

## **Simulación del proceso de producción de ácido láctico a partir de residuos alimentarios para la evaluación económica**

**Alfredo Alexander Navia Penarrieta, Cynthia Roxana Macías Cajape,  
Ricardo José Baquerizo-Crespo, María Antonieta Riera\***

Departamento de Procesos Químicos, Alimentos y Biotecnología. Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas. Universidad Técnica de Manabí. Ecuador

(\*) [maria.riera@utm.edu.ec](mailto:maria.riera@utm.edu.ec)

**Recibido:** 17/01/2022

**Revisado:** 24/03/2022

**Aceptado:** 01/04/2022

### **Resumen**

El ácido láctico (AL) presenta una demanda creciente en Ecuador, aunque actualmente no existen industrias nacionales que lo produzcan. El objetivo de la investigación fue simular el proceso de obtención de AL a partir de residuos alimentarios para su evaluación económica. La selección de residuos consideró su disponibilidad a nivel nacional, así como la información disponible en la literatura. Se trabajó con cascarilla de arroz (CA) y bagazo de caña (BC). El software empleado para la simulación fue SuperProDesigner® V 10.0. Se incluyeron los balances de materiales y energía, el diseño de equipos y las estimaciones económicas correspondientes. Los resultados de la simulación para CA y BC muestran producciones superiores a 16 y 22 Ton AL/batch respectivamente, con un valor actual neto (VAN) cercano a 50 millones de USD y un tiempo de vida útil de 15 años. El BC ofreció mejores indicadores económicos para la producción de AL.

**Palabras claves:** balance económico; bagazo de caña de azúcar; cascarilla de arroz; simulación; sostenibilidad.

### **Abstract**

**Simulation of the production process of lactic acid from food residues for economic evaluation.** Lactic acid (LA) presents a growing demand in Ecuador, although there are currently no national industries that produce it. The objective of the research was to simulate the process of obtaining AL from food waste for its economic evaluation. The selection of residues left their availability at the national level, as well as the information available in the literature. Rice husk (RH) and cane bagasse (CB) were used. The software used for the simulation was SuperPro Designer® V 10.0. Material and energy balances, equipment design, and corresponding economic estimates are included. The simulation results for RH and CB show productions greater than 16 and, 22 Ton LA/batch respectively, with a net present value (NPV) close to 50 million USD and useful life of 15 years. The BC offered better economic indicators for LA production.

**Keywords:** Economic balance; Sugar cane bagasse; Rice husk; Simulation; Sustainability.

### **Introducción**

En la actualidad existe la tendencia de aprovechar residuos para utilizarlos como materia prima en la obtención de nuevos productos, como por ejemplo el ácido láctico (ácido 2-hidroxipropiónico), un ácido orgánico valorado por sus diferentes aplicaciones industriales; como acidulante, conservante y aromatizante. Los usos del AL incluyen la producción de polímeros, el curtido de textiles además de otras aplicaciones para las industrias alimenticias, farmacéuticas y cosméticas debido a su biocompatibilidad<sup>1</sup>.

Este ácido orgánico tiene dos isómeros ópticos, los cuales son el D(-) láctico y el L(+) láctico. Desde el punto de vista industrial es importante el uso de estos isómeros en su forma pura, ya que cada uno tiene funciones específicas independiente del otro. El L(+) láctico es de mayor interés para las industrias alimenticias y farmacéuticas, porque el organismo lo metaboliza completamente debido a la presencia de L-lactato deshidrogenasa<sup>2</sup>. El ácido láctico es manufacturado por síntesis química

o por producción biotecnológica. Aproximadamente el 90% del ácido láctico se produce por métodos biotecnológicos o fermentación microbiana. Con el desarrollo de la bioconversión y el uso apropiado de microorganismos, la fermentación microbiana es el método dominante para la producción de ácido láctico debido a aspectos ambientales, bajas temperaturas de producción, bajos requerimientos de energía y alta pureza<sup>3</sup>.

Los residuos con alto contenido de material lignocelulósicos constituyen una alternativa como materias primas para la obtención de AL por vía biotecnológica. En el trabajo de Proaños y Piñeros<sup>4</sup> se evaluó el potencial de la cascarilla de arroz para la obtención de AL con un rendimiento de 0,075 g AL/g CA, mientras que en la investigación de González *et al.*<sup>5</sup> se obtuvo un rendimiento de 0,724 g AL/g BC en el estudio de bagazo de caña de azúcar para la producción de ácido láctico.

La demanda mundial de ácido láctico era de 1.220 kilotoneladas (kt) en el 2016, y con un crecimiento anual estimado del 16,2%, la proyección de la demanda para el 2025 es de 1.960

kt, equivalente a \$ 9.800 millones en el mercado mundial. Las principales empresas líderes productoras de ácido láctico son: Corbion – Purac (Países Bajos), Galactic (Bélgica), Nature Works LLC – Cargill (Estados Unidos), Musashino Chemical Laboratory, Ltd. (Japón), entre otras<sup>6</sup>. Actualmente en Ecuador no existen productores a escala industrial de AL<sup>7</sup>. En el año 2017 las importaciones de AL superaron las 27 toneladas métricas, por un costo de 47.000 dólares<sup>8</sup>.

Por otra parte, se encuentra la simulación de procesos la cual es una herramienta tecnológica que, a pesar de que su auge ha sido en las últimas décadas, se ha usado desde hace mucho tiempo<sup>9</sup>. Una simulación es una reproducción artificial de un modelo teórico de una situación, que analiza su comportamiento y planea las consecuencias de cambios similares dentro de un contexto real<sup>10</sup>. Actualmente la simulación se presenta como una herramienta de gran utilidad para la industria, que permite explorar las oportunidades para mejorar la gestión del rendimiento de los procesos en la ejecución de un plan de producción, formulando así las estrategias que apoyan el proceso de toma de decisiones<sup>11</sup>.

