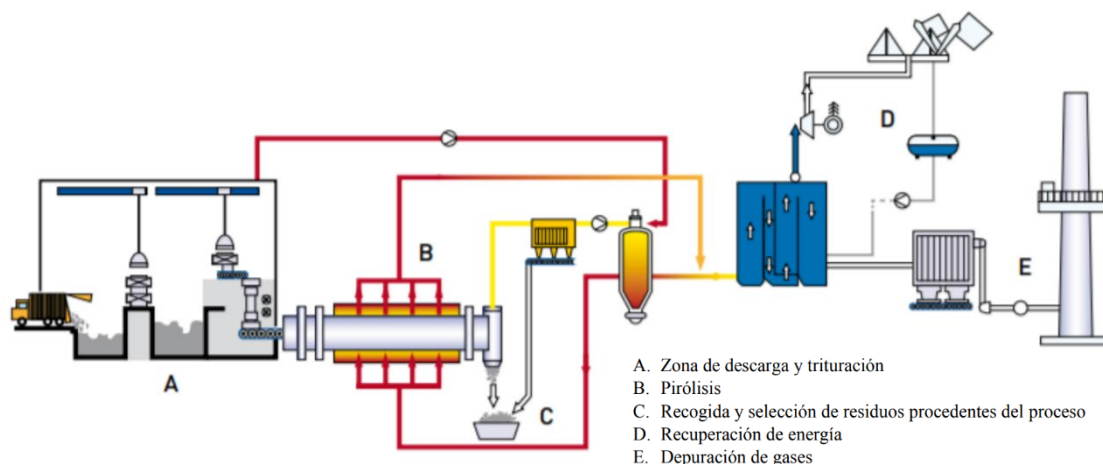


Figura 7. Esquema de una planta de pirólisis [59].

Tabla 5. Parámetros de operación típicos y sus productos de procesos termoquímicos de conversión de biomasa. Elaboración propia en base a referencias [21,58].

Proceso	Temperatura (°C)	Tasa calentamiento (°C/s)	de	Tiempo de residencia (s)	Distribución de productos (%)		
					Bioaceite	Biochar	Biogas
Pirólisis lenta	300-700	0.1-1		300-550	30	35	35
Pirólisis rápida	600-1000	10-200		0.5-10	50	20	30
Pirólisis flash	800-1000	>1000		<0.5	75	12	13

A lo largo de los años se han diseñado diversos tipos de reactores para optimizar el desarrollo de los procesos de pirólisis y la producción de bioaceites de alta calidad. Sin embargo, cada tipo de reactor tiene sus propias características, rendimientos de bioaceite, ventajas y desventajas. Entre éstos, los reactores más populares se describen en la Tabla 6.

Dentro de los parámetros de operación que se deben considerar durante el proceso de conversión se tiene el tamaño de partícula, tasa de alimentación, tasa de calentamiento, temperatura, y tiempo de residencia [60]. Entre los procesos de conversión, la pirólisis ha atraído más la atención. Debido a que el transporte de residuos y biomasa sólida son muy complicados y costosos, la producción de combustibles líquidos mediante un proceso de pirólisis tiene ventajas en el almacenamiento, transporte y versatilidad de uso de los combustibles líquidos como por ejemplo en motores de combustión, quemadores, turbinas, etc. [21].

A partir del bioaceite pirolítico se pueden obtener diversos productos con diferentes aplicaciones en distintos campos, algunos de ellos se encuentran en la Tabla 7.

También se reportó en literatura un proceso de pirólisis de cáscara de castaña (*Bertholletia excelsa*) a diferentes temperaturas (350 °C, 600 °C, 850 °C), donde midieron las adsorciones físicas de nitrógeno y dióxido de carbono.



40 años

**Tabla 6.** Tipos de reactores pirolíticos. Adaptado y traducido al español de Jahirul, 2012 bajo licencias Creative Commons [21].

Reactor	Ventajas	Desventajas	Rendimiento Bioaceite (%)
Lecho fijo	Diseño simple Confiable Independiente del tamaño de partícula de la biomasa	Alta conservación de carbono Largo tiempo de residencia de sólidos Bajo arrastre de cenizas Difícil de remover el biochar	35-50
Lecho fluidizado burbujeante	Diseño simple Operación fácil Buen control de temperatura Adecuado para una escala grande	Se necesitan pequeños tamaños de partícula	70-75
Lecho fluidizado circulante	Tecnología bien entendida Buen control térmico Se pueden utilizar tamaños de partícula grandes	Es poco probable que sea adecuado para una escala grande Hidrodinámica compleja Biochar de tamaño de partícula muy pequeño	70-75
Cono rotativo	La fuerza centrífuga mueve la arena caliente y la biomasa No se requiere gas portador Menos desgaste	Proceso complejo Se necesitan pequeños tamaños de partícula Aún no probado a gran escala	65
Vacío	Produce aceite limpio Puede procesar partículas más grandes de 3-5 cm No se requiere gas portador Se requiere una temperatura de operación menor a las usadas por sistemas sin vacío	Proceso lento El tiempo de residencia del sólido es demasiado alto Requieren equipos a gran escala Baja tasa de transferencia de masa y calor debido a la ausencia de un fluido de transferencia Genera más agua	35-50
Ablativo	No se requiere gas inerte Se pueden procesar tamaños de partícula grandes Se requiere temperatura moderada	El reactor es costoso Baja velocidad de reacción	70
Auger/tornillo	Compacto No se requiere gas portador	Piezas móviles en zona caliente La transferencia de calor a gran escala no es adecuada	30-50
Pyros	Compacto y de bajo coste Alta transferencia de calor Corto tiempo de residencia de gas	Diseño complejo Sólidos en el aceite Alcali disuelto en el aceite Alta temperatura requerida	70-75
Plasma	Alta densidad de energía Alta transferencia de calor Alta temperatura Muy buen control	Alto consumo de potencia eléctrica Altos costos operativos Se requieren tamaños de partícula pequeños	30-40
Microondas	Transferencia de calor eficiente Control exponencial Compacto Alta tasa de calentamiento La biomasa de gran tamaño puede ser procesada Distribución uniforme de la temperatura Alta temperatura	Alto consumo de potencia eléctrica Altos costos operativos	60-70
Solar	Utiliza energía renovable Alta tasa de calentamiento Alta temperatura	Altos costos Depende del clima	40-60



Tabla 7. Diversos usos y productos químicos a partir del bioaceite obtenido por pirólisis [19].

