

## **Propuesta de análisis de riesgo y sensibilidad de biorrefinería de residuos de industrialización primaria de pino en la región NEA**

Rocio E. Cardozo <sup>a</sup>, María E. Vallejos <sup>a</sup>, Nicolás M. Clauser <sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> *Instituto de Materiales de Misiones (IMAM, CONICET-UNaM) Posadas, Misiones, Argentina.*

<sup>b</sup> *Facultad de Ingeniería, Oberá, Misiones, Argentina.*

e-mails: rociocardozo10@gmail.com, marixavallejos@gmail.com, nicolas.clauser@gmail.com

---

### **Resumen**

El presente trabajo constituye un plan de tesis del doctorado en Ciencias Aplicadas en el que se describen las actividades propuestas. El concepto de biorrefinería forestal es análogo al de refinerías de petróleo, pero planteando su implantación dentro de las fábricas de pulpa celulósica. Mediante conversión química, termoquímica y biológica de la biomasa pueden obtenerse: químicos, plásticos, energía, etanol, biogás, carbón, otros combustibles. La originalidad del tema consiste en la determinación de las variables críticas de estos esquemas de biorrefinería y su influencia en los indicadores técnicos y económicos empleados. En base a los resultados que se alcancen en las actividades se identificarán las principales fuentes de incertidumbre las cuales serán analizadas mediante técnicas que se presentan en el desarrollo de este trabajo.

*Palabras Clave* – *Biorrefinería, Residuos Foresto Industriales, Análisis de Riesgo y Sensibilidad*

### **1. Introducción**

Los residuos foresto industriales y agroindustriales constituyen recursos naturales renovables disponibles en grandes cantidades y de bajo costo. Su único uso directo hasta el momento se basa en su valor energético tal cual. La aplicación de nuevas tecnologías permitiría aprovechar mejor este tipo de residuos y valorizarlos. La principal dificultad para la implementación del concepto es encontrar un método de fraccionamiento que provea los resultados buscados, por lo que se requiere del desarrollo y optimización de los procesos de fraccionamiento.

El grupo de investigación viene trabajando en el tema de fraccionamiento de la biomasa y aprovechamiento de subproductos desde 1998, generando libros, capítulos, artículos y presentaciones en eventos relacionados con los diferentes componentes extraídos de las materias primas lignocelulósicas y sus usos. Buena parte de estudios se han realizado en colaboración con grupos nacionales o internacionales. Hasta el momento se ha avanzado en la separación y utilización de lignina, y en la obtención de vainillina, xilitol, bioetanol, ácidos carboxílicos (ácido levulínico), materiales compuestos y nanocelulosa.

El Programa de Celulosa y Papel (PROCyP), inició investigaciones en 1996 en temas relacionados con fraccionamiento de materiales lignocelulósicos, separación de componentes de los licores residuales y aprovechamiento de subproductos, dando lugar a numerosas presentaciones y publicaciones.

El análisis se centra en el modelo de biorrefinería de plataforma química con el fin de establecer potenciales oportunidades para la industria forestal de la Región NEA. En análisis previos, se

realizó el estudio técnico y económico de diferentes esquemas, empleando procesos desarrollados por el grupo de investigación [9, 19].

Se identificarán las principales fuentes de incertidumbre, las cuales serán analizadas mediante técnicas de ingeniería económica como el Análisis de Equilibrio de un solo factor y las Gráficas de Sensibilidad para conocer los efectos combinados de dos o más factores. Se determinará cómo afectan a la economía del proceso las diferentes variables estudiadas. Se definirá el esquema tecnológico más conveniente desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

### *1.1. Hipótesis*

La Hipótesis de trabajo es que se pueden obtener productos de alto valor a partir de residuos forestales de pino de la región NEA, aprovechando integralmente estos materiales lignocelulósicos mediante el diseño de esquemas tecnológicos que sean factibles técnico-económicamente, basados en procesos de baja contaminación y a escala PYME.