De igual manera, la simulación contribuye con la toma de decisiones apropiadas para cualquier tipo de proceso, dado que permite considerar la implementación de nuevos procedimientos y condiciones de trabajo, teniendo en cuenta las incertidumbres y riesgos del proceso<sup>12</sup>. En la actualidad resulta viable el uso de simuladores en trabajos de investigación para procesos de producción de ácido láctico empleando como sustratos residuos industriales, como el realizado por Méndez<sup>13</sup>, en donde se presenta una aproximación considerable para un posible proceso real de producción de ácido láctico de una manera sustentable y económicamente factible, partiendo del uso de materia prima renovable y de bajo costo para su posterior fermentación, purificación y separación.

En el Ecuador, el sector agroindustrial es de gran importancia económica, aportando en el 2019 un 7,74% al Producto Interno Bruto (PBI) del país, equivalente a \$ 8.370,7 millones<sup>14</sup>. Anualmente se producen en el país 1.668.523 toneladas (t) de arroz y 10.088.870 t de caña de azúcar<sup>15</sup>, equivalentes a 333.700 t de cascarilla de arroz (20% del peso total<sup>16</sup>) y 3.228.438 t de bagazo de caña (25 – 40% del peso total<sup>17</sup>). Al ser un país tradicionalmente agrícola, resulta razonable evaluar el potencial de estos residuos para la obtención de materiales de alto valor industrial, como lo es el ácido láctico.

Con base en lo expuesto, se planteó la simulación de un proceso para la obtención de ácido láctico a partir de residuos alimentarios, a fin de determinar la influencia que ejerce la materia prima y las condiciones de operación, en el rendimiento de la producción de ácido láctico y la economía del proceso. La importancia de la simulación reside en que, con los modelos utilizados, se podría explorar el funcionamiento de un sistema existente si se modifica, o cómo se comportaría un nuevo sistema antes de que el prototipo se complete, lo que ahorra costos y plazos de entrega<sup>18</sup>.

## Materiales y métodos

### Flujo de materiales

Los residuos agroindustriales seleccionados como materia prima para el proceso simulado fueron cascarilla de arroz y bagazo de caña. La composición para CA es de 44,09% celulosa; 26,31% hemicelulosa; 20,55 % lignina y 9,05% agua<sup>19</sup> y para BC es de 45,50% celulosa; 27,00 % hemicelulosa; 21,10% de lignina y 6,40% correspondiente a cenizas<sup>20</sup>.

Se utilizó una base de cálculo en el flujo de alimentación de 40000 kg de residuo/batch; para la selección de este flujo se tomó en cuenta el sector proveedor; el cual representa el uso del 2,33% de la producción nacional de cascarilla de arroz y el 0,24% de bagazo de caña, con materia prima suficiente para que no se interrumpa la producción.

### Proceso de producción de ácido láctico

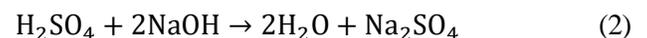
Se contemplaron 6 etapas para la bioproducción de ácido láctico: 1) pretratamiento, 2) neutralización, 3) hidrólisis enzimática, 4) inoculación, 5) fermentación, 6) separación y purificación<sup>13</sup>.

En el pretratamiento se descomponen la materia lignocelulósica en azúcares fermentables como glucosa y xilosa. Se utiliza H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 10% (m/m) para la CA durante 2 h y al 5,4 % (m/m) para el BC durante 4 h. En ambos casos la temperatura de operación fue 121 °C. los residuos agroindustriales se trataron con el ácido en relación de 15% (p/p)<sup>21</sup>.

La ecuación de Arrhenius (1) fue el modelo para estimar la constante cinética de hidrólisis (k), en función de la temperatura (T). El factor de frecuencia (A) fue de 1.166,316 y la energía de activación (Ea) de 57.052 kJ/kmol para CA<sup>22</sup>. Para BC las constantes A y Ea fueron 2,3 x10<sup>9</sup> y 85.000 kJ/kmol, respectivamente<sup>23</sup>.

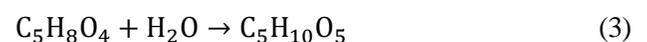
$$k = A * e^{-\left(\frac{E_a}{R \cdot T}\right)} \quad (1)$$

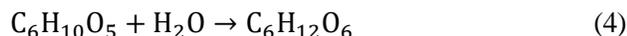
Posteriormente se requiere la separación de las fases sólida y líquida producidas en la hidrólisis. Una solución de NaOH 10 M neutraliza la fase líquida. La reacción de neutralización (2) es:



Después de la neutralización, el proceso varía con el residual. En el proceso CA, la corriente líquida neutralizada y el sólido se mezclan. El 5% de los azúcares fermentables de la mezcla ingresan a la etapa de inoculación y el 95% pasan a la etapa de hidrólisis enzimática. El procesamiento de BC no requiere hidrólisis enzimática. El 1% del líquido neutralizado va a la inoculación y el 99% de la corriente ingresa a un separador sólido/líquido donde la fase líquida ingresa al fermentador.

