UEA Agroindustria
PrePrint UEA

Sección Agroindustria
Vol. BIO2324. ep18–155

| Recibido: 14/03/2024 |
| Aceptado: 29/04/2024 |
| Publicado: 16/11/2026 |

Propuesta de una ruta tecnológica para el aprovechamiento de las vinazas con un enfoque de economía circular

Proposal of a technological route for the use of vinasses with a circular economy approach

Micaela Nikolls Lojano Gómez[1], Alba Jhoanna Pila Lidioma[1] Estela Guardado Yordi[1]

https://doi.org/10.59410/PREPRINT-UEA-vBIO2324ep18-155 Crossref

Resumen

La generación de residuos agroindustriales es un problema mundial que implica la búsqueda de nuevas formas de aprovechamiento. En Pastaza, Ecuador, gran parte del cultivo de caña de azúcar va dirigido a la producción de etanol, esto da lugar a la generación de residuos que son desechados al medio ambiente. Las vinazas generadas en el proceso de obtención de etanol contienen una variedad de compuestos orgánicos de los cuales se pueden obtener biogás y digestato. El objetivo de esta investigación es proponer una ruta tecnológica para el aprovechamiento de las vinazas con un enfoque de economía circular mediante el diseño de procesos asistido por computadoras. Se partió de la búsqueda de tecnologías de obtención de digestato y el biogás a partir de vinazas, las que fueron posteriormente encadenadas y luego analizadas mediante el ciclo biológico de materias primas renovables del diagrama de mariposa, de la metodología de Ellen-MacArthur-Foundation. El diseño se efectuó con el programa *SuperPro Designer*, analizando tres capacidades de producción. Como resultado, la ruta tecnológica propuesta en la presente investigación parte de la caña de azúcar hasta la obtención de bioetanol, CO_2y vinazas (tecnología 2), digestato y biogás (tecnología 3) y caña de azúcar (tecnología 4). La alternativa de producción, que presentó los mejores indicadores económicos fue la de 6 810 kg, con un retorno de inversión del 15,65 % en un periodo de seis años. Este enfoque garantiza la valorización y reintegración de los residuos generados en la ruta tecnológica al medioambiente de manera sostenible.

Palabras clave

caña de azúcar, biogás, digestato, simulación, tratamiento de residuos, digestión anaerobia.

Abstract

The generation of agroindustrial waste is a global problem that implies the search for new forms of use. In Pastaza, Ecuador, a large part of the sugar cane cultivation is directed towards the production of ethanol, which results in the generation of waste that is discarded into the environment. The vinasses generated in the ethanol production process contain a variety of organic compounds from which biogas and digestate can be obtained. The objective of this research is to propose a technological route for the use of vinasses with a circular economy approach through the design of computer-assisted processes. The starting point was the search for technologies to obtain digestate and biogas from vinasse, which were subsequently chained and then analyzed using the biological cycle of renewable raw materials of the butterfly diagram, of the Ellen-MacArthur-Foundation methodology. The design was carried out with the SuperPro Designer program, analyzing three production capacities. As a result, the technological route proposed in this research starts with sugar cane to obtain bioethanol, CO_2, and vinasse (technology 2), digestate and biogas (technology 3), and sugar cane (technology 4). The production alternative, which presented the best economic indicators, was 6,810 kg, with a return on investment of 15.65 % over six years. This approach guarantees the recovery and reintegration of waste generated in the technological route into the environment in a sustainable manner.

Keywords

sugar cane, biogas, digestate, simulation, waste treatment, anaerobic digestion.

Direcciones

[1]Universidad Estatal Amazónica. Pastaza, Ecuador. Email: mn.lojanog@uea.edu.ec, aj.pilal@uea.edu.ec, e.guardadoy@uea.edu.ec

Autor para la correspondencia

Micaela Nikolls Lojano Gómez. Universidad Estatal Amazónica. Pastaza, Ecuador. Email: mn.lojanog@uea.edu.ec

Cómo citar

LOJANO GÓMEZ, Micaela Nikolls, PILA LIDIOMA, Alba Jhoanna and GUARDADO YORDI, Estela 2026. Propuesta de una ruta tecnológica para el aprovechamiento de las vinazas con un enfoque de economía circular. PrePrint UEA. Vol. BIO2324. p. ep18–155. https://doi.org/10.59410/PREPRINT-UEA-vBIO2324ep18-155

Editores Académicos Willan Orlando Caicedo Quinche

Editorial Editorial de la Universidad Estatal Amazónica 2026

Copyright

Derechos de autor 2026 | PrePrint UEA.
Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.
Los autores del artículo autorizan a la RACYT a que este artículo sea compartido bajo las condiciones de la Licencia Creative Commons 4.0 (CC-BY 4.0).

