

Aprovechamiento integral de madera bajo un enfoque de biorrefinería basada en procesos hidrotérmicos

**Carmina Reyes Plascencia^{1*}, Matías Cagno³, Pierre Cabot³,
Nestor Tancredi^{1,2}**

¹Energías Renovables Instituto Polo Tecnológico de Pando, Facultad de Química, Universidad de la República, Pando, 91000 Uruguay.

²Área de Fisicoquímica, DETEMA, Facultad de Química, Universidad de la República, Montevideo, 11800 Uruguay.

³Centro de Investigaciones en Biocombustibles 2G, Latitud – Fundación LATU, Montevideo, 11500 Uruguay.

*Autor para correspondencia: carmina@fq.edu.uy

1. Introducción

El cambio climático ligado a la actividad antropogénica y la incertidumbre de los precios y disponibilidad de fuentes de hidrocarburos fósiles han llevado a muchos países a buscar alternativas de combustibles y productos de base biológica.

Una de las opciones que se han propuesto como deseables para la transformación de la biomasa en este tipo de productos es la biorrefinería, que permite obtener una amplia gama de productos que van desde energéticos, producidos a granel, hasta productos de alto valor agregado, como los farmacéuticos. El término biorrefinería es adoptado como analogía a las refinerías de petróleo actuales, que producen múltiples combustibles y productos químicos a partir del petróleo (Kokossis *et al.*, 2014).

Según la Agencia Internacional de Energía (IEA) una biorrefinería es “Un procesamiento sostenible de la biomasa en un espectro de productos y energía comercializables” (IEA Bioenergy, 2009). Una definición más amplia es la propuesta por Moncada “Una biorrefinería es un sistema complejo, donde la biomasa se procesa o fracciona integralmente para obtener más de un producto que incluye bioenergía, biocombustibles, productos químicos y compuestos de alto valor añadido que solo se pueden extraer de fuentes de base biológica. Este último después de un estudio exhaustivo de las materias primas que se utilizarán y un diseño sostenible basado en las últimas tecnologías y enfoques de última generación que incluyen aspectos de los tres pilares de la sostenibilidad”(Moncada *et al.*, 2016).

Además de la versatilidad de productos, el enfoque de biorrefinería como un conjunto de operaciones unitarias interrelacionadas permiten que sean industrias con un uso de la energía más eficiente. Típicamente, todo el calor y parte de la electricidad utilizada en la planta es generada por la propia biorrefinería y la electricidad excedente es volcada a la red eléctrica (Azapagic, 2014) colaborando a la renovabilidad de la matriz eléctrica de la zona donde sea instalada.

Por otro lado, el uso de la biomasa como materia prima en las biorrefinerías acarrea diversos impactos benéficos tanto ambientales como sociales: la reducción de emisiones netas de gases de efecto invernadero, diversificación de la matriz energética, aumento de empleo en zonas rurales e inversión económica para la implementación de las tecnologías para su transformación, entre otros (Dale *et al.*, 2014), ver Figura 1.

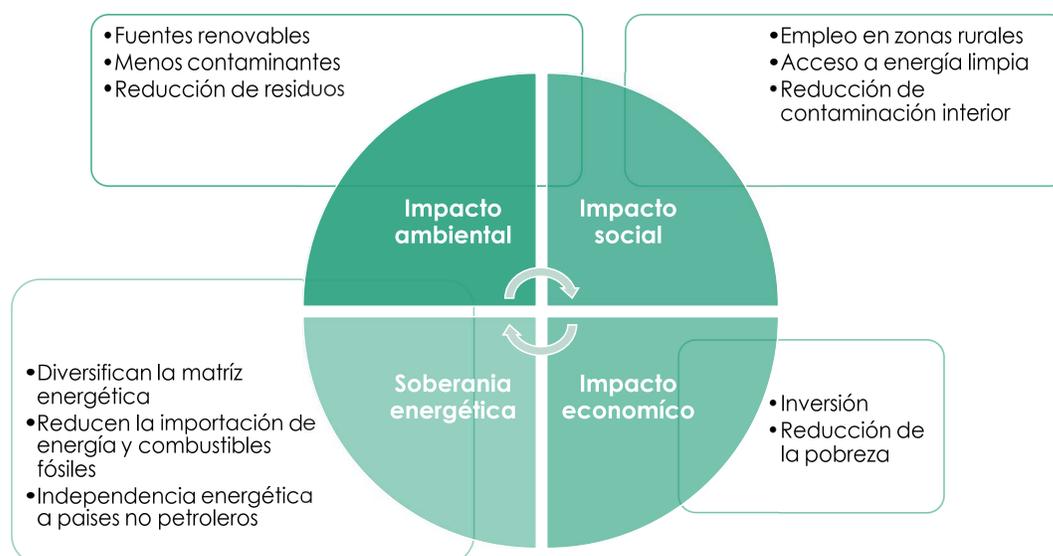


Figura 1. Impactos del uso de biomasa como materia prima de biorrefinería.

Sin embargo, su implementación aún presenta algunos retos, por ejemplo, la selección del portafolio de productos más rentables (Kokossis *et al.*, 2014), el uso integral de la biomasa, la optimización de los procesos de transformación, la flexibilidad en los tipos de materia prima, el escalado de los procesos.