### *1.2. Objetivo General*

El objetivo general de este trabajo es analizar mediante herramientas de análisis de riesgo y sensibilidad los diferentes esquemas de biorrefinería de residuos de industrialización primaria de pino en la Región NEA. Para esto se cuenta con diferentes esquemas de biorrefinería desarrollados en el Instituto de Materiales de Misiones (IMAM), además de información actualizada en diversas bases de datos especializadas. Se realizará la adaptación y combinación de procesos de separación y purificación, para lograr el aprovechamiento integral de la materia prima en la producción de productos intermedios (extractivos, celulosa, hemicelulosas y lignina), biocombustibles (bioetanol) biomateriales (nanocelulosa) y bioenergía (pellets, vapor de proceso y electricidad). Los resultados que se obtengan con el desarrollo de este tema de tesis disminuirán la incertidumbre sobre el comportamiento de estas industrias en la región, ayudando a la toma de decisión de los grupos inversores.

### *1.3. Objetivos específicos*

Los objetivos específicos abarcan:

1. Actualizar los diagramas de flujo de biorrefinería de residuos de industrialización primaria de la madera a partir de resultados preliminares obtenidos en el IMAM y en base al diseño y modelado de los diagramas de flujo, realizar el cálculo de los balances de masa y energía de los nuevos esquemas tecnológicos.

2. Estimar los flujos costos-ingresos, indicadores económicos (TIR, VAN, etc.) del proyecto para el desempeño técnico deseado y el rendimiento económico de los esquemas seleccionados en el marco de las consideraciones económicas adoptadas. Además, la definición de parámetros que permitan estimar los valores para alcanzar esquemas rentables.

4. Determinar las funciones de probabilidad de las variables que se consideren críticas de cada escenario de manera de determinar cómo afectan las diferentes variables a los esquemas propuestos.

5. Emplear técnicas cuantitativas para determinar la probabilidad y el impacto de los posibles riesgos en cada uno de los esquemas seleccionados mediante las técnicas de análisis de sensibilidad, simulación (Montecarlo) y Árboles de decisiones en las variables que intervienen.

6. Determinar los riesgos más importantes que podrían afectar los esquemas seleccionados con la finalidad de contemplarlos en los indicadores económicos.

7. Definir los criterios para la toma de decisiones bajo incertidumbre y riesgo.

## **2. Tema propuesto**

### *2.1. Novedad científica*

La originalidad del tema consiste en la determinación de las variables críticas de estos esquemas de biorrefinería y su influencia en los indicadores técnicos y económicos empleados. La aplicación de estos modelos de biorrefinería podría extenderse a otros residuos lignocelulósicos generados por la industria forestal. Las variables determinadas permitirán un mayor conocimiento de los procesos y una mejor predicción de los costos de operación, aportando al conocimiento de la viabilidad de la instalación de biorrefinerías a escala PYME. Esto facilitará un acercamiento a la transferencia de estas tecnologías a aserraderos o grupos de aserraderos concentrados en cooperativas.

### *2.2. Antecedentes*

Una biorrefinería es una estructura que integra procesos de producción de combustibles y productos químicos a partir de biomasa. Esto permite el uso eficiente de las materias primas y los procesos, integrando la generación de energía con la fabricación de una amplia gama de productos de alto valor agregado, lo que generará una nueva cadena de valor ambiental y económicamente sostenible. El concepto de biorrefinería forestal es análogo al de refinerías de petróleo, que producen múltiples combustibles, pero planteando su implantación dentro de las fábricas de pulpa celulósica. Mediante conversión química, termoquímica y biológica de la biomasa pueden obtenerse: químicos, plásticos, energía, etanol, biogás, carbón, otros combustibles.

La evaluación técnica y económica de los esquemas de biorrefinería es compleja debido principalmente a la incertidumbre relacionada con el costo y tipo de la biomasa lignocelulósica, el costo de la energía, el costo de producción y el precio de mercado de los productos finales, el costo de la inversión, y los procesos y las tecnologías empleadas.