Componente en el bioaceite	Usos
Levoglucosa	Aditivo alimentario, farmacéutico
Etanol	Biocombustible
Furfural	Farmacéutico, pesticida
Ácido acético	Químico
Ácido fórmico	Preservativo, agente antibacterial
Hidroxiacetaldehído	Sustancia de fragancia, farmacéuticos intermedios

Se determinaron las características superficiales de la cáscara de castaña y de las muestras de biochar mediante mediciones de adsorción física de nitrógeno y dióxido de carbono, valores que se muestran en la Tabla 8. [16]. El área superficial específica en nitrógeno (ASN) que reportaron para la cáscara de castaña fue de $0.12 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{Kg}$, un volumen total de microporos (VMT) de $0.030 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{Kg}$ y un área superficial aparente en dióxido de carbono (ASDC) de $118 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{Kg}$ [16].

Tabla 8. Composición química y análisis proximal de biochar obtenido mediante pirólisis. Los parámetros reportados son ASN: Área superficial específica en Nitrógeno, VMT: Volumen total de microporos, ASDC: Área superficial aparente en Dióxido de Carbono. Elaboración propia en base a referencia [16].

T (°C)	CE (%)	MV (%)	CF (%)	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	ASNx10 ⁻³ (M ² /Kg)	VMTx10 ³ (m ³ /Kg)	ASDCx10 ⁻³ (m ² /Kg)
350	1.7	48.2	50.1	67.3	4.5	1.2	27	0.87	0.034	131
600	2.9	18.2	78.9	89.5	2.6	1.4	6.5	4.2	0.14	430
850	3.4	5.3	91.3	94.7	0.8	1.6	2.9	3.3	0.2	624

Dentro de las aplicaciones del biochar obtenido mediante un proceso de conversión de pirólisis se tienen los mostrados en la Tabla 9. La Tabla 10 muestra las plantas comerciales de pirólisis en el mundo.

Tabla 9. Aplicaciones del biochar. Reproducido de Palomo González, 2020 bajo licencia creative commons CC BY-NC-ND 4.0 [36].

Ambiental	Adsorción de metales tóxicos como arsénico, cadmio y plomo en efluentes líquidos Adsorción de antrazina en efluentes líquidos y suelos contaminados Adsorción de hidrocarburos aromáticos policíclicos en suelos contaminados
Materiales	Aditivo para la fabricación de envases biodegradables Elaboración de electrodos en celdas de combustible Aditivo para incrementar la resistencia mecánica del concreto; la mezcla con biochar disminuye la cantidad de cemento agregado
Alimenticio	Suplemento alimenticio para aves de corral o rumiantes

3.3. Tecnología de licuefacción hidrotermal (HTL) para la producción de biocrudo, (Figura 8)

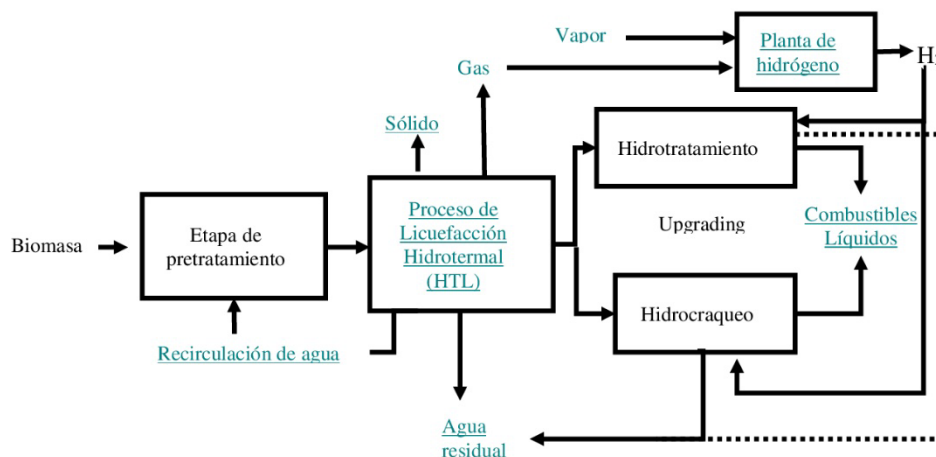


Figura 8. Esquema del proceso de conversión HTL de biomasa. Elaboración propia en base a referencia [61].



Tabla 10. Plantas comerciales de pirólisis en el mundo. Elaboración propia en base a referencias [21,68].

País	Planta	Tecnología/ Reactor	Materia Prima	Productos	Cap. de Alimentación	Rend.	Inversión Año Millones
Estados Unidos	Bio-Alternative	Lecho fijo		biochar	2000 Kg/h		
Canadá	Ontario facility	Lecho Fluidizado	Residuos leñosos forestales y de molino	Bioaceite		11 ML/año	19 Euros 2006
China	Hefei facility	Lecho Fluidizado	Residuos agrícolas y de madera	Bioaceite	15 ton/día	2 ML/año	2010
Finlandia	Fortum	Lecho Fluidizado	Residuos forestales y aserrín	Bioaceite		43 ML/año	38 Euros 2013
China	Dali County facility	Lecho fluidizado con corriente descendente	Cáscara de arroz	Bioaceite	1-3 ton/h	2-6 ML/año	2016
Canadá	Côte nord	Lecho fluidizado	Residuos de madera de aserradero	Bioaceite	65000 tons biomasa/año	38 ML/año	78 USD 2018
Brasil		Lecho fluidizado	Residuos forestales del Eucalipto	Bioaceite	17000 Kg b.mass 11000 Kg b.oil	83 ML/año	77 USD
Canadá	Abri-tech parent D	Auger	Residuos leñosos	Bioaceite	50 ton/día	6 ML/año	7 AUD
India	Ih2 demonstration facility	Integrado: Hidropirólisis + Hidroconversión	Residuos urbanos, agrícolas y silvicultura	Biogas, diésel	5 ton/día	>0.5 ML/año	2018-2019
India	Mash energy		Materiales de desecho	Bioaceite			
Finlandia	GREEN FUEL NORDIC OY	Cono Rotatorio	Residuos forestales y aserrín	Chem. Prod. for industry		20 ML/año	25 Euros 2020
Estados Unidos	BIOGAS ENERGY PROJECT	Adiabatico	Residuos agrícolas y forestales	Bioaceite	500 Kg/h	1.3 ML/año	2020