2. Clasificación de las biorrefinerías según la materia prima

Las biorrefinerías pueden ser clasificadas según la biomasa que utilicen como materia prima. en primera, segunda o tercera generación, ver Figura 2, (Azapagic, 2014). Esta clasificación está ligada a la madurez de la tecnología para el procesamiento de la biomasa.

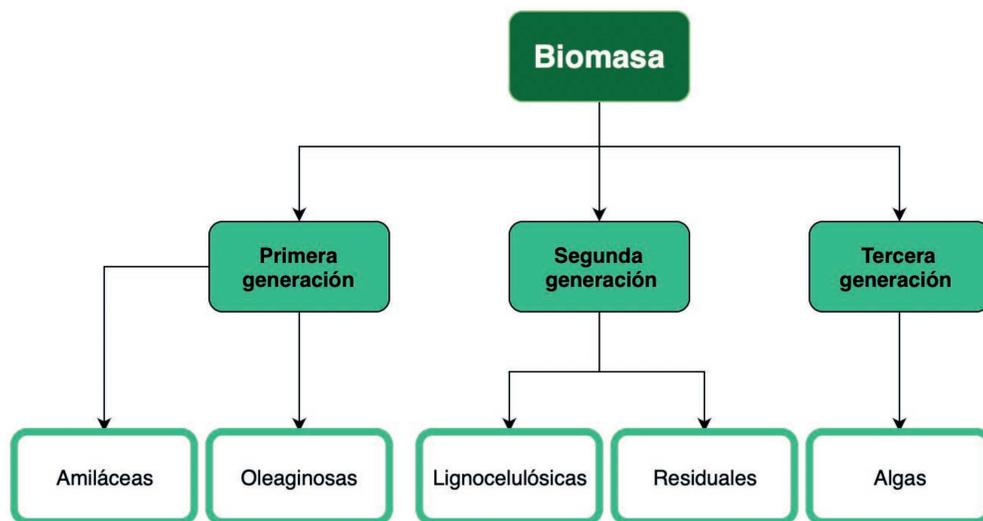


Figura 2. Generaciones de biorrefinería.

La primera generación (1G) se refiere a las biorrefinerías cuya materia prima proviene de biomasa comestible. Pueden ser biomosas oleaginosas que son fuentes de lípidos como la semilla de girasol, soya, lino, entre otros; alcoholígenas que son fuentes de monosacáridos o disacáridos como caña de azúcar, sorgo dulce o remolacha; o amiláceas como tubérculos o granos de cereales (de Lucas *et al.*, 2012). Este tipo de biomosas permiten obtener biocombustibles utilizando procesos microbiológicos, como la producción de bioetanol mediante la fermentación de glucosa, o procesos químicos, como la transesterificación de triglicéridos para la producción de biodiesel (Tajuddin *et al.*, 2016). Los métodos de transformación de este tipo de biorrefinerías son tecnológicamente maduros y se encuentran en escala comercial, como ejemplo se tiene el bioetanol 1G que representa el 80 % de los biocombustibles líquidos a nivel mundial (Azapagic, 2014).

A pesar de su amplia implementación, el uso de biomosas comestibles tiene algunos inconvenientes como el cambio de uso de suelo, la seguridad alimentaria, el aumento de uso de fertilizantes, entre otros. Esto ha llevado a cambiar el foco en biorrefinerías de segunda o tercera generación.

Las biorrefinerías de segunda generación (2G) utilizan biomasa lignocelulósica, incluyendo cultivos energéticos y residuos agrícolas o forestales, u otro tipo de residuo biomásicos para la producción de alimento animal, moléculas de interés y/o biocombustibles (Mohan *et al.*, 2016). Estas biomosas, a diferencia de la primera generación, no compiten por fuentes de alimento, su precio suele ser menor y en muchos casos permite una revalorización de sub-productos de otros procesos productivos. Sin embargo, su producción requiere de procesos más complicados ya que la estructura de este tipo de biomosas es compleja. En este capítulo se ahondará este tipo de biorrefinerías para el caso de residuos lignocelulósicos.

La tercera generación (3G) es referida al uso de algas, especialmente microalgas, como materia prima. Esta biomasa tiene diversas ventajas, una de las más notables es su rápida tasa de crecimiento y su eficiencia fotosintética, no es necesario el uso de

suelo y pueden ser cultivadas en efluentes residuales o con bajo contenido de nutrientes (Borowitzka *et al.*, 2013). Sin embargo, la madurez tecnológica para su uso aún es limitada.

Algunos autores (Moncada B *et al.*, 2016) mencionan una cuarta generación de biorrefinerías que utilizara el CO₂ como bloque de síntesis de otras moléculas.

3. Tipos de biorrefinería según el proceso de transformación

Las biorrefinerías también pueden diferenciarse según el tipo de procesos de transformación que se lleven a cabo para la obtención de los productos. Pueden basarse en procesos bioquímicos o termoquímicos o una combinación de ambos (Azapagic, 2014).

En las biorrefinerías bioquímicas se emplea el uso de microorganismos y/o enzimas para la transformación de la biomasa (Gonçalves *et al.*, 2016). Ejemplos de este tipo de procesos son la digestión anaerobia para la producción de biogás o la fermentación para la producción de alcoholes. Típicamente, este tipo de biorrefinerías requieren un pretratamiento de la biomasa que permita la accesibilidad de los componentes estructurales a los microorganismos, estos pretratamientos son de especial importancia en las biorrefinerías 2G.