1. Introducción

El crecimiento de la industria del etanol ha generado una considerable cantidad de residuos agroindustriales, especialmente las vinazas, así como componentes adicionales de la caña de azúcar como hojas y cogollos. Las grandes industrias productoras de etanol tienen cierto control sobre los residuos que pueden generar, sin embargo, la producción de etanol de forma artesanal tienen menos control de los residuos generados ya que sus procesos impiden que puedan generar formas de tratamiento por lo cual son desechados al medio ambiente (Tuárez et al. 2020).

El aumento constante de los residuos agroindustriales a nivel mundial es una consecuencia directa del crecimiento demográfico y la creciente demanda de productos agropecuarios. Este fenómeno subraya la necesidad de abastecer a una población en constante expansión con alimentos y productos derivados de la industria agropecuaria (Dormond et al.

2011). Uno de estos ejemplos es la industria productora de etanol, un estudio de la Corporación Financiera Nacional del Ecuador (CFN 2017) ha revelado que la generación de vinazas en el país alcanza un total de 8 661 609 toneladas por hectárea de las materias primas usadas, tomando en cuenta la producción de etanol a nivel industrial y artesanal.

La caña de azúcar es uno de los cultivos con mayor expansión en la Amazonía ecuatoriana correspondiendo al 54.40% especialmente en la provincia de Pastaza, donde los principales productos generados son la panela y el etanol (Aguiar et al. 2021). De acuerdo con un reporte de la Asociación de Cañicultores de Pastaza (ASOCAP) el 35% de la cantidad de caña de azúcar va dirigido a la producción de etanol o aguardiente (Mosquera et al. 2007).

La utilización del jugo de caña como materia prima para la producción de etanol tienen índices de contaminación por vinazas altos ya que la producción de etanol es una de las industrias más grandes en todo el mundo y también una de las que más contamina al ambiente especialmente las que no tienen procesos de tratamientos para efluentes (Camacho and Duharte 2018). Por consiguiente, el empleo extensivo de vinazas no controlado puede resultar en la sobrecarga para el suelo y la contaminación de recursos hídricos, generando importantes impactos negativos a nivel ambiental, así como preocupaciones en el tema de salubridad (Rueda and Cárdenas 2016).

Para que el desarrollo de métodos de tratamiento de residuos se incremente en todas las industrias alrededor del mundo se ha optado por la implementación de la economía circular (Ellen-MacArthur-Foundation 2015). En la investigación de Varela (2018) destaca aportes de la economía circular a la competitividad, sostenibilidad y economía local e internacional ya que la economía circular es un modelo más eficiente que el modelo lineal porque reduce la cantidad de recursos naturales necesarios para la producción y consumo, esto se debe a que la economía circular busca prolongar la vida útil de los productos y materiales, así como reutilizarlos y reciclarlos.

La economía circular se presenta como una estrategia fundamental para abordar el excesivo consumo de recursos naturales a nivel global y enfrentar los desafíos ambientales y socioeconómicos. En diciembre de 2015, la Comisión Europea lanzó un plan de acción específico para la economía circular, destacando en las agendas de países importantes como Europa, China y Japón. Este enfoque busca optimizar la gestión de recursos, promover la eficiencia en el uso de materiales e impulsar la innovación en modelos de negocio para lograr una economía más sostenible a nivel mundial (Wilts 2017).