Una alternativa emergente y muy interesante para la valorización de biomasa es la licuefacción hidrotermal (HTL, Figura 9). Durante un proceso HTL, se mezcla biomasa húmeda y una cantidad suplementaria de agua, generalmente en el rango de 1:10–1:5 p/p biomasa: agua. Después, se calientan en el rango de 280–370 °C bajo una presión de 10 a 25 MPa [62]. El proceso HTL es un proceso de conversión de biomasa a biolíquido realizado en agua a baja temperatura y a alta presión. Durante este proceso la biomasa se descompone en fragmentos de pequeñas moléculas que generan como principal producto un biocrudo líquido junto con los subproductos en fase gaseosa, acuosa y sólida [63,64]. Los cuatro productos que se forman son el biocrudo; gases ligeros (principalmente CO₂, CH₄, CO y H₂), un producto sólido (char) y una fase acuosa con un alto contenido de carbono orgánico [63]. Los productos de este proceso tienen un alto potencial energético y una mejor recuperación de calor en comparación con otros procesos [63]. Estos productos no sólo tienen mayor poder calorífico y propiedades mejoradas que la biomasa de partida, facilitando su transporte y almacenamiento, sino que pueden utilizarse como precursores para la obtención de diferentes biocombustibles y compuestos de valor añadido [24]. Concretamente, el gas producido por la reacción consiste en una mezcla de H₂, CO, CO₂ y CH₄, cuya composición depende de las condiciones de operación utilizadas y la biomasa de partida. Este gas puede utilizarse como un biocombustible gaseoso (hidrógeno o biogás) o como



precursor para la obtención de biocombustibles líquidos [24]. El biocrudo contiene los productos de descomposición de la celulosa, hemicelulosa y lignina. Éste tiene excelentes propiedades fisicoquímicas para utilizarse como precursor de biocombustibles líquidos y gaseosos, así como para la síntesis de productos químicos valiosos y moléculas plataforma de origen renovable [24]. El sólido obtenido es un excelente precursor de biocombustibles sólidos y/o adsorbentes renovables [24].

Este tipo de tecnología, HTL, tiene la ventaja frente a las otras alternativas de no requerir una etapa de secado para el proceso, lo que la hace adecuada para el procesamiento de los residuos húmedos de la castaña [24]. En la Tabla 11 se pueden ver las diferencias entre los procesos de conversión de biomasa pirolítica y los de licuefacción hidrotermal.

Tabla 11. Comparación de los procesos de licuefacción hidrotermal y pirólisis para la conversión de biomasa en biocrudo y bioaceite, respectivamente. Elaboración propia en base a referencias [64,65]

	Pirólisis	Licuefacción Hidrotermal
Secado	Necesario	Innecesario
Biomasa	<10%	80-90%
Presión (MPa)	Presión atmosférica (0.1-0.5)	5-20
Temperatura (°C)	400-600	200-400
Catalizador	No	A veces
Poder calorífico	Bajo (~17MJ/Kg)	Alto (~30MJ/Kg)
Contenido de oxígeno	Alto	Bajo
Contenido de agua	Alto	Bajo
Viscosidad	Bajo	Alto
Mejora de productos	Difícil	Fácil

En la Tabla 12. se muestran los tipos de biomasa agrícolas, el solvente utilizado, el ratio de biomasa a solvente, el tiempo de residencia y los rendimientos de conversión de biomasa en biocrudo en un proceso HTL. Estos valores pueden variar dependiendo de la materia prima utilizada, los parámetros de operación, catalizadores utilizados y solventes [64].

Tabla 12. Rendimientos del proceso HTL de biomasa. Elaboración propia en base a referencia [64]

Biomasa	Solvente	Ratio de Biomasa/Solvente (g/mL)	Tiempo de Residencia (min)	Rendimiento de Biocrudo (%p biomasa húmeda inicial)
Tallo de maíz	Agua, metanol, agua + metanol	1/10	30	Medio: 70 Máximo: 88
Residuo de biomasa	Agua	1/10	30	Medio: 28 Máximo: 36
Tallos de arroz	Etanol	-	60-90	Medio: 51 Máximo: 55
Junco y rastrojo de maíz	Etanol + agua	1/20	60-240	N.A.

Para mejorar los rendimientos y la calidad del biocrudo de los procesos HTL comúnmente se utilizan catalizadores como se muestra en la Tabla 13 [37].

Tabla 13. Efecto de diferentes catalizadores en el rendimiento de biocrudo HTL. Elaboración en base a referencias [37,66]

Materia Prima	Catalizador	Rendimiento de Biocrudo (% p/p)
Aserrín de madera de abedul	KOH	39.5
	FeSO ₄ ·7H ₂ O	32.0
	K ₂ CO ₃	38.5
	MgO	30.0
	Hidrotalcita (HT)	35.9
	HT/KOH	36.0
	Colemanita	36.3
	FeSO ₄	23.0
	ZnSO ₄	25.0
	NiSO ₄	37.0
	Raney-níquel	43.0



40 años



	NiSiO ₂ -Al ₂ O ₃	43.0
	Na ₂ CO ₃	48.0
	NaOH	53.0
Celulosa	HCl	33.0
	NaOH	15.0
Cáscara de arroz	La ₂ O ₃	32.5
	Dy ₂ O ₃	31.2
Cáscara de trigo	KOH	30
	K ₂ CO ₃	31
Sorgo dulce	K ₂ CO ₃	62
Bagazo dulce	KOH	42
	CH ₂ O ₂	38
	Ni/Si-Al	45
	Ni ₂ P	18
	Zeolite (ZSM-5)	14
Madera de álamo	In(OTf) ₃	13
	Yb(OTf) ₃	14
	InCl ₃	12
Madera de roble	Ni	35
Racimos de fruta vacíos	ZnCl ₂	9.0
	CuCl ₂	10.0
	NiCl ₂	12.5
Kenaf	Ru/C	77.0
Tallos de maíz	No catalizador	73.0
	K ₂ CO ₃	69.0