Las biorrefinerías termoquímicas se basan en el uso de calor con o en ausencia de oxígeno (Azapagic, 2014). Entre los procesos termoquímicos se encuentra la combustión, gasificación, torrefacción, pirólisis y los métodos hidrotérmicos. Estos procesos suelen requerir un menor pretratamiento de la biomasa, por ejemplo, molienda para adecuar su talla y en algunos casos secado.

Las plantas bioquímicas se plantean para una menor inversión y capacidad con un procesamiento de alrededor de 10 ton día⁻¹ y € 25-50 millones por planta. Mientras que las termoquímicas se proponen de capacidades del orden de 100 ton día⁻¹ e inversiones de € 150-200 millones por planta (Kokossis *et al.*, 2014).

La integración de ambas rutas en uno o diversos puntos del procesamiento de la biomasa podría conducir a un aprovechamiento más eficiente aumentando la sostenibilidad del sistema. También contribuiría a la flexibilidad tanto de materias primas como de portafolio de productos (Kokossis *et al.*, 2014; Moncada *et al.*, 2016).

En este capítulo se presenta un caso de estudio de una biorrefinería 2G combinada para el aprovechamiento de biomasa lignocelulósicas. Este estudio se basa en el uso de procesos hidrotérmicos para su transformación, por lo que dichos procesos serán abordados con mayor profundidad.

4. Procesos hidrotérmicos en el contexto de una biorrefinería lignocelulósica

Los materiales lignocelulósicos son materias primas de gran interés en las biorrefinerías. Estos materiales pueden ser procesados mediante diversos procesos hidrotérmicos (PH) para la producción de materiales y/o biocombustibles sólidos, líquidos o gaseosos según las condiciones del proceso.

Los PH son procesos termoquímicos de transformación de la biomasa que se llevan a cabo en un medio rico en agua a temperaturas entre 150-600 °C y presiones

generalmente correspondientes a la presión de vapor de agua a la temperatura de trabajo (Reyes Plascencia *et al.*, 2021). Según la temperatura y el tiempo del proceso puede realizarse un pretratamiento de la biomasa o favorece el rendimiento de productos sólidos, líquidos o gaseosos, ver Figura 3.

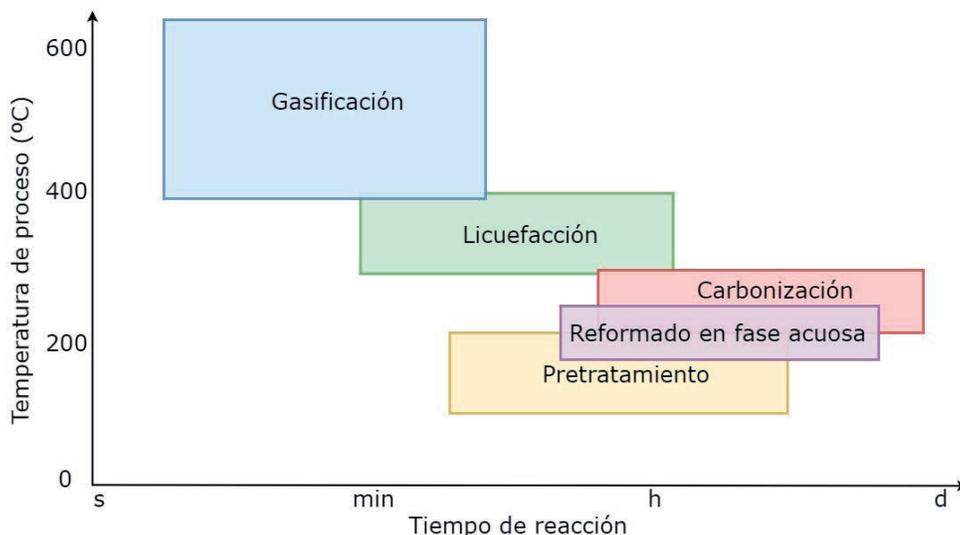


Figura 3. Procesos hidrotérmicos.

En el caso de la producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósicas es necesario que la celulosa sea fácilmente accesible para el proceso de hidrólisis. Entre los métodos de pretratamiento se encuentran los métodos alcalinos, ácidos, explosión de vapor (EV) y organosolv (Fregoso-Madueño *et al.*, 2017).

Una de las tecnologías más exitosas es la EV. Esta técnica consiste en someter la biomasa a un tratamiento hidrotérmico mediante la rápida introducción de vapor saturado a alta presión (160-260 °C; 0.69-4.83 MPa) durante un breve período de tiempo (segundos a minutos). Como resultado, se produce una disrupción mecánica de la matriz lignocelulósica y una reducción del tamaño de partícula de la biomasa pretratada, una vez que la presión se reduce rápidamente. Durante el proceso a alta presión, el vapor condensa y penetra la biomasa, lo que provoca una reacción de autohidrólisis debido a los ácidos orgánicos generados por los grupos acetilo de las hemicelulosas (Duque *et al.*, 2014).

Después del tratamiento, se produce un residuo que consta de una parte líquida y otra sólida. La fracción líquida contiene hemicelulosas parcialmente hidrolizadas y prácticamente todos los productos de degradación (ácidos orgánicos, fenoles, furfural e hidroximetilfurfural), mientras que en la fracción sólida insoluble permanecen la celulosa, la hemicelulosa residual y la lignina modificada químicamente (Pereira Ramos, 2003). Posteriormente, la fracción sólida es hidrolizada para liberar los azúcares que son fermentables por las levaduras para obtener bioetanol.