Por consiguiente, establecer rutas tecnológicas para el tratamiento de residuos es una idea que se ha desarrollado desde años pasados hasta la actualidad con el fin de dar lugar a la utilización de subproductos derivados de residuos orgánicos como las vinazas. Como ejemplo está la investigación realizada por Sheehan and Greenfield (1980) que aplica la digestión anaeróbica en su estudio de tratamiento de aguas residuales en destilerías. En dicha investigación se describen las características más destacables de las vinazas, entre ellas están el pH bajo, las materias en suspensión, la elevada Demanda Química de Oxígeno (DQO) y el alto contenido de compuestos orgánicos, todo lo cual hace que sea un residuo prometedor para la producción de biofertilizantes y biocombustibles.

Otro ejemplo muy particular de tratamiento de residuos es la tecnología *Waste To Energy*. Según Graziani (2018), ésta se enfoca en procesar residuos, reduciendo su volumen en un 90%, mediante métodos complejos de conversión que generan electricidad y calor. Esta tecnología busca minimizar el almacenamiento y la contaminación de residuos, siendo capaz de procesar diversos tipos, como gaseosos, semisólidos y líquidos, su capacidad de procesamiento abarca aquellos residuos que no pueden ser reciclados directamente o que son descartados por otras plantas con dificultades para el reciclaje. Esto evita que estos compuestos se depositen en el medio ambiente, reduciendo significativamente su impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Una de las tecnologías más aplicadas para el tratamiento de residuos es la producción de biogás ya que tiene amplia carga de contenido orgánico en su composición. Como se sabe el constante uso de combustibles fósiles en todo el mundo ha ido incrementado los gases de efecto invernadero al medio ambiente, además que en varios países estos combustibles están generando sobreprecios al pasar los años. El uso del biogás como sustituto para estos combustibles fósiles contribuye ampliamente en la reducción por contaminación de CO_2 a la atmósfera, óxidos nitrosos e hidrocarburos (Luo et al. 2011). Una idea que destaca Peris (2011) como parte de un proyecto Biorrefinería es que mediante una simulación sobre una planta para la producción de biogás es que esta se podría implementar en un apartado junto a la producción de otros biocombustibles ya que es sostenible, confiable y económica. A causa de la generación de biogás también se produce un apartado tecnológico sobre la producción de digestato, la fermentación anaeróbica causa que se genere dos tipos de digestato (sólido y líquido) estas dos pueden usarse ampliamente en el campo de la agronomía como fertilizantes orgánicos, con esto se conoce la amplia variedad de productos que genera la economía circular mediante la reutilización de residuos producto de procesos industriales dando una ruta económica más amplia a las industrias alrededor del mundo (Panuccio et al. 2021).

Para abordar esta problemática, la industria azucarera ha implementado procesos de tratamiento que permiten aprovechar las vinazas como recursos o subproductos. Esto incluye la producción de biocombustibles como biogás y biodiésel mediante la digestión anaerobia, la generación de proteína unicelular a través de la fermentación aeróbica, la utilización como alimento para animales, y la creación de fertilizantes mediante la combustión controlada, entre otros usos (CONADESUCA 2016). Conforme a lo anterior la producción de biogás es una idea estratégica con gran potencial para la creación de compuestos con un valor agregado a partir de residuos agroindustriales, todo esto se obtiene gracias a la gran cantidad de compuestos orgánicos que al tratarlos producen Metano (CH_4) que aprovechando procesos en la biodigestión anaeróbica como son la hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis se puede obtener un producto que puede ser usado en el ámbito doméstico e industrial para la generación de energía (Durán et al. 2015)

El objetivo de esta investigación es proponer una ruta tecnológica para el aprovechamiento de las vinazas con un enfoque de economía circular mediante el diseño de procesos asistido por computadoras.

2. Metodología

2.1. Elaboración de la ruta tecnológica con enfoque de economía circular

En la elaboración de la ruta tecnológica con enfoque de economía circular se empleó la ruta del ciclo biológico de materias primas renovables del diagrama de mariposa, de la metodología de Ellen-MacArthur-Foundation (2015) **Figura 1**. Esta metodología tiene el objetivo devolver los nutrientes de los materiales biodegradables a la Tierra para regenerar la naturaleza.