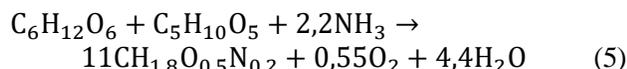
A continuación, está la hidrólisis enzimática donde la temperatura de sacarificación de CA pretratada con las enzimas fue de 50 °C durante 14 h. Las reacciones son (3) y (4):





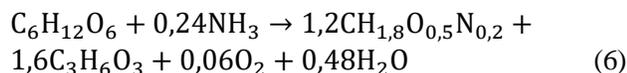
Las constantes cinéticas (k) de los procesos de transformación de glucosa y xilosa fueron  $0,00012861 \text{ min}^{-1}$  y  $0,000075 \text{ min}^{-1}$ , respectivamente<sup>24</sup>. Posteriormente, la fase líquida se separa de la sólida y se envía a fermentación.

Para la preparación del inóculo, se consideró el uso de los azúcares fermentables para el medio de cultivo y una fuente de nitrógeno, durante 10 h (CA) y 20 h (BC) a 37 °C. El crecimiento del microorganismo *Lactobacillus delbrueckii* por reacción (5):



La etapa de fermentación requiere la eliminación del ácido nítrico. El fermentador mezcla el producto con azúcares fermentables provenientes de la separación sólido/líquido y recirculación del reactor de precipitación. Las condiciones de fermentación fueron temperatura 45°C por 31 h (CA) y 39 h (BC). Las reacciones (6) y (7) corresponden a las etapas de transformación biológica a ácido láctico.

Posteriormente se separa el ácido nítrico, y la corriente resultante es llevada al fermentador, en donde se mezcla con los azúcares fermentables resultantes del separador sólido/líquido y una corriente de recirculación proveniente del reactor de precipitación. En la fermentación se consideró una temperatura de 45 °C durante 31 h (CA) y 39 h (BC). Las reacciones (6) y (7), son las etapas para la obtención del ácido láctico.

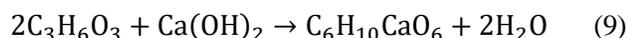


El consumo de sustrato utilizó el modelo de Monod (8) para la cinética de fermentación.

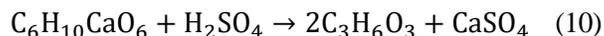
$$\mu = \left[ \alpha \mu_{\max} \frac{[S]}{K_s + [S]} \right] (B - \text{Term}) \quad (8)$$

Donde:  $\mu$  es la tasa de crecimiento de la biomasa;  $K_s$  es la constante de Monod [mg/L];  $\alpha$  es la constante de proporcionalidad;  $\mu_{\max}$  es la tasa máxima de crecimiento de la biomasa [h<sup>-1</sup>]; y B-Term es una expresión de primer orden para la biomasa. Los valores estimados para  $K_s$ ,  $\alpha$  y  $\mu$  fueron 45.700 mg/L, 0,596 y 0,136 h<sup>-1</sup>, respectivamente<sup>25</sup>.

En la última etapa, un filtro separa el medio de cultivo de sus componentes sólidos y la biomasa. Posteriormente, una solución al 25% (p/p) de Ca(OH)<sub>2</sub> reacciona con el caldo para formar (9) un precipitado de lactato de calcio.



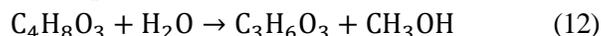
El 90% de los azúcares fermentables recirculan al fermentador. El lactato de calcio producido y una solución de ácido sulfúrico al 25% (p/p) alimentan un reactor de hidrólisis. La reacción de lactato de calcio y ácido sulfúrico (10) forma AL y sulfato de calcio<sup>26</sup>.



El ácido láctico acuoso alimenta una columna preconcentradora para la eliminación del 56 % del agua. El concentrado circula a equipos de esterificación para la reacción de ácido láctico con metanol. Esta reacción produce lactato de metilo y utiliza Amberlyst 15® como catalizador. La reacción de esterificación (11) es:



La hidrólisis del lactato de metilo (12) produce ácido láctico y metanol. Este proceso utiliza Amberlyst 15® como catalizador.



El ácido sale por el fondo de la columna. El metanol ingresa a una sección de recuperación para la separación del agua y otras impurezas. Este alcohol vuelve a entrar en la sección de esterificación, mientras que el agua recircula a la sección de hidrólisis<sup>27</sup>.

### Análisis económico

El análisis económico del proceso utilizó los resultados de la simulación con ambos residuos de alimentos. La evaluación económica incluyó los indicadores: Capital Invertido (CI), Costo Operativo (CO), Ingreso (I), Retorno de la Inversión (RI), Tiempo de Recuperación (TR), Tasa Interna de Retorno (TIR), y Valor Presente Neto (VAN). Adicionalmente, el análisis de sensibilidad económica comparó escenarios con impacto directo en los indicadores económicos por variaciones en los costos de (i) materias primas, (ii) servicios auxiliares (energía estándar, agua de enfriamiento, vapor), (iii) equipos tecnológicos, y (iv) ácido láctico, así como (v) la frecuencia de reposición de insumos (catalizadores, membrana dft, matraz de agitación). Las variaciones de los factores corresponden a incrementos del 10% (A), 20% (B) y 30% (C) respecto a los casos base.

### Software utilizado

Para realizar la simulación del proceso de obtención de ácido láctico, se utilizó el software SuperProDesigner® v.10.0. El modo de operación seleccionado fue tipo batch y el diagrama del proceso presentado, se realizó con base en investigaciones previas<sup>26,27</sup>.