La producción de bioetanol 2G produce diversos sub-productos que pueden ser valorizados, como el remanente del hidrolizado rico en lignina. Debido a que esta corriente tiene

una alta humedad, el uso de procesos que no requieran el secado del material es deseable, por lo que los procesos hidrotérmicos son de interés.

La carbonización hidrotérmica tiene como principal producto un sólido carbonoso conocido como hydrochar. Durante este proceso la estructura de la lignina sufre diversas reacciones como la deshidratación, desmetilación, desalquilación y ruptura de enlaces éter (β -O-4) (Wikberg *et al.*, 2015). También se ha reportado la formación de radicales fenólicos que condensan y repolimerizan produciendo hydrochar (Wikberg *et al.*, 2015). El hydrochar obtenido consiste en partículas esféricas nanométricas formadas por una estructura reticular térmicamente más estable que la lignina con grupos funcionales en la superficie (Zhu *et al.*, 2014).

Este hydrochar puede ser utilizado para diversos fines, por ejemplo, materiales de almacenamiento de energía (Lang *et al.*, 2021), combustible (Kang *et al.*, 2012), catalizadores heterogéneos (Huang *et al.*, 2016), celdas de combustibles (Cuña *et al.*, 2017), remediador de suelos (Puccini *et al.*, 2018), producción de carbón activado (Rodríguez Correa *et al.*, 2017), entre otros.

Por otro lado, la valorización de esta corriente por licuefacción hidrotérmica (LHT) permite obtener biocrudo como producto principal, el cual, además de sus propiedades como biocombustible, está compuesto por moléculas de interés comercial como fenol, guaiacol, catecol, siringol, m-cresol, p-cresol y o-cresol (Feng *et al.*, 2018; Jiang *et al.*, 2018; Kang *et al.*, 2013; Pińkowska *et al.*, 2012; Singh *et al.*, 2015). También presenta propiedades antioxidantes que están directamente relacionadas a su contenido de sustancias fenólicas, lo que lo convierte en un potencial aditivo para mejorar la estabilidad oxidativa del biodiesel (Ye *et al.*, 2012).

Uno de los principales problemas de la LHT es la repolimerización de los subproductos que compromete el rendimiento del biocrudo (Mei *et al.*, 2018). Para enfrentar este problema una alternativa es el uso de co-solventes orgánicos que ayudan a obtener una mayor conversión de la biomasa y aumenta el rendimiento de biocrudo al disolver los productos de la degradación de la lignina evitando su repolimerización (Arturi *et al.*, 2017; Feng *et al.*, 2018; Ye *et al.*, 2012).

5. Caso de estudio

Introducción

Los residuos forestales son ampliamente producidos en Uruguay, lugar donde se desarrolló este trabajo, siendo el *Eucalyptus* y el *Pinus* los géneros de mayor producción, de los cuales existían más de 300 000 ha plantadas en el 2016 (Pou Ferrari, 2016). Aunque el volumen de eucalipto disponible es mayor, ya se encuentra comprometido para otros usos con buena demanda comercial (Paseyro, 2015). Por otro lado, el suministro de madera de pino supera varias veces la demanda (Uruguay XXI, 2021). De acuerdo con una encuesta reciente, los principales aserraderos del país reportaron que los residuos de madera de pino anhidro alcanzan las 477,090 toneladas anuales (Böthig *et al.*, 2021).

Debido a la amplia disposición de esta biomasa en el país, en este estudio se propone su valorización integral mediante la producción de biocombustibles y biocombuestos de

alto valor comercial. Para esto se conceptualizó una biorrefinería combinada basada en procesos hidrotérmicos tanto para el pretratamiento de la biomasa como para el aprovechamiento de la fase rica en lignina. El pretratamiento seleccionado para su estudio fue explosión por vapor y la LHT para la transformación de la lignina residual. Los detalles de los procesos se muestran en la Figura 4, dónde los recuadros en rojo son los procesos estudiados y los verdes corresponden a los productos principales.

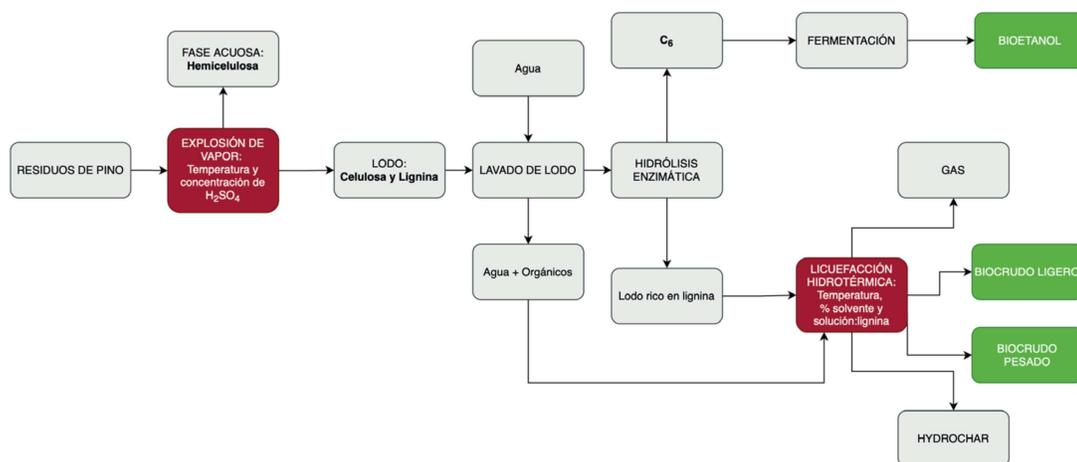


Figura 4. Proceso propuesto para la valorización de residuos lignocelulósicos.