El diseño de una biorrefinería se basa en los principios del diseño de procesos químicos tradicionales. Sin embargo, se deben tener en cuenta algunos aspectos particulares relacionado con el fraccionamiento de la biomasa. Un aspecto importante es la selección de los productos a desarrollar en estos esquemas. La producción de algunos productos de alto valor agregado podría tener una perspectiva incierta que puede surgir del mercado (tiempo de desarrollo, reacción del mercado ante los nuevos bioproductos, etc.). También se debe tener en cuenta que los productos con bajo valor agregado podrían no generar suficientes beneficios económicos que justifiquen la inversión.

Otro aspecto importante es el diseño de procesos para el fraccionamiento de la biomasa, ya que esta presenta diferentes tipos de estructuras y composiciones químicas. Esto podría generar mayores

incertezas relacionadas con los procesos de pretratamiento, sí se compara con los procesos químicos tradicionales, que suelen ser las etapas más costosas del esquema de biorrefinería.

La provisión a la planta es diferente al de las industrias químicas tradicionales: las fuentes puntuales y las tuberías son características comunes de la industria química basada en el petróleo, mientras que la biomasa se extiende a áreas grandes, generalmente remotas, con un rendimiento relativamente bajo por unidad de área. Por otro lado, el suministro de un recurso de biomasa similar, la madera, actualmente está bien administrado por la industria forestal. El tercer factor importante relacionado con las materias primas es la naturaleza de los recursos de biomasa dedicados en el futuro y sus propiedades y costos como materia prima de biorrefinería.

Los residuos foresto industriales y agroindustriales constituyen recursos naturales renovables disponibles en grandes cantidades y de bajo costo. Estos residuos lignocelulósicos no se aprovechan adecuadamente, y su acumulación contribuye con la contaminación del entorno del NEA. Su único uso directo hasta el momento se basa en su valor energético tal cual. La contaminación ambiental generada por la quema de estos residuos preocupa a los pobladores de varias localidades. La biomasa lignocelulósica se revela como una fuente importante de materias primas dado su carácter poco contaminante. Su aprovechamiento integral permite la obtención de combustibles (bioetanol) y variedad de otros productos, evitando la contaminación del aire producida por la quema, permitiendo además disminuir la presión creciente sobre los recursos naturales generados por el avance de la frontera agrícola. La aplicación de nuevas tecnologías permitiría aprovechar mejor este tipo de residuos y valorizarlos.

La principal dificultad para la implementación del concepto de biorrefinería es encontrar un método de fraccionamiento que provea los resultados buscados, por lo que se requiere del desarrollo y optimización de los procesos de fraccionamiento de baja contaminación, así como técnicas de separación de los componentes orgánicos disueltos en los licores residuales del fraccionamiento. Además, para conseguir una implantación comercial de las biorrefinerías sería necesario, entre otras cuestiones, disminuir los costes asociados, incrementar la eficiencia de las conversiones a bioenergía y bioproductos, así como también la optimización y un escalado correcto de los procesos. Factores estrechamente vinculados con la investigación y la innovación [1]. Por ello, los esquemas tecnológicos propuestos deben ser viables desde el punto de vista técnico y económico [2–5].

El análisis técnico-económico convencional usado en el diseño de plantas industriales puede ser empleado en las primeras etapas de diseño de una biorrefinería. En este caso, los costos de capital, operación y mantenimiento se determinan utilizando métodos simplificados (factor de costo-capacidad) o detallados (datos de equipos y cotizaciones de proveedores). Esto conlleva a cierto grado de incertidumbre en los resultados debido a los diferentes niveles de precisión en los métodos de análisis utilizados, un estudio reciente demostró la gran variabilidad que implica realizar un análisis técnico económico, para un mismo esquema teniendo en cuenta diferentes suposiciones económicas y financieras [6]. Comúnmente, se estiman los costos de capital del proceso desarrollado y los resultados se expresan en términos del VAN y la TIR. Los análisis de riesgos y de sensibilidad son casi siempre utilizados para identificar y comprender los factores de costo más importantes en el diseño de la biorrefinería. Las incertidumbres se deben a: (i) que muchos de los

potenciales productos no se venden en los mercados actuales, por lo que los precios y la demanda real del mercado son desconocidos lo cual afecta al análisis económico, y (ii) que los esquemas tecnológicos y procesos involucrados son nuevos o están en desarrollo, lo que limita la cantidad de datos reales o disponibles para el análisis técnico.