## Discusión de resultados

### Simulación del proceso de producción de ácido láctico

Las figuras 1 y 2 presentan los diagramas de proceso correspondientes a las simulaciones para la obtención de AL a partir de CA y BC, respectivamente. Los balances de masa indicaron producciones de ácido de 16.056,55 kg AL/lote y 22.672,78 kg AL/lote, equivalentes a rendimientos de 0,4 g AL/gCA y 0,56 g AL/gBC, respectivamente. En una investigación previa, se obtuvo un residuo de 0,075 g AL/g<sup>4</sup> inferior al estimado en la simulación con CA. Otro trabajo reportó un residuo de BC 0,724 g AL/g<sup>5</sup>, superior al simulado. La simulación con BC presenta una mejor aproximación a los resultados experimentales que la simulación con CA.

**Equipamiento**

Las tablas 1 y 2 indican los equipos tecnológicos simulados en el procesamiento de CA y BC, respectivamente. El procesa-

**Tabla 1:** Equipos para el procesamiento de CA.

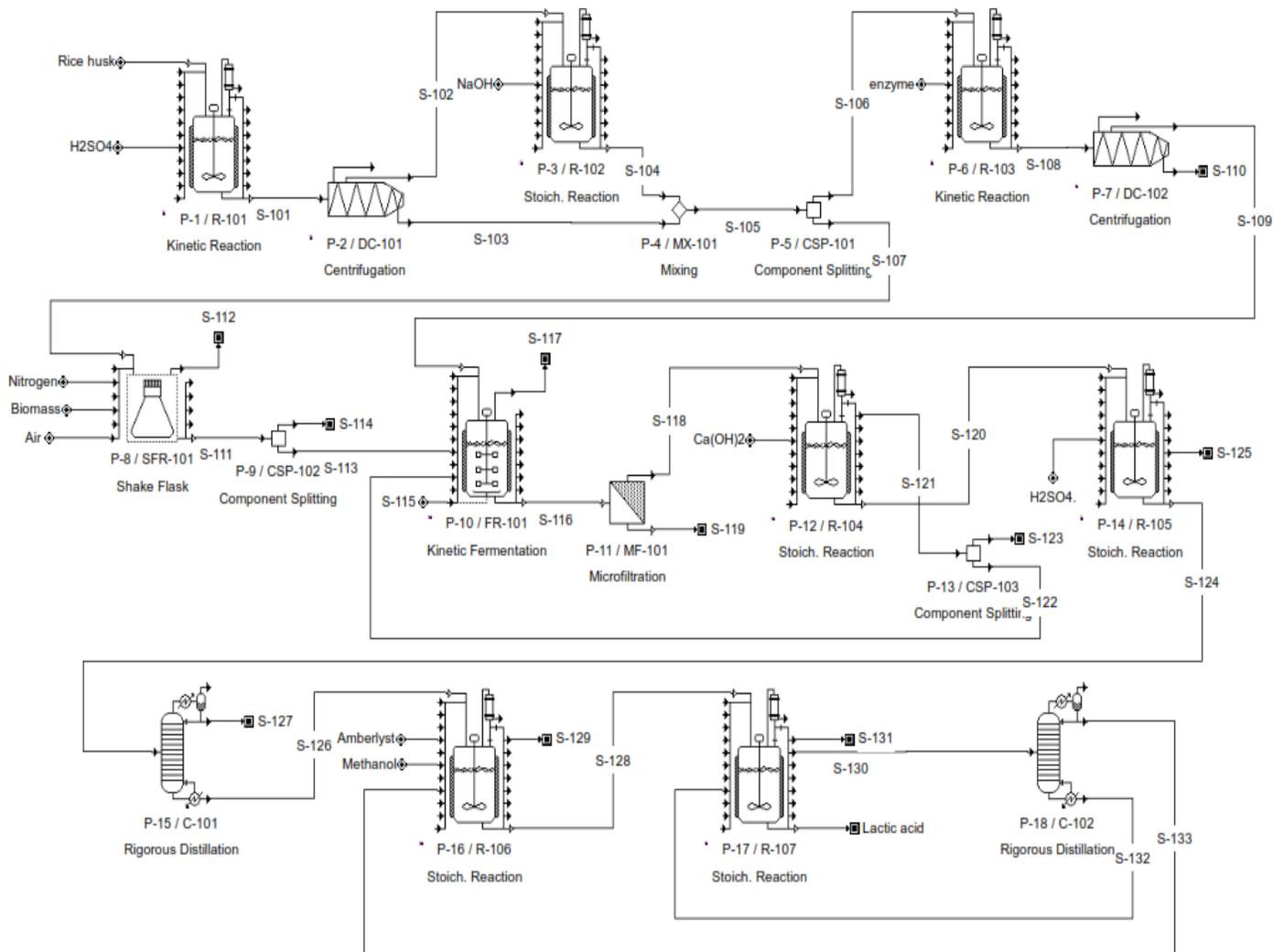
Nombre	Descripción	Cantidad
DC-101	Centrífuga decantadora	4
R-101	Reactor agitado	4
MX-101	Mezclador	1
DC-102	Centrífuga decantadora	21
R-103	Reactor agitado	13
R-102	Reactor agitado	2
SFR-101	Rejilla para matraces de agitación	1
CSP-102	Divisor de componentes	1
FR-101	Fermentador	26
MF-101	Microfiltro	1
R-105	Reactor agitado	2
R-104	Reactor agitado	4
C-101	Columna de destilación	1
R-106	Reactor agitado	2
R-107	Reactor agitado	2
C-102	Columna de destilación	1
CSP-101	Divisor de componentes	1
CSP-103	Divisor de componentes	1