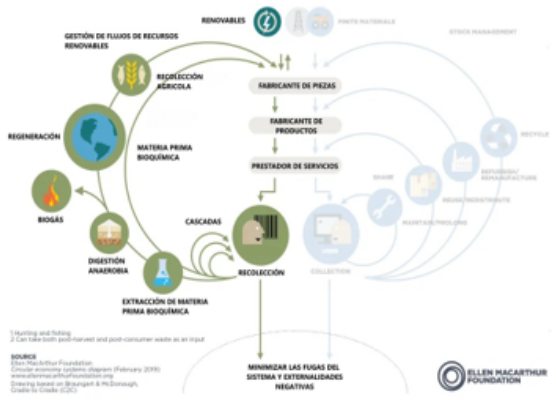


Figura 1 | Diagrama de economía circular en tratamiento de residuos. Adaptado de (Ellen-MacArthur-Foundation 2015)

2.2. Diseño de los procesos involucrados en la ruta tecnológica

El diseño de las tecnologías para la obtención del bioetanol, biogás y digestato siguió el procedimiento propuesto por (Cerda et al. 2022) **Figura 2**.

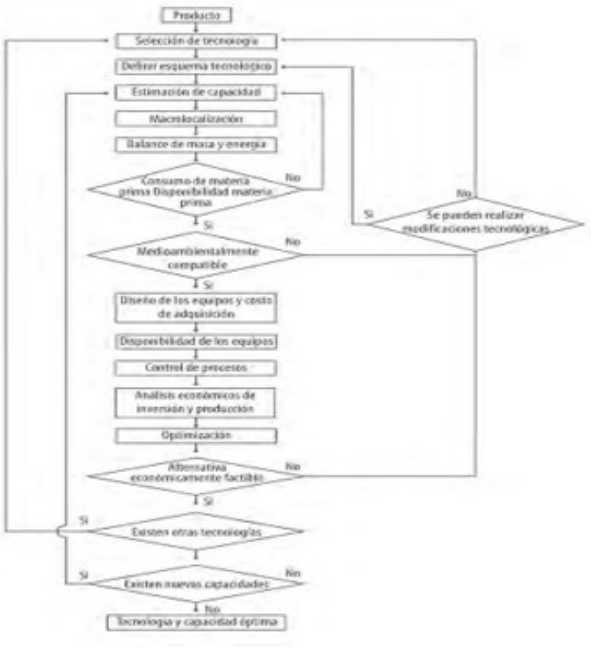


Figura 2 | Diagrama Heurístico para el diseño de procesos. Adaptado de (Cerda, Guardado, Cerda, Vinocunga, Pérez and Gonzáles 2022)

Este procedimiento permitió determinar los indicadores económicos y ambientales para la evaluación de las tecnologías que conformaron la ruta tecnológica. El cálculo se efectuó con la ayuda del software *SuperPro Designer V10*.

Para complementar la etapa de diseño de procesos se utilizó la simulación de proceso propuesta por Dimian (2014), la cual consta de cuatro etapas **Figura 3**: 1) Análisis de datos para la simulación, 2) Entrada de datos, 3) Proceso de ejecución de simulación y 4) el análisis de resultados. Para llevar a cabo este diseño asistido por computadora se utilizó la herramienta digital *SuperPro Designer V10*.

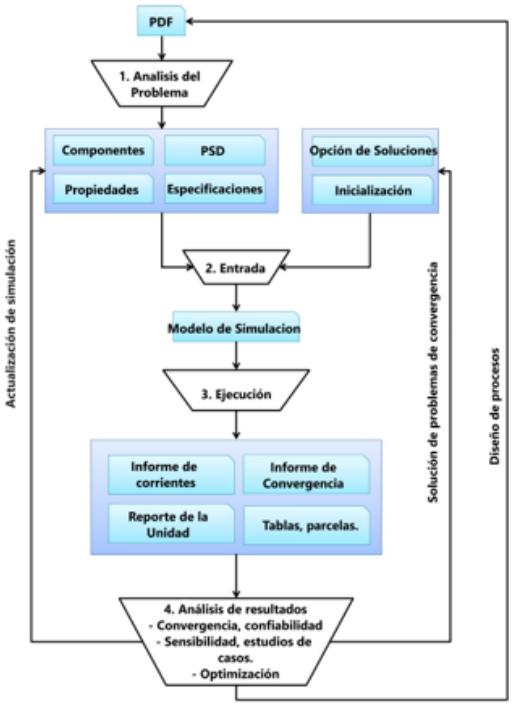


Figura 3 | Niveles metodológicos en simulación de estado estacionario. Adaptado de (Dimian 2014)