En el diseño del proceso, los principales factores de incertidumbre están relacionadas con (i) el esquema tecnológico propuesto (constantes cinéticas, propiedades físicas, coeficientes de transferencia), (ii) los procesos involucrados (variaciones de caudal y temperatura, fluctuaciones de calidad de la corriente, etc.), (iii) externas, (disponibilidad de materias primas, demandas de los productos, precios y condiciones ambientales) y (iv) discreto (disponibilidad del equipo y otros sucesos aleatorios).

El análisis de riesgos consiste básicamente de cuatro etapas: (1) identificación del origen de la incertidumbre, (2) cuantificación de estas incertidumbres, (3) formulación de la incertidumbre para el análisis de riesgos, y (4) cuantificación del riesgo. En el análisis técnico-económico, el método de análisis de riesgos debe seleccionarse según la etapa de diseño del proceso, las fuentes de incertidumbre y la disponibilidad de la información.

Actualmente existen diferentes métodos y herramientas para el análisis riesgos y sensibilidad de proyectos [7–9]. Los análisis de sensibilidad más comunes empleados, son los análisis por variable, cuando solamente una variable varía a la vez. Sin embargo, puede ocurrir que dos o más variables varíen a la vez, en ese caso estaríamos frente a un análisis por escenarios. En el caso de un análisis de riesgos, existen métodos como la Simulación de Montecarlo, que permiten estimar el riesgo por medio de técnicas estadísticas para valorizarlos. En este sentido un análisis de riesgos y sensibilidad, dónde es posible utilizar estas herramientas conjuntamente con la incorporación de determinados indicadores, ayudaría en gran medida a tener una mayor certeza de las variables críticas empleadas para la determinación de los indicadores económicos. Además de una mejor predicción de los costos de operación y la viabilidad de la instalación de biorrefinerías a escala PYME (aserraderos o grupos de aserraderos concentrados en cooperativas, ingenios azucareros).

El grupo de trabajo inició investigaciones en 1996 en temas relacionados con fraccionamiento de materiales lignocelulósicos, separación de componentes de los licores residuales y aprovechamiento de subproductos, dando lugar a numerosas presentaciones y publicaciones. Se presentan aquí las más relacionadas con el tema actual [10–16].

El análisis estará centrado en el modelo de biorrefinería de plataforma química con el fin de establecer potenciales oportunidades para la industria forestal de la Región NEA. En análisis previos, se realizó el estudio técnico y económico de diferentes esquemas [17–24], empleando procesos desarrollados por el grupo de investigación [10,12–16], además se realizó un estudio de localización de una planta de acopio de residuos forestales para el montaje de una biorrefinería [25].

En el Instituto de Materiales de Misiones se está trabajando sobre procesos y productos, mediante becas de CONICET, CIN, CEDIT (de la Provincia de Misiones) y acuerdo de colaboración con diferentes instituciones, y se han desarrollado procesos utilizando materias primas como bagazo de caña de azúcar y aserrín de pino, entre otros.

### 2.3. *Factibilidad*

Los antecedentes en investigaciones en este campo se centran en la búsqueda de procesos más competitivos, que puedan ser utilizados por parte de los pequeños y medianos productores regionales. Estos trabajos han generado una gran cantidad de datos experimentales sobre condiciones de procesamientos, rendimientos, composiciones de las fracciones (sólidas o líquidas), datos cinéticos, entre otros, que serán usados para la simulación de los procesos. En el marco de los diferentes proyectos desarrollados en los últimos años se han analizado diferentes esquemas de biorrefinerías. Los resultados de estos estudios fueron publicados en revista con referato y en eventos científicos y técnicos sobre el tema [17–24].