Uno de los principales objetivos de este trabajo es estudiar el proceso de EV para favorecer la producción de bioetanol en las etapas posteriores ya que los procesos previos a la fermentación tienen una gran influencia en la composición y la fermentabilidad del hidrolizado. Es por ello que para poder optimizar la producción de bioetanol es necesario realizar un estudio exhaustivo de EV para saber cuál es su influencia en las etapas posteriores. Para ello se estudiaron las variables más relevantes del proceso como son: la temperatura del proceso, el tiempo de retención de la madera y el uso de catalizadores.

Otro de los objetivos principales de este trabajo es estudiar la influencia de las condiciones de reacción en el rendimiento y la composición del biocrudo producido por LHT de lignina. Para ello se estudiaron las variables de mayor influencia en el proceso como son: la temperatura, la relación solución:biomasa en el medio de reacción y el uso del bioetanol como co-solvente en el proceso.

Uno de los principales problemas de la LHT, desde un punto de vista ambiental, es la gran cantidad de agua que se utiliza en el medio de reacción, la cual debe ser tratada antes de su disposición final debido a la presencia de compuestos orgánicos. Una de las propuestas de este trabajo es disminuir el uso de agua en el proceso de transformación de la madera al utilizar el agua residual del lavado del lodo producido por EV en el proceso de LHT, ver Figura 4.

Metodología

Se recolectaron 200 kg de aserrín verdes donados por la empresa Frutifor (Tacuarembó, Uruguay). Estos fueron secados a 40 °C hasta 10 % de humedad para preservar su integridad y posteriormente fueron molidos y tamizados obteniendo partículas menores a 3 mm.

Las muestras fueron acondicionadas el día previo a ser tratadas, según su contenido de humedad, para alcanzar un valor de 30% de contenido de humedad final. En el caso que la muestra requería agregado de ácido, se hizo junto con el agregado del agua. Luego de finalizado el proceso, se recogió un barro que se separó en una fracción líquida y una sólida. La fracción sólida fue lavada 3 veces con agua a 60 °C, en una proporción de 5:1 en peso. Las muestras de fracción sólida, fracción líquida, las aguas de lavado y condensado obtenidas a partir del proceso de explosión por vapor, fueron reservadas para su posterior análisis.

Los ensayos de EV se realizaron en un rango de temperaturas de 180-200 °C por tiempo de retención de 10 min y se estudió el efecto del H₂SO₄ como catalizador (0-1 % m/m). El lodo rico en celulosa fue hidrolizado siguiendo el procedimiento NREL TP-5100-63351.

Luego de culminada la hidrólisis se procedió a separar el hidrolizado del barro rico en lignina. Se centrifugó el hidrolizado a 12000 rpm por 15 minutos y se separó el barro. El hidrolizado con mayor cantidad de glucosa fue seleccionado para su fermentación.

El lodo rico en lignina y el agua de lavado fueron utilizados como materia prima para la LHT. Para estudiar el efecto de las condiciones del proceso en el rendimiento de biocrudo se utilizó un diseño experimental Box-Behnken con triplicado en el punto central. Los parámetros estudiados fueron: la temperatura de reacción (250-350 °C), la relación solvente:lodo (S:L; 3:1-9:1) y la composición del solvente (0-100 % de etanol) utilizando un tiempo de retención de 90 min en todos los casos.

Las fracciones sólida y líquida rica en agua-etanol fueron recuperadas y filtradas para separarlas. Tanto el sólido como las paredes del reactor fueron lavadas con acetona y esta acetona de lavado fue filtrada. Este sólido, denominado hydrochar, se secó a 105 °C hasta peso constante. La solución de acetona fue evaporada al vacío para recuperar los compuestos orgánicos, los cuales fueron pesados y denominados como biocrudo pesado.

La fase líquida rica en alcohol se evaporó al vacío para recuperar el etanol y el agua. Los compuestos orgánicos remanentes fueron pesados y denominados como biocrudo ligero.

Los biocrudos fueron caracterizados por GC-MS con la finalidad de identificar compuestos de interés industrial.

6. Resultados

Explosión de vapor

Se observó que la variable más significativa del proceso de EV fue el agregado de ácido. A mayor severidad del tratamiento la composición de lignina insoluble en ácido en la fracción sólida fue mayor ya que se hidroliza una mayor cantidad de glucano y xilano. En la condición menos severa (180 °C sin agregado de ácido) sigue quedando un remanente de xilosa sin hidrolizar.