2.3. Descripción tecnológica del estudio de caso "Aprovechamiento de los residuos del proceso de obtención de bioetanol a partir del jugo de caña"

Para la conformación de la ruta tecnológica en la valorización de las vinazas se tomó como caso de estudio el proceso de obtención de etanol a partir del jugo de caña de azúcar. Algunas de las características que se seleccionaron/calcularon para el diseño de esta tecnología fueron:

Productos y subproducto: En esta tecnología el bioetanol es el producto principal y las vinazas el subproducto líquido resultante.

Posibilidades de aprovechamiento de las vinazas: Se buscó en la literatura las tecnologías de obtención de digestato y el biogás a partir de vinazas. Estas tecnologías fueron posteriormente encadenadas y luego analizadas mediante el enfoque de Economía circular (epígrafe 2.1).

Capacidad: Se estableció tres capacidades. La planteada por (Menoscal and Chari 2023) de 2270 kg de caña de azú-

car (Capacidad 1), este valor fue ampliado estableciendo la capacidad 2 de 4540 kg y la capacidad 3 de 6810 kg.

Condiciones de operación: Se implementó las condiciones de operación del equipamiento para la obtención de etanol propuestas por Möller and Müller (2012). Para las obtención del biogás y el digestato se adaptaron las reacciones estequiométricas de la digestión anaerobia (ADM1) aplicada por Weinrich and Nelles (2021) y las de Aden et al. (2002), respectivamente.

Aspectos económicos: Los precios de las materias primas, productos y equipamiento se contextualizaron a las condiciones de Ecuador.

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados

3.1.1 Análisis de las rutas tecnológicas para la obtención de las vinazas y su valoración con enfoque hacia la economía circular

En la **Tabla 1** se muestra la matriz de las materias primas, productos y tecnologías, donde se puede evidenciar la tecnología involucrada para la obtención de vinazas a partir de la caña de azúcar y su aprovechamiento. La tecnología 1 se enfoca en la obtención de panela como producto y coproductos como el bagazo y la cachaza, a partir de la caña de azúcar. La tecnología 2 permite obtener productos y coproductos como etanol, CO_2y vinazas por medio del proceso de fermentación de jugo de la caña de azúcar. En la tecnología 3 se generan ya los productos esperados para la investigación a partir de las vinazas los cuales son el biogás y digestato. Finalmente, en la tecnología 4 el digestato pasa a ser usado como biofertilizante el cual se implementa en los campos de cultivos de la caña de azúcar cerrando el ciclo biológico.

Tabla 1 | Matriz de materias primas, tecnologías y productos para la obtención de vinazas y su valorización.

	Productos								
	Bagazo	Cachaza	Panela	Etanol	CO_2	Vinazas	Biogás	Digestato	Caña de azúcar
Materias primas: Caña de Azúcar	Tecnología 1			Tecnología 2					
Bagazo							Tecnología 3		
Cachaza									
Vinazas									
CO_2									
Digestato									Tecnología 4

Todas estas tecnologías tienen operaciones unitarias que son esenciales para la obtención de sus productos y coproductos, estas se detallan a continuación:

Tecnología 1 (Bagazo, Cachaza, Panela):

Las operaciones unitarias presentes en esta tecnología son molienda, filtración, evaporación y cristalización.

Tecnología 2 (Etanol, CO_2, Vinazas):

En esta tecnología las operaciones aplicadas son la molienda, filtración, fermentación y destilación.

Tecnología 3 (Biogás, Digestato):

La operación aplicada en esta tecnología es la digestión anaerobia.