**Tabla 2:** Equipos para el procesamiento de BC.

Nombre	Descripción	Cantidad
DC-101	Centrífuga decantadora	4
R-101	Reactor agitado	3
DC-102	Centrífuga decantadora	23
R-102	Reactor agitado	4
SFR-101	Rejilla para matraces de agitación	1
CSP-101	Divisor de componentes	1
FR-101	Fermentador	29
MF-101	Microfiltro	1
R-104	Reactor agitado	4
R-103	Reactor agitado	3
C-101	Columna de destilación	1
R-105	Reactor agitado	3
R-106	Reactor agitado	3
C-102	Columna de destilación	1
CSP-102	Divisor de componentes	1
CSP-103	Divisor de componentes	1

miento CA simuló 18 operaciones unitarias y procesos que incluyeron una etapa de mezclado y posterior hidrólisis enzimática para la idoneidad del sustrato. La simulación para el procesamiento de BC no requirió estas operaciones y procesos

+



**Fig. 1:** Diagrama de producción de ácido láctico a partir de cascarilla de arroz.

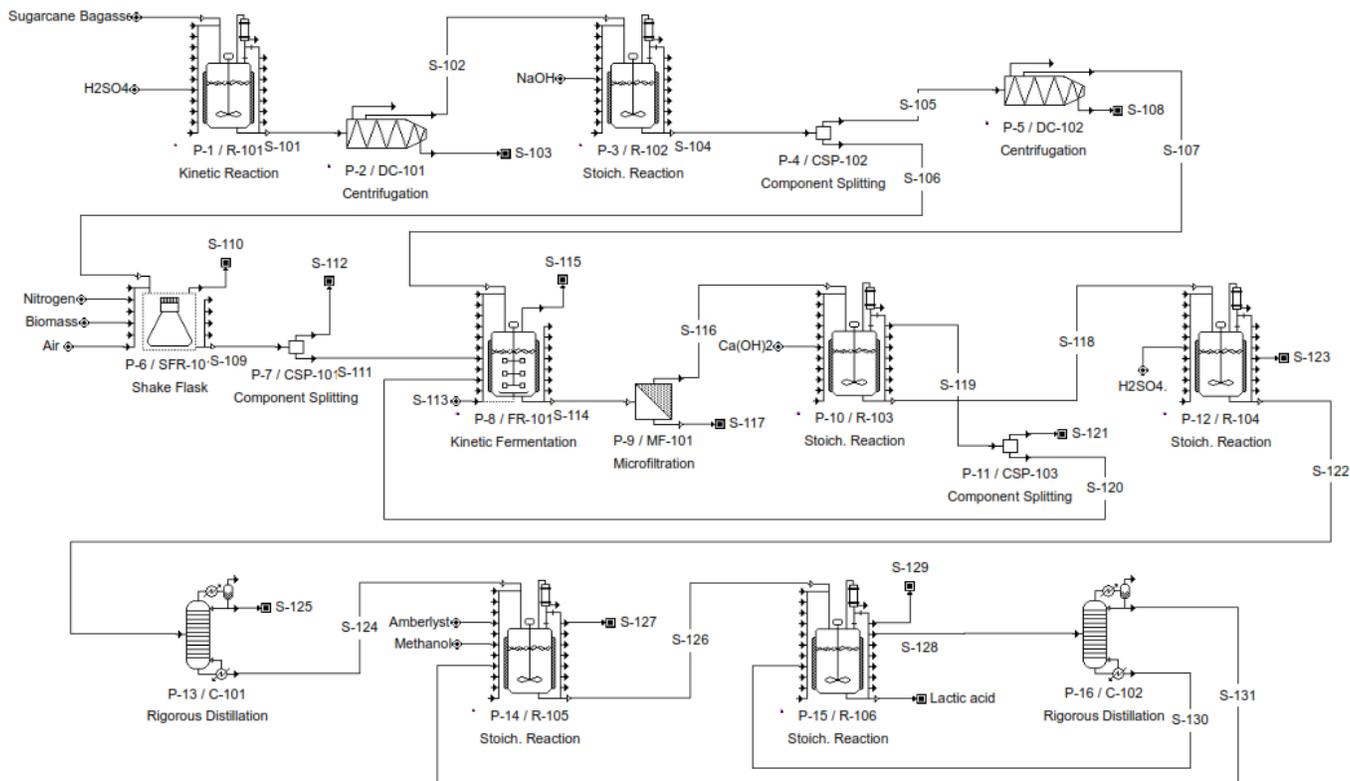


Fig. 2: Diagrama de producción de ácido láctico a partir de bagazo de caña.

unitarios (mezcla e hidrólisis enzimática) debido a los altos rendimientos reportados en la literatura. Por ello, se incrementa la cantidad de equipos necesarios en ciertos procesos de simulación de BC con respecto a CA, principalmente en el fermentador.

*Tiempo de operación*

Los diagramas de Gantt (figuras 3 y 4) delimitan el tiempo de operación de los equipos para la transformación de la materia. Para CA, la simulación indica un tiempo operativo total de 142 h. Los tiempos de operación del reactor de hidrólisis enzimática (R-103), la inoculación (SFR-101) y el fermentador (FR-101) fueron los más largos debido a la preparación y transformación de azúcares fermentables, haciendo que el tiempo total de operación dependa de la cantidad de equipos necesarios en cada proceso de transformación. A pesar de no incluir el paso de hidrólisis enzimática, el tiempo de operación para el procesamiento de BC fue mayor (149,46 h) que el tiempo de operación para CA. Los tiempos de operación de la inoculación (SFR-101) y del fermentador (FR-101) fueron los más largos. El número de fermentadores simulados en el procesamiento de BC fue mayor que el número de fermentadores simulados para CA.