En cuanto al proceso de hidrólisis, se observó que a mayor severidad del pretratamiento se logra obtener una mayor concentración de azúcares libres. La condición que mostró mayor liberación de azúcares libres en solución es la condición de pretratamiento más severo (200 °C y 1% de H_2SO_4). Esto se debe a una mayor accesibilidad a las cadenas de celulosa por parte de la enzima, gracias a una mayor rotura de la matriz lignocelulósica. En las condiciones más severas se obtuvieron rendimientos de hidrólisis de 90 % en relación a la cantidad de glucano existente en la fracción sólida.

Se observó que los valores de rendimiento global, tomando en cuenta el pretratamiento y el hidrolizado, es maximizado con el agregado del ácido. El mayor rendimiento se consiguió con el pretratamiento más severo, logrando un rendimiento global de un 50%, según la cantidad de azúcares fermentables obtenidos en el hidrolizado con relación a la cantidad de glucano existente en la materia prima.

Licuefacción hidrotérmica

Se determinó la humedad del barro rico en lignina para realizar el ajuste de la relación S:L. La humedad obtenida fue de 75.47 ± 0.12 % (b.h.). En el caso de los ensayos donde la cantidad de fase acuosa fue mayor que la existente en el barro, se utilizó el agua de lavado para ajustarla. Por el contrario, en los ensayos donde el contenido de fase acuosa fue menor que la existente en el barro, éste se secó a 105 °C hasta peso constante, y en caso de ser necesario se agregó la cantidad de fase acuosa utilizando agua de lavado.

Se observó que el rendimiento del biocrudo ligero obtenido varía entre 3.0-25.7 % siendo la relación S:L y la concentración de etanol en el medio los parámetros de mayor influencia. Con los resultados obtenidos se realizó un análisis ANOVA. Se obtuvo una ecuación lineal estadísticamente significativa, donde los términos que tienen influencia en el rendimiento del biocrudo ligero son la relación S:L y la presencia de etanol en el medio. La temperatura no fue un término estadísticamente significativo por lo que este parámetro no fue incluido en el modelo refinado. Los resultados de este análisis se presentan en la Figura 5. Se observa que el biocrudo es maximizado al trabajar con concentración elevada de etanol en el medio de reacción y alto contenido de solvente. El poder calorífico inferior de este biocrudo estimado por su composición elemental es dependiente de las condiciones del proceso, rondando entre 16.1 - 26.1 MJ kg^{-1} .

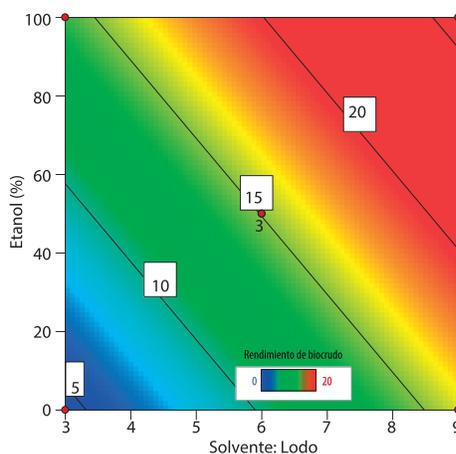


Figura 5. Predicción del rendimiento de biocrudo ligero (los puntos rojos representan las condiciones ensayadas experimentalmente).

En tanto que el rendimiento del biocrudo pesado varía entre 41.2-2.4 % en las condiciones del proceso estudiadas siendo, al igual que para el ligero, la relación S:L y la concentración de etanol en el medio los parámetros de mayor influencia. El poder calorífico inferior de este biocrudo es mayor que el del biocrudo ligero, rondando entre 23.4-33.3 MJ kg⁻¹. En la Figura 6, se presenta las predicciones de los rendimientos obtenidos con el análisis ANOVA. La temperatura no es presentada en el análisis ya que no fue un parámetro estadísticamente significativo en el modelo. Se observó que este biocrudo aumenta su rendimiento con una mezcla de etanol-agua en el medio de reacción y al trabajar con alto contenido de solvente.

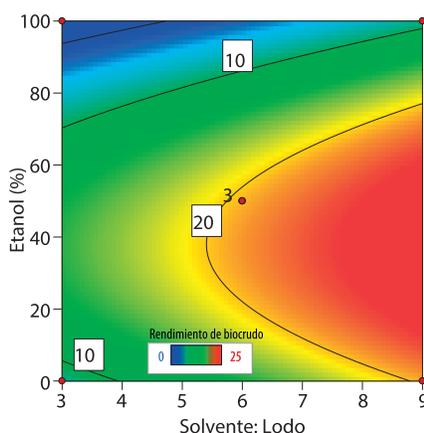


Figura 6. Predicción del rendimiento de biocrudo pesado (los puntos rojos representan las condiciones ensayadas experimentalmente).

Conclusiones del caso de estudio

Mediante este estudio se propuso una ruta de valorización de los residuos lignocelulósicos nacionales utilizando una biorrefinería combinada, basada en procesos hidrotérmicos en la fase del pretratamiento de la biomasa y en la valorización de la lignina residual de la producción de bioetanol. Se optimizaron las condiciones de EV obteniendo los máximos rendimientos de glucosa a 200 °C utilizando H₂SO₄ 1% m/m. Las condiciones de LHT también fueron optimizadas. Se determinó que el biocrudo ligero es maximizado al trabajar con etanol mientras que el pesado con una mezcla de etanol-agua, ambos biocrudos son favorecidos a altas relaciones S:L. El máximo rendimiento de biocrudo (ligero + pesado) fue de 41.3 % obtenido a 350 °C, 50 % de etanol y S:L 9:1. Además se identificaron en los biocrudos compuestos como fenoles y benzaldehídos que son de interés para la industria química. Se determinó que con los rendimientos máximos obtenidos es posible producir 52 kg de etanol y 196 kg de biocrudo por tonelada de biomasa.