Tecnología 4 (Cultivos de caña de azúcar):

El digestato obtenido en la tecnología 3 se usa como biofertilizante en los campos de cultivo de caña de azúcar. Los procesos que se aplican responden a las técnicas agronómicas, como la preparación del suelo, siembra, fertilización, riego, control de plagas y malezas, corte, transporte y manejo de residuos generados en toda el área. Por su parte el CO_2 es un compuesto inorgánico indispensable para que ocurra la fotosíntesis y consecuentemente el desarrollo el cultivo de caña. Sin embargo, emisiones excesivas de este gas son responsables del calentamiento global por el efecto invernadero.

En la **Figura 4** puede observarse dos rutas tecnológicas. La primera ruta tecnológica está conformada por las tecnologías 1, 3 y 4. Esta ruta parte de la producción de panela, donde se utilizan los coproductos, cachaza y bagazo para obtener biogás y digestato. La segunda ruta tecnológica involucra las tecnologías 2, 3 y 4 que produce bioetanol, CO_2 y vinazas. Ésta última es la materia prima para la obtención de biogás y digestato. Ambas rutas utilizan la tecnología 4 para el desarrollo de los cultivos de caña cerrando de esta manera el ciclo biológico de la economía circular.

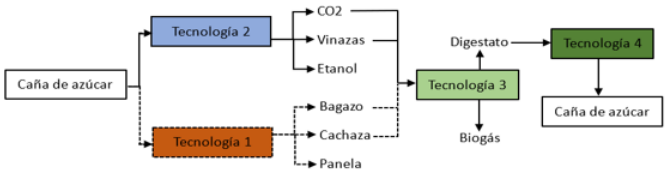


Figura 4 | Esquema general de las rutas tecnológicas con sus productos

En la **Figura 5** se muestra los flujos cíclicos de la economía circular donde las líneas negras señalan los procesos y productos enfocados al tema de la investigación y las líneas rojas son flujos o productos terciarios que van directo hacia el consumidor o un proceso en concreto como es el ejemplo de las levaduras y estiércol.

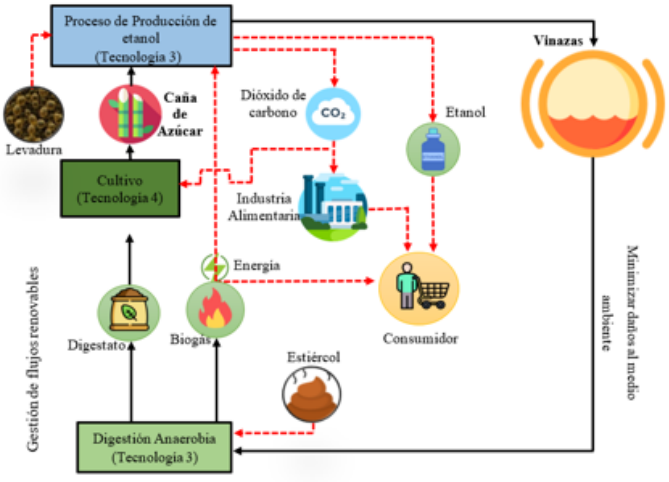


Figura 5 | Esquema de economía circular aplicada a la obtención de biogás y digestato

La tecnología 2 parte de la caña de azúcar la cual se em-

plea para la obtención de etanol mediante las operaciones unitarias de molienda, filtración, fermentación y destilación donde se inocula microorganismos para su efectividad. A diferencia de la tecnología 1 planteada en la Figura 4 que se centra en la obtención de panela, la tecnología 2 se enfatiza más en la producción de etanol dando lugar a la generación de vinazas para ser usadas junto con estiércol en la tecnología 3 para la obtención de biogás y digestato mediante el proceso de digestión anaerobia. El biogás obtenido puede ser utilizado como combustible para la generación de energía necesaria en la operación de destilación durante la obtención del bioetanol. También puede ser aprovechado como combustible por los consumidores

3.1.2. Diseño de los procesos involucrados en las rutas tecnológicas

a) Producto, selección de la tecnología y definición del esquema tecnológico

El diagrama de bloque **Figura 6** de la ruta tecnológica 2, es la ruta en la cual se obtienen los productos deseados (etanol y CO_2, biogás y digestato), contiene las operaciones que se requieren para obtener estos productos y es el diagrama que se toma como punto de partida para la simulación. Las operaciones de esta ruta son: molienda, fermentación y destilación para la obtención de etanol, CO_2 y vinazas a partir de la caña de azúcar. Estas vinazas obtenidas, al mezclarlas con el estiércol de cerdo siguiendo esta ruta generaran el biogás y el digestato mediante la digestión anaerobia.