*Comparación de los procesos CA y BC en la producción de ácido láctico*

Los resultados del balance económico para cada simulación (tabla 3) presentan diferencias entre ellos. Los indicadores económicos (VAN, TIR y RI) para la producción de AL son favorables para los casos evaluados. Sin embargo, el procesa-

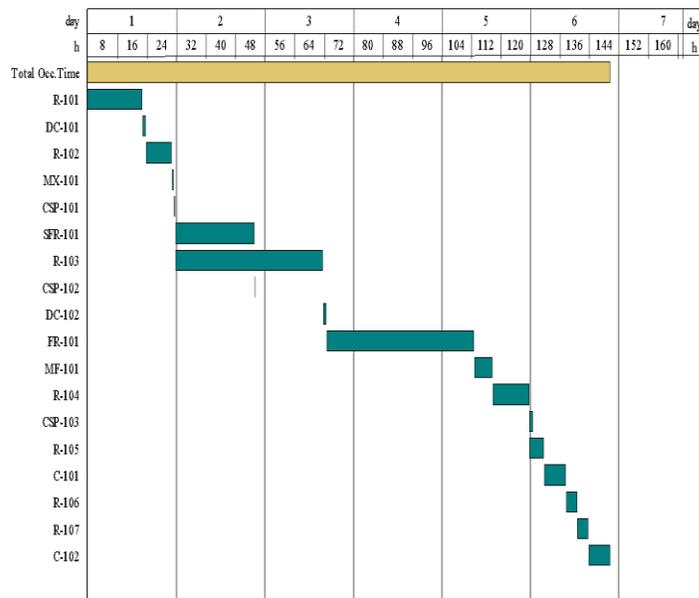
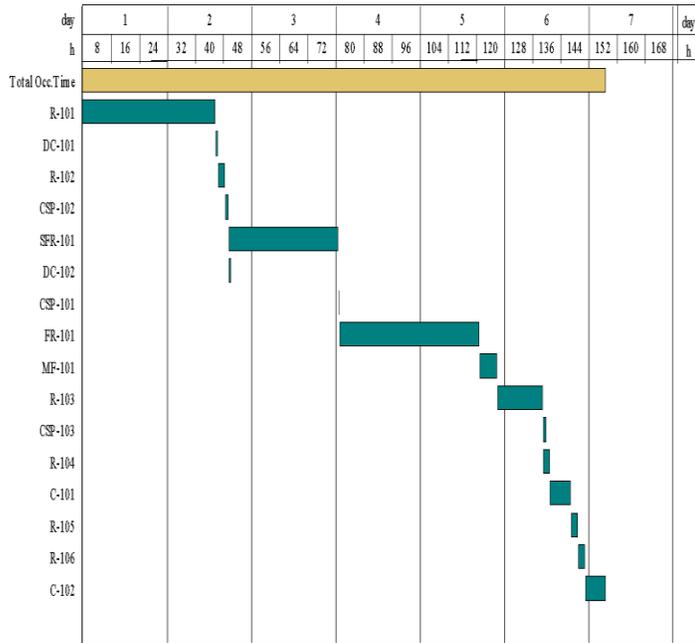


Fig. 3: Diagrama de Gantt del funcionamiento del equipo en el proceso – CA.

miento de BC genera más beneficios económicos debido a los menores costos operativos. La evaluación económica del proceso de obtención de ácido láctico tiene una estrecha relación con los precios y disponibilidad de las materias primas. Kwan *et al.*<sup>28</sup> indica valores de TIR y RI para la producción de LA a partir de desperdicios de alimentos de 31,1 % y 22,9 %, respectivamente. Manandhar & Shah<sup>29</sup> utilizaron granos de maíz y reportaron un RI y VAN de 13,1% y \$ 39,3 millones, respectivamente.



**Fig. 4:** Diagrama de Gantt del funcionamiento del equipo en el proceso – BC.

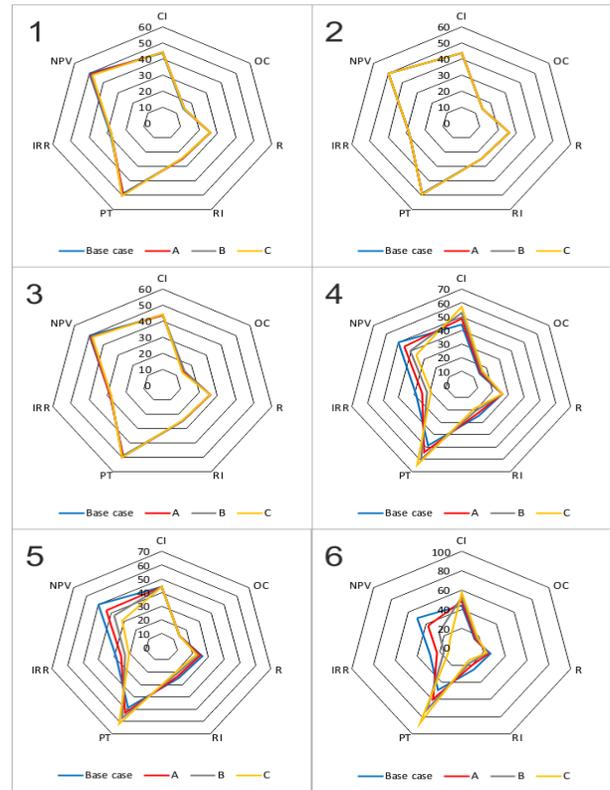
**Tabla 3:** Comparación de variables económicas de los residuos incluidos en esta investigación.