La Dra. Vallejos es Magister en Dirección Técnica de Empresa (Universidad de Girona, España, 2004) y cuenta con una sólida formación en el análisis económico de empresas y dirección estratégica de la gestión técnica. El Dr. Clauser, ha realizado su tesis doctoral sobre “Viabilidad técnico-económica de la biorrefinería de los residuos de industrialización primaria de la madera”, ha trabajado en la aplicación de métodos de estimaciones rápidas de costos e inversiones y herramientas para el análisis de riesgo y sensibilidad de los esquemas de biorrefinería en colaboración con el grupo “Conversion Economics and Sustainability” en North Carolina State University (NCSU), además, actualmente se encuentra trabajando sobre análisis de riesgos, sensibilidad y ambientales en esquemas de biorrefinerías.

### 3. **Resultados esperados**

Con las propuestas y mejoras que se obtengan se buscará disminuir la incertidumbre que poseen los emprendimientos a escala pyme, particularmente aserraderos y plantas de celulosa y papel del NEA basados en biomasa más específicamente los residuos lignocelulósicos de madera.

En base a los resultados que se alcancen en las actividades, se identificarán las principales fuentes de incertidumbre las cuales serán analizadas mediante técnicas de ingeniería económica como el Análisis de Equilibrio de un solo factor y las Gráficas de Sensibilidad para conocer los efectos combinados de dos o más factores. Se determinará cómo afectan a la economía del proceso las diferentes variables estudiadas. Se empleará un software específico para tal fin (por ejemplo @Risk, Crystall ball, entre otros). Se construirá un modelo analítico para representar la situación real de toma de decisiones y se desarrollará una distribución de probabilidad de cada factor de incertidumbre presente en el modelo a partir de las cuales se generan resultados que se emplearán para determinar el resultado obtenido a partir del modelo (método de Montecarlo, árbol de decisiones, etc.). La distribución de frecuencia resultante se usará para obtener conclusiones probabilistas acerca del análisis técnico-económico de los esquemas de biorrefinería estudiados.

Se definirá el esquema tecnológico más conveniente desde el punto de vista técnico, económico y ambiental. Los resultados serán publicados en eventos de CyT sobre la temática y en revistas especializadas.

Se contribuirá con un tema importante en la actualidad que forma parte de las estrategias que busca financiar el CONICET.