7. Conclusiones generales

El desarrollo de biorrefinerías ha cobrado mayor interés debido al aumento de gases de efecto invernadero y problemáticas ligadas a la seguridad energética. Uno de los principales focos es el desarrollo de biorrefinerías 2G que permitan la utilización de biomasa residual y/o lignocelulósicas como materia prima. Su implementación permitirá por un lado un mejor manejo de los residuos y por otro la generación de combustibles y compuestos químicos de base biológica limitando la dependencia de los recursos fósiles.

Se espera que este tipo de instalaciones integren procesos bioquímicos y termoquímicos que permitan optimizar el aprovechamiento de la biomasa y maximizar el portafolio de productos. Se busca que la recuperación de sustancias de alto valor agregado en conjunto con la producción de biocombustibles permita disminuir el costo final de los biocombustibles haciéndolos competitivos con los combustibles fósiles.

En este trabajo se propone la valorización de residuos lignocelulósicos nacionales mediante biorrefinería 2G que utiliza procesos hidrotérmicos en conjunto con bioquímicos para el procesamiento de la biomasa. Mediante la ruta propuesta fue posible obtener bioetanol 2G y biocrudo, ambos con la posibilidad de ser utilizados como biocombustibles e insumo en la industria química.

La implementación a gran escala de las biorrefinerías 2G requiere de conocimientos multidisciplinarios que garanticen la óptima configuración y funcionamiento de la biorrefinería, aseguren su viabilidad económica y garanticen la sostenibilidad de todos los procesos relacionados con su funcionamiento, además de la implementación de políticas regulatorias que impulsen su desarrollo. Sin embargo, la transición a una economía circular y verde requiere del impulso de este tipo de tecnologías.

8. Bibliografía

- Arturi, K.R., Strandgaard, M., Nielsen, R.P., Søgaaard, E.G., & Maschietti, M. (2017). Hydrothermal liquefaction of lignin in near-critical water in a new batch reactor: Influence of phenol and temperature. *The Journal of Supercritical Fluids*, 123, 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2016.12.015>
- Azapagic, A. (2014). Sustainability considerations for integrated biorefineries. *Trends in Biotechnology*, 32(1), 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.10.009>
- Borowitzka, M.A., & Moheimani, N.R. (2013). Sustainable biofuels from algae. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(1), 13–25. <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9271-9>
- Böthig, S., & Arrejuría, S. (2021). *Residuos de la cadena de transformación mecánica de la madera en Uruguay*. Retrieved from https://www.latitud.org.uy/media/Stephany-Arrejuria_Residuos-de-la-cadena-de-transformación-mecánica-de-la-madera-en-Uruguay.pdf

- Cuñá, A., Reyes Plascencia, C., da Silva, E.L., Marcuzzo, J., Khan, S., Tancredi, N., Baldan, M.R., & de Fraga Malfatti, C. (2017). Electrochemical and spectroelectrochemical analyses of hydrothermal carbon supported nickel electrocatalyst for ethanol electro-oxidation in alkaline medium. *Applied Catalysis B: Environmental*, 202, 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.08.063>
- Dale, B.E., Anderson, J.E., Brown, R.C., Csonka, S., Dale, V.H., Herwick, G., Jackson, R.D., Jordan, N., Ka, S., Kline, K.L., Lynd, L.R., Malmstrom, C., Ong, R.G., Richard, T.L., Taylor, C., & Wang, M.Q. (2014). Take a Closer Look: Biofuels Can Support Environmental, Economic and Social Goals. *Environmental Science & Technology*, 48(13), 7200–7203. <https://doi.org/10.1021/es5025433>
- De Lucas, A., & Taraco, C. (2012). *Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad* (ITAGRA, Vol. 1).
- Duque, A., Manzanares, P., Ballesteros, I., Negro, M.J., Oliva, J.M., González, A., & Ballesteros, M. (2014). Sugar production from barley straw biomass pretreated by combined alkali and enzymatic extrusion. *Bioresource Technology*, 158, 262–268. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.041>
- Feng, S., Wei, R., Leitch, M., Xu, C.C., Charles, C., & Xu, C.C. (2018). Comparative study on lignocellulose liquefaction in water, ethanol, and water/ethanol mixture: Roles of ethanol and water. *Energy*, 155, 234–241. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.023>
- Fregoso-Madueño, J.N., Goche-Télles, J.R., Rutiaga-Quiñones, J.G., González-Laredo, R.F., Bocanegra-Salazar, M., & Chávez-Simental, J.A. (2017). Usos alternativos de los desechos de la industria del aserrío. In *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* (Vol. 23, Issue 2, pp. 243–260). Universidad Autónoma Chapingo. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.06.040>
- Gonçalves, F.A., Ruiz, H.A., Silvino dos Santos, E., Teixeira, J.A., & de Macedo, G.R. (2016). Bioethanol production by *Saccharomyces cerevisiae*, *Pichia stipitidis* and *Zymomonas mobilis* from delignified coconut fibre mature and lignin extraction according to biorefinery concept. *Renewable Energy*, 94, 353–365. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.045>
- Huang, M., Luo, J., Fang, Z., & Li, H. (2016). Biodiesel production catalyzed by highly acidic carbonaceous catalysts synthesized via carbonizing lignin in sub- and super-critical ethanol. *Applied Catalysis B: Environmental*, 190, 103–114. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.02.069>
- IEA Bioenergy. (2009). *Biorefineries: adding value to the sustainable utilisation of biomass*.
- Jiang, W., Kumar, A., & Adamopoulos, S. (2018). Industrial Crops & Products Liquefaction of lignocellulosic materials and its applications in wood adhesives – A review. *Industrial Crops & Products*, 124(July), 325–342. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.07.053>
- Kang, S., Li, X., Fan, J., & Chang, J. (2012). Solid fuel production by hydrothermal carbonization of black liquor. *Bioresource Technology*, 110, 715–718. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.093>
- Kang, S., Li, X., Fan, J., & Chang, J. (2013). Hydrothermal conversion of lignin: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 546–558. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.013>