Variable	CA	BC
Capital (\$)*	44,21	40,60
Ingreso (\$)*	25,80	36,46
Costos de operación (\$)*	14,25	12,94
ROI (%)	24,60	43,70
IRR (%)	28,98	59,61
NPV (\$)*	50,38	111,64

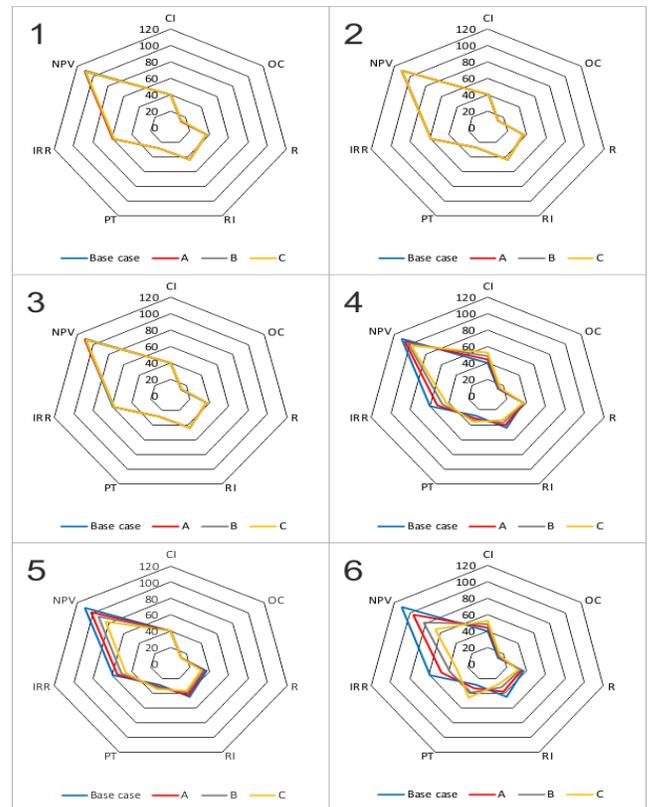
RI: Retorno de la Inversión; TIR: Tasa Interna de Retorno; VAN: Valor Presente Neto; \* Expresado en millones.

**Análisis de sensibilidad**

El análisis de sensibilidad es una herramienta para evaluar escenarios desde varias perspectivas de producción<sup>30</sup>. Los factores materia prima, consumibles y utilidades no representaron variables que influyen en la evaluación económica (figuras 5-1, 5-2, 5-3, 6-1, 6-2 y 6-3). Sin embargo, las modificaciones en los costos de los equipos tecnológicos y el precio del LA fueron factores que afectaron la evaluación económica, los indicadores más afectados fueron el TR, la TIR y el VAN (figuras 5-4, 5-5 6-4 y 6-5). La participación simultánea de todas las variables en un 30% disminuyó el VAN en un 50% y aumentó el TR en más de diez años con respecto al caso base (figuras 5-6 y 6-6) siendo viable, pero con menor rentabilidad. Estos resultados muestran el comportamiento de las variables analizadas ante posibles cambios en el mercado, relacionados con los precios de los equipos o productos contemplados en esta investigación. Asimismo, contribuye a futuras investigaciones, sirviendo de guía y mostrando los factores más influyentes en la evaluación financiera ante cualquier cambio económico dentro del proceso.



**Fig. 5:** Análisis de sensibilidad para el proceso de producción de ácido láctico con cascarilla de arroz como materia prima; parámetros a evaluar: 1. Materia prima, 2. Consumibles, 3. Utilidades, 4. Equipos, 5. Ácido láctico, 6. Análisis combinado.



**Fig. 6:** Análisis de sensibilidad para el proceso de producción de ácido láctico con bagazo de caña como materia prima; parámetros a evaluar: 1. Materia prima, 2. Consumibles, 3. Utilidades, 4. Equipos, 5. Ácido láctico, 6. Análisis combinado.

## Conclusiones

CA y BC fueron los residuos alimentarios utilizados como materia prima para simular el proceso de obtención de AL por fermentación microbiana. Estos residuos son accesibles y pueden generar una cantidad importante de ácido láctico. Para determinar la viabilidad del proyecto se realizó un análisis de sensibilidad, las variaciones en el costo de los equipos y el precio del ácido láctico fueron los factores que influyeron en la factibilidad del proceso. Las simulaciones de los procesos productivos de LA estimaron indicadores económicos favorables para la implementación tecnológica. Basado en indicadores de rentabilidad económica VAN ( $\$111.649 \times 10^6$ ), TIR (59,61%), RI (43,7%) y con un capital de  $\$40.598 \times 10^6$ ; el BC fue el sustrato de mayor desempeño productivo y económico.