## Referencias

- [1] Ministerio de Economía Industria y Competitividad, Manual sobre Biorrefinerías en España, Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. España, 1-92 p. 2017.
- [2] B. Kamm, M. Kamm Principles of biorefineries, Applied Microbiology and Biotechnology, Ed. Springer-Verlag. Berlín, Alemania. (64):137–45. 2004.
- [3] BKM. Kamm, Biorefineries – Multi Product Processes, Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology, Ed. Springer-Verlag. Berlín, Alemania. p. 175–204. 2007.
- [4] Zhang Y-HP, Reviving the carbohydrate economy via multi-product lignocellulose biorefineries, J Ind Microbiol Biotechnol [Internet]. Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Society for Industrial Microbiology, Berlin Alemania. May [cited 2014 May 23];35(5):367–75. 2008
- [5] Kamm B, Gruber PR, Kamm M. Biorefineries – Industrial Processes and Products: Satus Quo and Futuure Directions. Kamm B, Gruber PR, Kamm M, editors. Wiley; Weinheim, Alemania. 948 p. 2006.
- [6] Brown TR, Wright MM. A Framework for Defining the Economic Feasibility of Cellulosic Biofuel Pathways. Biofuels. Iowa State University. Ames, Iowa; 7269(January). 2015
- [7] Assis CA De, Gonzalez R, Kelley S, Jameel H, Department of Forest Biomaterials, North Carolina. Risk management consideration in the bioeconomy. North Carolina State University, Raleigh, NC, USA. Society of Chemical Industry and John Wiley & Sons.1–18. 2017
- [8] Assis CA De, Department of Forest Biomaterials, North Carolina. Conversion Economics of Forest Biomaterials: Risk and Financial Analysis of CNC Manufacturing. Society of Chemical Industry and John Wiley & Sons. NC, USA. 2017.
- [9] Hytönen E, Stuart P. Techno-Economic Assessment and Risk Analysis of Biorefinery Processes. Computer Aided Chemical Engineering. Netherlands, 29:1376–80. 2011
- [10] Vallejos ME, Zambon MD, Area MC, Curvelo AAS. Low liquid–solid ratio (LSR) hot water pretreatment of sugarcane bagasse. Green Chem. The Royal Society of Chemistry. Londres, Reino Unido. 14(7):1982. 2012.
- [11] Ehman NV, Tarrés Q, Delgado-Aguilar M, Vallejos ME, Felissia FE, Area MC, et al. From pine sawdust to cellulose nanofibers. Cellulose Chemistry and Technology. Ed. Prof. Dr. Valentin I. Popa, 50(3–4):361–7. 2016.
- [12] Stoffel RB, Felissia FE, Silva Curvelo AA, Gassa LM, Area MC. Optimization of sequential alkaline-acid fractionation of pine sawdust for a biorefinery. Ind Crops Prod. Elsevier B.V. 61:160–8. 2014.
- [13] Stoffel RB, Vinholi P, Felissia FE, Pereira L, Gassa LM, Area MC. Biomass and Bioenergy Hemicellulose extraction from slash pine sawdust by steam explosion with sulfuric acid. Biomass and Bioenergy. Elsevier Ltd. 107(October 2016):93–101. 2017.
- [14] Vallejos ME, Felissia FE, Kruyeniski J, Area MC. Kinetic study of the extraction of hemicellulosic carbohydrates from sugarcane bagasse by hot water treatment. Ind Crops Prod [Internet]. Elsevier B.V. may; 67:1–6. 2015.
- [15] Vallejos ME, Chade M, Mereles EB, Bengoechea DI, Brizuela JG, Felissia FE, et al. Strategies of detoxification and fermentation for biotechnological production of xylitol from sugarcane bagasse. Ind Crops Prod [Internet]. Elsevier B.V. nov; 91:161–9. 2016
- [16] Vallejos M, Bengoechea DI, Felissia FE, Area C. Detoxificación del licor residual del tratamiento con agua. Proceedings of the VIII CIADICYP. 2014
- [17] Clauser NM, Gutiérrez S, Area MC, Felissia FE, Vallejos ME. Small-sized biorefineries as strategy to add value to sugarcane bagasse. Chemical Engineering Research and Design [Internet]. The Institution of Chemical Engineers. Published by Elsevier B. V. 107:137–146. 2016.
- [18] Clauser NM, Gutiérrez S, Area MC, Felissia FE, Vallejos ME. Alternatives of Small-Scale Biorefineries for the Integrated Production of Xylitol from Sugarcane Bagasse. J Renew Mater. 2017.

- [19] Clauser NM, Gutiérrez S, Area MC, Felissia FE, Vallejos ME. Techno-economic assessment of carboxylic acids, furfural, and pellets production in a pine sawdust biorefinery. *Biofuels, Bioproducts Biorefining*. Society of Chemical Industry and John Wiley & Sons. NC, USA. 2018.
- [20] Clauser NM, Vallejos ME, Gutiérrez S. Spent liquor reuse strategy applied to levulinic acid production. 10th World Congress of Chemical Engineering(WCCE). España; 2017.
- [21] Clauser NM, Gutiérrez S, Area MC, Felissia FE, Vallejos ME. Alternatives comparison to add value to sugarcane bagasse. *European cooperation in science and technology*. 2016.
- [22] Clauser NM, Gutiérrez S, Area MC, Felissia FE, Vallejos ME. An alternative to produce value added bio-based products from sugarcane bagasse. 3er Congreso Iberoamericano sobre Biorrefinerías. Chile; 2015.
- [23] Clauser NM, Gutiérrez S, Area MC, Felissia FE, María E. Value added products from sawdust pine in a biorefinery platform. *I&S WORKSHOP Insights and strategies towards a bio-based economy*. 2016.
- [24] Clauser NM, Gutiérrez S, Area MC, Felissia FE, Vallejos ME. Alternatives to produce biorefinery products from sugarcane bagasse. 3er Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel. Finlandia; 2016.
- [25] Simón M, Barruffaldi S, Clauser NM, Vallejos ME, Area MC, Zaderenko C, et al. Residuos de la industrialización primaria de la madera como materia prima de biorrefinerías. Estudio de localización en Misiones (Argentina). *El Papel*. (noviembre):42–3. 2017