- Kokossis, A.C., Tsakalova, M., & Pyrgakis, K. (2014). Design of integrated biorefineries. *Computers and Chemical Engineering*, 81, 40–56. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.05.021>
- Lang, J., Matějová, L., Cuentas-Gallegos, A.K., Lobato-Peralta, D.R., Ainassaari, K., Gómez, M.M., Solís, J. L., Mondal, D., Keiski, R. L., & Cruz, G. J. F. (2021). Evaluation and selection of biochars and hydrochars derived from agricultural wastes for the use as adsorbent and energy storage materials. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105979>
- Mei, Q., Shen, X., Liu, H., & Han, B. (2018). Selectively transform lignin into value-added chemicals. *Chinese Chemical Letters*, 30, 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2018.04.032>
- Mohan, S.V., Butti, S.K., Amulya, K., Dahiya, S., & Modestra, J.A. (2016). Waste Biorefinery: A New Paradigm for a Sustainable Bioelectro Economy. In *Trends in Biotechnology* (Vol. 34, Issue 11, pp. 852–855). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2016.06.006>
- Moncada, B.J., Aristizábal, M.V., & Cardona, A.C.A. (2016). Design strategies for sustainable biorefineries. *Biochemical Engineering Journal*, 116, 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2016.06.009>
- Paseyro, J. (2015). Más vale especie conocida que otra por conocer. *Forestal*, 16–22.
- Pereira Ramos, L. (2003). The chemistry involved in the steam treatment of lignocellulosic materials. *Quim. Nova*, 26(3), 863–871. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422003000600015>
- Pińkowska, H., Wolak, P., & Złocińska, A. (2012). Hydrothermal decomposition of alkali lignin in sub- and supercritical water. *Chemical Engineering Journal*, 187, 410–414. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.01.092>
- Pou Ferrari, R. (2016). *Forestación en Uruguay* (Primera). Montevideo: Plus-ultra.
- Puccini, M., Ceccarini, L., Antichi, D., Seggiani, M., Tavarini, S., Latorre, M.H., & Vitolo, S. (2018). Hydrothermal carbonization of municipal woody and herbaceous prunings: Hydrochar valorisation as soil amendment and growth medium for horticulture. *Sustainability (Switzerland)*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/su10030846>
- Reyes Plascencia, C., & Tancredi, N. (2021). Valorización de los residuos sólidos municipales: conveniencia de los métodos hidrotérmicos. In B. Velázquez Martí (Ed.), *Optimización de los procesos de extracción de biomasa sólida para uso energético* (1st ed., Vol. 1, pp. 273–291). España: Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).
- Rodríguez Correa, C., Stollovsky, M., Hehr, T., Rauscher, Y., Rolli, B., & Kruse, A. (2017). Influence of the Carbonization Process on Activated Carbon Properties from Lignin and Lignin-Rich Biomasses. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 5(9), 8222–8233. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b01895>
- Singh, R., Balagurumurthy, B., Prakash, A., & Bhaskar, T. (2015). *Bioresource Technology Catalytic hydrothermal liquefaction of water hyacinth*. 178, 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.08.119>

- Tajuddin, N.A., Lee, A.F., & Wilson, K. (2016). Production of biodiesel via catalytic upgrading and refining of sustainable oleagineous feedstocks. In *Handbook of Biofuels Production: Processes and Technologies: Second Edition* (pp. 121–164). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100455-5.00006-0>
- Uruguay XXI. (2021). *Sector forestal en Uruguay*. Retrieved <https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/a29771e03cc49e42fe516c01b0d271dc0fcf4cbe.pdf/>
- Wikberg, H., Ohra-Aho, T., Pileidis, F., & Titirici, M.M. (2015). Structural and Morphological Changes in Kraft Lignin during Hydrothermal Carbonization. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 3(11), 2737–2745. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b00925>
- Ye, Y., Fan, J., & Chang, J. (2012). Effect of reaction conditions on hydrothermal degradation of cornstalk lignin. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 94, 190–195. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.12.005>
- Zhu, Z., Toor, S. S., Rosendahl, L., & Chen, G. (2014). Analysis of Product Distribution and Characteristics in Hydrothermal Liquefaction of Barley Straw in Subcritical and Supercritical Water. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(3), 737–743. <https://doi.org/10.1002/ep.11977>