Los 4 productos que se obtienen mediante un tratamiento HTL de biomasa con o sin la adición de catalizador homogéneo/heterogéneo son: biocrudo (fase orgánica de la mezcla líquida obtenida del proceso), fase acuosa, productos sólidos (biochar) y productos gaseosos [37]. Los rendimientos, compuestos, aplicaciones y ventajas de los productos HTL se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Rendimiento, composición, aplicación, ventajas y desafíos de las fracciones producto del proceso HTL. Elaboración propia en base a referencias [37,63,67]

Productos HTL					
Biocrudo (Fase orgánica)					
	Aplicación en Combustibles	Aplicación Química	Fase Acuosa	Fracción Sólida	Fracción Gas
Rendimiento (%)	10-50	10-50	40-60	10-20	<5
Composición de los productos	- Alcanos ligeros y pesados. - Alquenos. - Aromáticos y oxigenados (ácidos, alcoholes, aldehídos, cetonas, ésteres, éteres, azúcares, furanos y fenoles). 73 %peso C; 8%peso H ; 16%peso O; <45%peso S.	- Adhesivos, polioles, fenoles y productos químicos.	Agua, disolventes empleados (etanol y metanol) y compuestos orgánicos livianos.	- Carbón negro, compuestos oxigenados.	- Dióxido de carbono. - Monóxido de carbono. - Hidrógeno, - Metano.
Aplicación	- Combustibles livianos (gasolina y diésel).		Recirculación o combustibles livianos, productos químicos y fertilizantes.	Biochar como fertilizante, remediación del suelo y adsorbentes.	Combustibles livianos, syngas, H ₂ CH ₄ ,
Ventajas	Hidrocarburos livianos y aromáticos similares a petróleo.	Propiedades adecuadas para adhesivos y aplicación de resinas fenólicas.	Procesamiento (gasificación y síntesis de Fischer Tropsch) Para generar combustibles livianos.	- Alta área superficial. - Grupos funcionales (carboxilo, fenólico y carbonílico)	Conversión a combustible livianos.
Desafíos	- Alta viscosidad. - Alto contenido de compuestos oxigenados. - PCS bajo comparado a petróleo.	- Composición compleja.	- Integración de un proceso complementario para la purificación de la fase acuosa .	Investigación en procesos de adsorción.	Investigación de escalamiento.



40 años



El biocrudo obtenido mediante un proceso de HTL tiene un contenido de oxígeno total de 10-20 %p/p el cual es mucho menor que el obtenido en el biocrudo pirolítico, que es aproximadamente 40 %pp/ [61]. El poder calorífico del biocrudo HTL tiene un valor de 35 MJ/Kg el cual es mayor a los obtenidos en el aceite pirolítico (16-19 MJ/Kg). Además, es más cercano a los valores de 40-45 MJ/Kg que tienen los combustibles de petróleo convencional [61]. Los compuestos que se pueden encontrar mayormente en el biocrudo HTL se muestran en la Tabla 15. En la Tabla 16 se observan los rangos de la composición elemental del biocrudo HTL. Por otro lado, los gases obtenidos por HTL que consisten principalmente de CO₂ podrían recircularse para el cultivo de microalgas. Los productos sólidos obtenidos se pueden usar como combustible sólido para generar calor o como fertilizante para la mejora del suelo [37].

Tabla 15. Compuestos principales del biocrudo obtenido mediante un proceso HTL. Adaptado y traducido al español de Gollakota, 2018 bajo licencia Creative Commons [63]

Grupo	Compuestos
Monoaromáticos	Fenol, benceno, tolueno, estireno, colesterol, colesteno y vitamina E
Ácidos grasos	Ácido mirístico, ácido palmítico, ácido estérico, ácido oleico, ácido tetradecanoico y octanoico, ácido hexadecanoico, ácido araquídico y ácido eicosapentaenoico
Alcanos/Alquenos	Hexadecano, hexadecano, heptadecano, heptadecano, pentadecano, pentadecano, fitano, fiteno, docosano, colestano, cicloalcano, eicosano, coprostanato, triconato, hentriaconato y dotriaconato
Compuestos aromáticos	Naftaleno, quinolino, indeno, antraceno, fenantreno, pireno, carbazol y fluoreno
Compuestos nitrogenados	Piperidinas, pirroles, pirrolidinas, indoles, piridinas, pirazinas, pirolidinonas, amidas, aminas y nitrilos
Compuestos oxigenados	Esteres, aldehídos, cetonas, alcoholes, ácidos acéticos y furanos

Tabla 16. Propiedades fisicoquímicas del biocrudo HTL. Elaboración propia en base a referencias [37,63]

Composición Elemental	(% Atómico)
C	25.64 – 80.21
H	3.53 – 12.4
N	0 – 10.14
O	0 – 67.53
H/C	0.98 – 1.64
H/O	3.23 – 6.52
O/C	0.09 – 0.71
N/C	0.003 – 0.013
Número ácido (mg KOH/g)	0.31 – 0.36
PCS (MJ/Kg)	5.85 – 38.87

Los productos HTL pueden pasar por técnicas y tecnologías de mejoramiento para aumentar su calidad, acercando sus características y propiedades a los derivados del petróleo para poder utilizarlos como combustibles líquidos. A continuación, se describirán algunas rutas de transformación de los productos HTL. El mejoramiento del biocrudo consiste en un proceso de hidrotreatmento o hidrodeseoxigenación, en el cual, se utilizan catalizadores para la remoción de compuestos oxigenados. De esta manera, se aumenta el rendimiento de hidrocarburos y se disminuye el peso molecular [37]. También, se puede obtener productos químicos a partir de biocrudo, como polioles, resinas epoxi, resina de fenol-formaldehído tipo resol, poliuretano y componentes adhesivos [37]. La fase acuosa se puede reciclar en un nuevo proceso HTL [37]. También puede optarse por un proceso de gasificación con agua supercrítica para la producción de un gas rico en hidrógeno (T: 400-800 °C y catalizadores metálicos como Ni, Ru y Pt) [37]. A partir de la fase acuosa se puede recuperar fósforo y nitrógeno que puede utilizarse como medio de crecimiento para algas [37]. El biocrudo también puede utilizarse para la producción de biogás mediante digestión anaeróbica [37]. Los productos sólidos (biochar) pueden servir para la remediación de suelos mediante la retención de humedad y nutrientes, e inmovilización de metales pesados. El biochar presenta efectos en el transporte de nutrientes y afinidad por los contaminantes orgánicos, mejorando la fertilidad del suelo. También ayuda en el secuestro de carbono reduciendo la acumulación atmosférica de gases de efecto invernadero [37]. También se puede obtener carbón activado a partir del biochar obtenido mediante una activación química [37].