## Referencias

1. M Bidy, C Scarlata, C Kinchin. Chemicals from biomass: a market assessment of bioproducts with near-term potential. En: *National Renewable Energy Laboratory* (2016). Disponible en: <https://www.osti.gov/biblio/1244312/>
2. E Cubas-Cano, C González Fernández, M Ballesteros, E Tomás-Pejó. Biotechnological advances in lactic acid production by lactic acid bacteria: lignocellulose as novel substrate. **Biofuels Bio-products & Biorefining**, **12(2)**, 290-303 (2018)
3. Y Wang, Y Tashiro, K Sonomoto. Fermentative production of lactic acid from renewable materials: Recent achievements, prospects, and limits. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, **119(1)**, 10-18 (2015)
4. J Proaños, Y Piñeros. Evaluación de la producción de ácido láctico a partir de cascarilla de arroz por *Lactobacillus delbrueckii*. **Revista Mutis**, **4(1)**, 33-39 (2014).
5. A González, M Bustos, G Rodríguez, L Rodríguez, A Del Ángel. Kinetics of lactic acid fermentation from sugarcane bagasse by *Lactobacillus pentosus*. **Revista Mexicana de Ingeniería Química**, **19(1)**, 377-386 (2020).
6. R Alves de Oliveira, A Komesu, C Vaz Rossell, R Maciel Filho. Challenges and opportunities in lactic acid bioprocess design - from economic to production aspects. **Biochemical Engineering Journal**, **133**, 219-239 (2018).
7. A Castells Román. Evaluación del potencial de producción de ácido láctico mediante cepas de *Bacillus subtilis*. Trabajo de grado. Universidad San Francisco de Quito, Quito. Ecuador (2018).
8. C Novoa Arroyo. Obtención de ácido láctico por el método de células inmovilizadas del *Lactobacillus casei*. Trabajo de grado. Universidad Técnica del Norte, Imbabura, Ecuador (2019).
9. M Álvarez, R García. La simulación en la industria. Ediciones UTN. Ecuador (2005).
10. M Penagos. Juegos con dados: una experiencia en aula desde la experimentación y simulación. En: *III Encuentro Colombiano de Educación Estocástica*. 2018: 264-273. Disponible: <http://funes.uniandes.edu.co/12948/1/Penagos2018Juegos.pdf> Consultado: 28/11/2021
11. D Zapata, J Oviedo. Modelo de simulación de alternativas de productividad para apoyar los procesos de toma de decisiones en empresas del sector floricultor antioqueño. **Información Tecnológica**, **30(2)**, 57-72 (2019).
12. R Spann, K Gernaey, G Sin. A compartment model for risk-based monitoring of lactic acid bacteria cultivations. **Biochemical Engineering Journal**, **151**, 107293 (2019).
13. J Méndez, E Pérez, R Morales. Diseño conceptual de una planta de producción de ácido láctico a partir de residuos de la industria azucarera. **Jóvenes en la ciencia**, **3(2)**, 736-740, 2017.
14. <https://contenido.bce.fin.ec/home1/estadisticas/bolmensual/IEMensual.jsp> Consultado: 30/03/2021
15. <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/cifras-agroproductivas> Consultado: 20/05/2021
16. E Tanguila Vargas, Aprovechamiento de la cascarilla de arroz en elaboración de bloques de alivianamiento, cantón Joya de los Sachas, Orellana, Joya de los Sachas, Orellana. Trabajo de grado. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador (2018).
17. Z Pernalet, F Piña, M Suárez, A Ferrer, C Aiello. Fraccionamiento del bagazo de caña de azúcar mediante tratamiento amoniacal: efecto de la humedad del bagazo y la carga de amoníaco. **Bioagro**, **20(1)**, 3-10 (2008).
18. F Hosseinpour, H Hajhosseini. Importance of simulation in manufacturing. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, **3(3)**, 285-288 (2009).
19. J Barreto Pico, R Macías Menéndez. Aprovechamiento de los residuos agroindustriales provenientes del procesamiento del arroz y de maíz para el desarrollo de bioplásticos. Trabajo de grado. Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador (2020).
20. L Fuentes, S Rabelo, R Filho, A Costa. Kinetics of lime pretreatment of sugarcane bagasse to enhance enzymatic hydrolysis. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, **163(5)**, 612-625 (2011).
21. B Saha, L Iten, M Cotta, V Wu. Dilute acid pretreatment, enzymatic saccharification, and fermentation of rice hulls to ethanol. **Biotechnology Progress**, **21(3)**, 816-822 (2015).
22. Megawati, W Sediawan, H Sulisty, M Hidayat. Kinetics of sequential reaction of hydrolysis and sugar degradation of rice husk in ethanol production: Effect of catalyst concentration. **Bioresource Technology**, **102(2)**, 2062-2067 (2011).
23. S Kumar, P Dheeran, S Singh, I Mishra, D Adhikari. Kinetic studies of two-stage sulphuric acid hydrolysis of sugarcane bagasse. **Renewable Energy**, **83**, 850-858 (2015).
24. M Nikzad, F Talebnia, K Movagharnejad, G Najafpour, M Esfahanian. Kinetic Modeling of Enzymatic Hydrolysis of Pretreated Sorghum Bicolor and Rice Husk. **International Journal of Engineering**, **30**, 1622-1630 (2017).
25. K Dutta, A Mukherjee, P Chakraborty. Effect of product inhibition on lactic acid fermentation: simulation and modelling. **Appl. Microbiol. Biotechnol.**, **46**, 410-413 (1996).

26. J Méndez Alva, E Perez Cisneros, D Rodríguez Gómez, O Prado Rubio, B Ruiz Camacho, R. Morales Rodríguez. Computer-aided process simulation, design and analysis: lactic acid production from lignocellulosic residues. **Computer Aided Chemical Engineering**, **44**, 463-468 (2018).
27. O Prado-Rubio, R Gasca-González, J Fontalvo, F Gómez-Castro, E Pérez-Cisneros, R Morales-Rodríguez. Design and evaluation of intensified downstream technologies towards feasible lactic acid bioproduction. **Chemical Engineering and Processing**, **158**, 108174 (2020).
28. T Kwan, Y Hu, C Lin. Techno-economic analysis of a food waste valorisation process for lactic acid, lactide and poly(lactic acid) production. **Journal of Cleaner Production**, **181**, 72-87 (2018).
29. A Manandhar, A Shah. Techno-economic analysis of bio-based lactic acid production utilizing corn grain as feedstock. **Processes**, **8**, 199-213 (2020).
30. B Kaminski, M Jakubczyk, P Szufel. A framework for sensitivity analysis of decision trees. **Central European Journal of Operations Research**, **26(1)**, 135-159 (2018)