La Tabla 17 muestra algunas de las plantas comerciales que han optado por la licuefacción hidrotermal como proceso de conversión de biomasa a nivel global.

CONCLUSIÓN

La castaña es un fruto que cuando es procesado genera una enorme cantidad de residuo, el 88% del fruto del árbol se desecha como residuo, estos residuos son prácticamente madera y poseen una estructura lignocelulósica. La lignina en este tipo de materiales es un buen indicador del potencial de procesamiento termoquímico. Los residuos de castaña presentan un gran contenido de lignina por lo que son un material interesante para la obtención de productos de valor agregado mediante estos procesos.

Tabla 17. Plantas comerciales con procesos de conversión HTL a nivel global. Elaboración propia en base a referencia [68]

Año	Inversión	Producción	Alimentación	Productos	Materia Prima	Tecnología/ Reactor	Planta	País
1995		9 ML/año		Bio-crudo HTL	Residuos de madera	Lecho Fluidizado	RED ARROW FACILITIES	Estados Unidos
	39 millones C\$	80 ML/año		Bio-crudo	Madera y residuos de pulpa Kraft	Licuefacción hidrotermal	CANFOR-LICELLA JOINT VENTURE	Canadá
2012	75 millones AUD	9 ML/año	10000 ton/año	Aceite reciclado	Madera, residuo agrícola, pulpa y papel.	Licuefacción hidrotermal	LICELLA-NEW SOUTH WALES	Australia
2014	11.8 millones AUD			Bio-crudo HTL	Lodos, microalgas, neumáticos reciclados	Licuefacción hidrotermal	MURADEL D	Australia
2019	50 millones EUR	1 ML/año		Bio-crudo HTL	Residuos forestales	Licuefacción hidrotermal	SILVA GREEN FUEL	Noruega
2016-2017		20 ML/año	15 ton/h	Bio-crudo HTL	Varias fuentes de biomasa	Licuefacción hidrotermal catalítica	ALTACA ENERGY	Turquía

El contenido de lignina no es la única propiedad atractiva de los residuos de castaña para su uso en procesos termoquímicos, la cantidad de material volátil 56 – 86% es un buen indicador de grupos orgánicos que pueden ser transferidos a los productos sólidos, líquidos y gaseosos del proceso. El residuo tiene una alta cantidad de carbón fijo (18 – 42%), lo cual indica que puede ser un buen material para la obtención de biochar (fracción sólida). También, tiene un alto valor de PCS lo cual es un indicativo de su potencial uso en la generación de energía.

Para la obtención de un producto sólido, los residuos de castaña son interesantes ya que pueden convertirse en biochar con altas tasas de rendimiento, una gran cantidad de grupos orgánicos funcionales y una buena área superficial específica. Estas propiedades son deseables en el biochar para su aplicación como material adsorbente en la remediación de suelos y la remoción de contaminantes en cuerpos de agua. En base a lo expuesto en el documento podemos decir que dentro de los procesos termoquímicos para la obtención de biochar, el más adecuado es la pirólisis,

En cuanto a la obtención de material líquido podemos destacar que la castaña tiene una gran cantidad de grupos orgánicos y compuestos aromáticos complejos debido a la lignina presente en el material. Esto implica que, al producirse líquidos condensables mediante un proceso termoquímico, éstos poseen una amplia gama de compuestos orgánicos que dependiendo del proceso pueden variar su distribución. Principalmente, éste cuenta con cadenas largas de carbono lo cual lo convierte en un material valioso ya sea para su mejora en biocombustibles, o como para su mejora en productos de refinación para la obtención de petroquímicos. Entonces, podemos decir que, para la obtención de este tipo de productos líquidos, los procesos más adecuados son la pirólisis y la licuefacción hidrotermal (HTL).



Por último, el residuo de castaña puede producir gases de alto valor energético, estos productos gaseosos están compuestos principalmente por metano, y en base al proceso aplicado puede ser considerado un gas de síntesis. El alto valor de PCS del residuo de castaña puede ser asociado a una mejor calidad de gas producido por procesos termoquímicos. Por lo tanto, es recomendable que para esta aplicación de generación de energía se aplique un proceso de gasificación en los residuos de castaña.

Es importante contextualizar el entorno donde se produce la castaña para evaluar las posibles aplicaciones deseadas y de esta manera evaluar el potencial real del material. La región amazónica de Bolivia (Pando) donde se produce castaña, es una región que se encuentra aislada del resto del país. Los problemas que conlleva esto son muchos e involucran desde el suministro energético y de combustibles hasta la disponibilidad de alimentos y suministros agrícolas (fertilizantes). Varios de estos problemas pueden ser afrontados mediante los productos que los procesos termoquímicos ofrecen. Es importante recalcar que el principal producto agrícola producido en esta región es la castaña, lo cual hace que el uso de los residuos de este material sea una buena alternativa para la mejora de la calidad de vida en esta región.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecemos el apoyo de la cooperación Sueca ASDI y TWAS-UNESCO por el financiamiento de los proyectos de investigación: "Production of renewable materials and applications - Subprogram/ASDI" y Project 20-218 RG/CHE/LA_I/, respectivamente.

REFERENCIAS

1. IBCE, Bolivia: Primer exportador de castaña en el mundo - IBCE (Instituto Boliviano de Comercio Exterior), 2022. Recuperado de <https://ibce.org.bo/noticias-detalle.php?idNot=895>
2. Torres, F.G., Gonzales, K.N., Troncoso, O.P., Chávez, J., De-la-Torre, G.E. 2022, Sustainable applications of lignocellulosic residues from the production of Brazil nut in the Peruvian Amazon, *Environ Qual Manag*, 31(4), 291-300. DOI: <https://doi.org/10.1002/tqem.21812>
3. Cabezas, Loayza, C.M. 2018, Estimación del potencial energético de los residuos de la cadena de valor del fruto de la castaña (*Bertholletia Excelsa*) en la Región Madre de Dios, (BSc tesis), Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/3748/cabezas-loayza-carla-mycet.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
4. Yañez, P., Levy, A., Azero, M., 2007, Evaluación del compostaje de residuos de dos agroindustrias palmiteras del Trópico de Cochabamba en silos hiperventilados, *Acta Nova*, 3(4), 720-735. DOI: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892007000200006&lng=es&nrm=iso&tlng=es
5. Avila Bruckner V. 2011, Generación eléctrica con gas de síntesis Bioeléctrica del Norte. Recuperado de <https://aber.org.bo/wp-content/uploads/2022/05/Generadora-Elctrica-en-base-a-cascara-de-castana.pdf>
6. Neto, J.M., Komesu, A., Martins, L.H. da S., Gonçalves, V.O.O., Oliveira, J.A., Rocha, M. 2019, Third generation biofuels: an overview, *Sustain Bioenergy Adv Impacts*. Jan 1,283-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817654-2.00010-1>
7. Roundtable NRC (US) CS. 2012, Fuels and Chemicals from Biomass via Thermochemical Routes. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK158893/>
8. Ministerio de Desarrollo Productivo y Economía Plural, Estado Plurinacional de Bolivia, GeoExplorer, Distribución de Castañas, Sistema Integrado de Información Productiva, 2022. Recuperado de <http://siip.produccion.gob.bo:8080/geoexplorer/composer/#maps/4>
9. Larrea-Alcázar, D.M., Villanueva, G., Poma, A., Zenteno-Ruiz, F.S., Araujo-Murakami, A., Altamirano, S., De Ugarte, C. 2018, El árbol de la castaña (*Bertholletia excelsa* Bonpl., Lecythidaceae) en Bolivia: distribución geográfica e impacto de la deforestación, *Ecol en Bolivia*, 53(1), 16-30. DOI: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1605-25282018000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es
10. De Souza, T.N.V., Vieira, M.G.A., da Silva, M.G.C., Brasil, D. do S.B., de Carvalho, S.M.L. 2019, H3PO4-activated carbons produced from açai stones and Brazil nut shells: removal of basic blue 26 dye from aqueous solutions by adsorption, *Environ Sci Pollut Res*, 26(28), 28533-47. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04215-0>
11. CIPA, 2017, Memorias del Conversatorio: Investigación y Monitoreo de la Castaña. CIPA (Centro de Investigación y Producción para la Amazonía), WWF (Fondo Mundial para la Naturaleza), ACEAA Conservación Amazónica (Asociación Boliviana para la Investigación y Conservación).
12. Petrechen, G.P., Arduin, M., Ambrósio, J.D. 2019, Morphological Characterization of Brazil Nut Tree (*Bertholletia excelsa*) Fruit Pericarp, *Journal of Renewable Materials*, 7(7), 683-692. DOI: <https://doi.org/10.32604/jrm.2019.04588>
13. Castillo Vacano, A., 2006. Beneficiadora de castaña. Universidad Mayor de San Andrés; Available from: <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/17345/PG-2452.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
14. Avila Bruckner, V. Generación eléctrica con gas de síntesis Bioeléctrica del Norte [Internet], 2011 [cited 2023 Aug 30], Recuperado de <https://aber.org.bo/wp-content/uploads/2022/05/Generadora-Elctrica-en-base-a-cascara-de-castana.pdf>
15. Machado Leandro, R.L., da Costa Abreu, J.J., da Silva Martins, C., Souza Santos, I., Bianchi, M.L., Coimbra Nobre, J.R. 2019, Elementary, Chemical and Energy Characteristics of Brazil Nuts Waste (*Bertholletia excelsa*) in the State of Pará, *Floresta e Ambient*, 26(Special issue2), e20180436. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.043618>
16. Bonelli, P.R., Della Rocca, P.A., Cerrella, E.G., Cukierman, A.L. 2001, Effect of pyrolysis temperature on composition, surface properties and thermal degradation rates of Brazil Nut shells, *Bioresource Technology*, 76(1), 15-22. DOI:



- [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00085-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00085-7)
17. Reis, J.S., Araujo, R.O., Lima, V.M.R., Queiroz, L.S., da Costa C.E.F., Pardaul, J.J.R., Chaar, J.S., Rocha Filho, G.N., de Souza, L.K.C. **2019**, Combustion properties of potential Amazon biomass waste for use as fuel, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 138(5), 3535–3539. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08457-5>
 18. Colpani, D., Santos, V.O., Araujo, R.O., Lima, V.M.R., Tenório, J.A.S., Coleti, J., Chaar, J.S., de Souza, L.K.C. **2022**, Bioenergy potential analysis of Brazil nut biomass residues through pyrolysis: Gas emission, kinetics, and thermodynamic parameters, *Clean. Chem. Eng.*, 1, 100002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clee.2022.100002>
 19. Isahak, W.N.R.W., Hisham, M.W.M., Yarmo, M.A., Hin, T.Y.Y. **2012**, A review on bio-oil production from biomass by using pyrolysis method, *Renew Sustain Energy Rev*, 1, 16(8), 5910–5923. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.039>
 20. Inamura, P.Y., Kraide, F.H., Drumond, W.S., De Lima, N.B., Moura, E.A.B., Del Mastro, N.L. **2012**, Ionizing radiation influence on the morphological and thermal characteristics of a biocomposite prepared with gelatin and Brazil nut wastes as fiber source, *Radiation Physics and Chemistry*, 84, 66–69. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.radphyschem.2012.06.043>
 21. Jahirul, M.L., Rasul, M.G., Chowdhury, A.A., Ashwath, N. **2012**, Biofuels production through biomass pyrolysis -A technological review, *Energies*, 5(12), 4952–5001. DOI: <https://doi.org/10.3390/en5124952>
 22. Inamura, P.Y., Kraide, F.H., Armelin, M.J.A., Scapin, M.A., Moura, E.A.B., Mastro, N.L. **2016**, Characterization of Brazil nut fibers, In: Fangueiro, R., Rana, S. (eds) *Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications*, RILEM Bookseries, Springer, Dordrecht, , 12, 71–85. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-017-7515-1_6
 23. Oliveira, D., Coimbra, J., Bianchi, M. **2019**, Energy quality of waste from Brazil nut (*Bertholletia excelsa*), in the state of Pará, *Brazilian J Dev.*, 5(4), 3258–65. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv5n4-1471>
 24. Remón, J., Latorre, J., Pinilla, J.L., Suelves, I. **2019**, Producción de bio-combustibles y productos de valor añadido mediante licuefacción hidrotermal de pericarpios de almendra, Tópico presentado en Trends and Challenges in Chemical Engineering Research, Zaragoza, España.
 25. Sonogo, M., Fleck, C., Pessan, L.A. **2019**, Mesocarp of Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) as inspiration for new impact resistant materials, *Bioinspiration and Biomimetics*, 14, 056002. DOI: 10.1088/1748-3190/ab2298
 26. Dai, L., Wang, Y., Liu, Y., Ruan, R., He, C., Yu, Z., Jiang, L., Zeng, Z., Tian, X. **2019**, Integrated process of lignocellulosic biomass torrefaction and pyrolysis for upgrading bio-oil production: A state-of-the-art review, *Renew Sustain Energy Rev*, 107, 20–36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.015>
 27. Dayton, D.C., Foust, T.D. **2019**, Analytical Methods for Biomass Characterization and Conversion, In: *Emerging Issues in Analytical Chemistry*, Elsevier, 20, 37–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03467-5>
 28. Zhang, X., Brown, R.C. **2019**, Introduction to thermochemical processing of biomass into fuels, chemicals, and power, *Thermochem Process Biomass Converts into Fuels*, Chem Power, 2nd edition, 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119417637.ch1>
 29. Basu, P. *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*, Elsevier, 1st Edition, **2010**, Burlington, U.S.A.
 30. Yüsek, B., Elektrokimyasal, P., İcin, K., Karbon, G., Üretimi, E., Yorgun, S. **2015**, Slow pyrolysis of paulownia wood: Effects of pyrolysis parameters on product yields and bio-oil characterization, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 114, 68–78. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2015.05.003>
 31. Dai, J., Grace, J.R. **2011**, Biomass granular screw feeding: An experimental investigation, *Biomass and Bioenergy*, 35(2), 942–955. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.026>
 32. Proenza, N. **2011**, Gas Pobre: Factibilidad de su uso en los motores ZIL – 130. *Ing Energética*, 32 (3), 1-8. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/3291/329127748001.pdf>
 33. Zadeh, Z.E., Abdulkhani, A., Aboelazayem, O., Saha, B. **2020**, Recent Insights into Lignocellulosic Biomass Pyrolysis: A Critical Review on Pretreatment, Characterization, and Products Upgrading, *Processes* 8(7), 799. DOI <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/7/799>
 34. Chen, D., Cen, K., Zhuang, X., Gan, Z., Zhou, J., Zhang, Y. **2022**, Insight into biomass pyrolysis mechanism based on cellulose, hemicellulose, and lignin: Evolution of volatiles and kinetics, elucidation of reaction pathways, and characterization of gas, biochar and bio-oil, *Combust Flame*, 242. DOI <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112142>
 35. Mathanker, A., Das, S., Pudasainee, D., Khan, M., Kumar, A., Gupta, R. **2021**, A Review of Hydrothermal Liquefaction of Biomass for Biofuels Production with a Special Focus on the Effect of Process Parameters, Co-Solvents, and Extraction Solvents, *Energies*, 14(16), 4916. DOI <https://doi.org/10.3390/en14164916>
 36. Palomo González, L.F. **2020**, Valorización de productos de la conversión termoquímica de biomasa lignocelulósica residual: biochar como aditivo agrícola, (MSc. Tesis), Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México, Recuperado de: <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/7106>
 37. Beims, R.F., Hu, Y., Shui, H., Xu, C.C. **2020**, Hydrothermal liquefaction of biomass to fuels and value-added chemicals: Products applications and challenges to develop large-scale operations, *Biomass and Bioenergy*, 135, 105510. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105510>
 38. Sánchez, A., Martín, M. *Sustainable Design for Renewable Processes: Principles and Case Studies*, **2022**, 133–92. DOI: 10.1016/B978-0-12-824324-4.00018-4
 39. Araujo, R.O., Ribeiro, F.C.P., Santos, V.O., Lima, V.M.R., Santos, J.L., Vilaça, J.E.S., Chaar, J.S., Falcão, N.P.S., Pohlit, A.M., Souza, L.K.C. **2022**, Renewable Energy from Biomass: an Overview of the Amazon Region, *Bioenergy Res.*, 15(2), 834–849. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10308-x>
 40. Juela, L.A. **2020**, Camino de la Transformación : propuesta tecnológica para el avance de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, (MSc tesis), Universidad de Granada, Granada, España, recuperado de https://www.researchgate.net/publication/346717151_Camino_de_la_Transformacion_propuesta_tecnologica_para_el_avance_de_lo_s_Objetivos_de Desarrallo_Sostenible/figures?lo=1
 41. Mondal, P., Dang, G.S., Garg, M.O. **2011**, Syngas production through gasification and cleanup for downstream applications - Recent developments, *Fuel Process Technol*, 92(8), 1395–410. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.03.021>
 42. Ciferno, J.P., Marano, J.J. **2002**, Benchmarking Biomass Gasification Technologies for Fuels, Chemicals and Hydrogen Production, Prepared for U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory. Recuperado de <https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/BMassGasFinal.pdf>
 43. Luo, S., Xiao, B., Guo, X., Hu, Z., Liu, S., He, M. **2009**, Hydrogen-rich gas from catalytic steam gasification of biomass in a fixed bed



- reactor: Influence of particle size on gasification performance, *Int. J. Hydrogen Energy*, 34(3), 1260–1264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.10.088>
44. Erakhrumen, A.A. **2012**, Biomass Gasification: Documented Information for Adoption/Adaptation and Further Improvements toward Sustainable Utilisation of Renewable Natural Resources. ISRN Renew Energy, 536417. DOI: <https://doi.org/10.5402/2012/536417>
 45. Wongsiriamnuay, T., Kannang, N., Tippayawong, N. **2013**, Effect of operating conditions on catalytic gasification of bamboo in a fluidized bed, *Int. J. Chem. Eng.*, 297941. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/297941>
 46. Farzad, S., Mandegari, M.A., Görgens, J.F. **1976**, A critical review on biomass gasification, co-gasification, and their environmental assessments, *Biofuel Res J.*, 3(4):483–495. DOI: 10.18331/BRJ2016.3.4.3
 47. Mishra, S., Kumar, Upadhyay, R. **2021**, Review on biomass gasification: Gasifiers, gasifying mediums, and operational parameters, *Materials Science for Energy Technologies*, 4, 329–340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2021.08.009>
 48. Ahmad, A.A., Zawawi, N.A., Kasim, F.H., Inayat, A., Khasri, A. **2016**, Assessing the gasification performance of biomass: A review on biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation, *Renew Sustain Energy Rev.*, 53(C), 1333–1347. DOI: 10.1016/j.rser.2015.09.030
 49. Pérez, J., Borge, D., Agudelo, J. **2010**, Proceso de gasificación de biomasa : una revisión de estudios teórico – experimentales Biomass gasification process : theoretical and experimental studies a review, *Rev Fac Ing Univ Antioqui*, 52, 95–107. ISSN 0120-6230
 50. Ail, S.S., Dasappa, S. **2016**, Biomass to liquid transportation fuel via Fischer Tropsch synthesis - Technology review and current scenario, *Renew Sustain Energy Rev*, 58, 267–286. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.143>
 51. Lv, P., Yuan, Z., Wu, C., Ma, L., Chen, Y., Tsubaki, N. **2007**, Bio-syngas production from biomass catalytic gasification, *Energy Convers Manag*, 48(4), 1132–1139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.10.014>
 52. Srirangan, K., Akawi, L., Moo-Young, M., Chou, C.P. **2012**, Towards sustainable production of clean energy carriers from biomass resources, *Appl Energy*, 100, 172–186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.012>
 53. Rostrup-Nielsen, J., Christiansen, L.J. Concepts in Syngas Manufacture, Imperial College Press, Catalytic Science Series, World Scientific, **2011**, Dinamarca. DOI: <https://doi.org/10.1142/p717>
 54. Diario Digital Sol de Pando. **2014**, Avanza en Pando desarrollo de la energía solar y de electricidad generada por biomasa [Internet]. [cited 2023 Aug 29]. Available from: <https://www.soldepando.com/httpwww-soldepando-comp18557/>
 55. AECOM. (2021, October). Advanced Gasification Technologies - Review and Benchmarking. Recuperado de www.gov.uk/government/publications/advanced-gasification-technologies-review-and-benchmarking
 56. Duarte Coelho, R., Vásquez Lizcano, J.V., da Silva Barros, T.H., da Silva Barbosa, F., Veloso Leal, D.P., da Costa Santos, L. Lopes Riveiro, N., Fraga Júnior, E.F., Martin, D.L. **2019**, Effect of water stress on renewable energy from sugarcane biomass, *Renew. Sustain. Energy. Rev.*, **103**, 399–407. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.025>
 57. Arauzo, J., Bimbela, F., Ábrego, J., Sánchez, J.L., Gonzalo, A. 2014, Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa, An introduction to biomass valorisation technologies, Nro 3. Recuperado de: http://www.gecarbon.org/boletines/articulos/BoletinGEC_033-A01.pdf
 58. Bahng, M.K., Mukarakate, C., Robichaud, D.J., Nimlos, M.R. **2009**, Current technologies for analysis of biomass thermochemical processing: A review, *Anal. Chim. Acta.*, 651(2), 117–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2009.08.016>
 59. RESA: Grau, A., Farré, O. Situación y potencial de valorización energética directa de residuos, Estudio Técnico PER 2011–2020, I Roset, J.M., **2011**, Madrid.
 60. Qureshi, K.M., Kay Lup, A.N., Khan, S., Abnisa, F., Wan Daud, W.M.A. 2018, A technical review on semi-continuous and continuous pyrolysis process of biomass to bio-oil, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 131, 52–75. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2018.02.010>
 61. Zhu, Y., Bidy, M.J., Jones, S.B., Elliott, D.C., Schmidt, A.J. **2014**, Techno-economic analysis of liquid fuel production from woody biomass via hydrothermal liquefaction (HTL) and upgrading, *Appl. Energy.*, 129(15), 384–394. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.053>
 62. de Caprariis, B., De Filippis, P., Petruzzo, A., Scarsella, M. **2017**, Hydrothermal liquefaction of biomass: Influence of temperature and biomass composition on the bio-oil production, *Fuel*, 208, 618–625. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.054>
 63. Gollakota, A.R.K., Kishore, N., Gu, S. **2018**, A review on hydrothermal liquefaction of biomass, *Renew Sustain Energy Rev*, 81(Part 1), 1378–1392. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.178>
 64. Dimitriadis, A., Bezergianni, S. **2017**, Hydrothermal liquefaction of various biomass and waste feedstocks for biocrude production A state of the art review, *Renew Sustain Energy Rev.*, 68(Part 1), 113–125. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.120>
 65. Hognon, C., Delrue, F., Texier, J., Grateau, M., Thiery, S., Miller, H. **2015**, Comparison of pyrolysis and hydrothermal liquefaction of *Chlamydomonas reinhardtii*. Growth studies on the recovered hydrothermal aqueous phase, *Biomass and Bioenergy*, 73, 23–31. DOI: 10.1016/j.biombioe.2014.11.025
 66. Shah, A.A., Sharma, K., Haider, M.S., Toor, S.S., Rosendahl, L.A., Pedersen, T.H. **2022**, The Role of Catalysts in Biomass Hydrothermal Liquefaction and Biocrude Upgrading, *Processes*, 10(2). DOI: 10.3390/pr10020207
 67. Nagappan, S., Bhosale, R.R., Nguyen, D.D., Chi, N.T.L., Ponnusamy, V.K., Woong, C.S. **2021**, Catalytic hydrothermal liquefaction of biomass into bio-oils and other value-added products – A review, *Fuel*, 285, 119053. DOI: 10.1016/j.mset.2021.08.009
 68. Wijeyekoon, S., Torr, K., Corkran, H., Bennett, P. Commercial status of direct thermochemical liquefaction technologies, IEA Bioenergy, Task 34, **2020**.