Figura 6 | Diagrama de bloques de la ruta 2 (etanol-bioetanol-digestato-biogás) enfocadas a la economía circular

El diagrama de flujo de proceso **Figura 7** correspondiente a la Ruta 2, contiene el equipamiento que permite realizar las operaciones antes mencionadas. La primera etapa del flujo de proceso (tecnología 1) comienza con el ingreso de la materia prima, en este caso la caña de azúcar a la molienda, en la cual se obtiene el jugo de caña y el bagazo. El jugo de caña continúa hacia la etapa de fermentación (tecnología 2), en esta a través de tres tipos de fermentadores ocurren diferentes procesos. En el fermentador 1 y 2 se añade la levadura, agua y sulfato de amonio dando como resultado que se produzca el inóculo, el cual se añade al fermentador tres, donde los azúcares son transformados en etanol y CO_2. Estos últimos compuestos se generan de forma continua mientras sea alimentado el proceso.

El monto producido en el tercer fermentador es alimentado a la etapa de destilación, donde existen dos equipos (torre de destilación y rectificación) que se encargaran de obtener etanol al 70%. En este proceso se generan las vinazas, este residuo pasa a un proceso de mezclado donde junto con estiércol porcino se alimenta al digestor anaerobio para obtener biogás y digestato a través de la digestión anaerobia (tecnología 3). Estos productos se almacenan en tanques cilíndricos especializados para su posterior destino y uso.

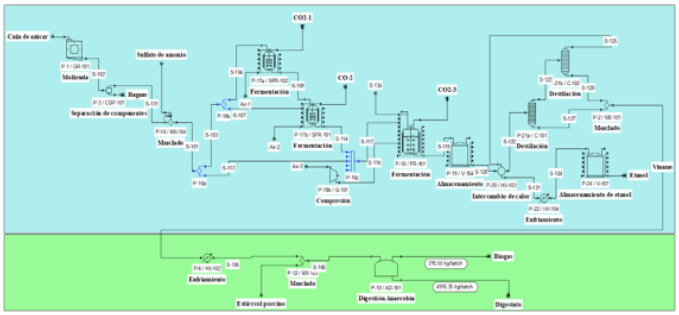


Figura 7 | Diagrama de flujo del proceso de obtención de etanol y digestato.

b) Estimación de la capacidad, macrolocalización y balances de masa y energía

Los indicadores medioambientales mostrados en la **Tabla 2**, son el resultado que genera el *SuperPro Designer* basado en los balances de masa y energía y la cantidad de producto obtenido (digestato) que el software calculó. Estos indicadores tienen un comportamiento similar para cada capacidad.

El proceso de obtención de etanol estaría cerca de los cultivos de caña y azúcar. Este aspecto relacionado con su macrolocalización permitiría disminuir los costos de transporte de la materia prima.

Tabla 2 | Indicadores medioambientales de la ruta tecnológica 2 generados en el *SuperPro Designer*.

Indicadores medioambientales		Capacidad 1 2270 kg **Cantidad**	Capacidad 2 4540 kg **Cantidad**	Capacidad 3 6810 kg **Cantidad**
Consumo	Caña de azúcar (kg/kg)	1,385	1,380	1,385
	Estiércol de cerdo (kg/kg)	0,207	0,207	0,208
	Sulfato de amonio (kg/kg)	0,001	0,001	0,001
	Agua (kg/kg)	56,277	56,076	59,068
	Energía kW-h/kg	0,199	0,198	0,199
Vertimientos	Bagazo (kg/kg)	0,414	0,450	0,450
	Dióxido de carbono (kg/kg)	0,001	0,001	0,001

c) Diseño y costo de equipamiento, costo de inversión y producción, indicadores

La **Tabla 3** contiene una combinación del costo de adquisición del equipamiento, el análisis económico y la factibilidad (indicadores económicos) de cada una de las capacidades simuladas. La capacidad 1 y 2 no son factibles su desarrollo debido a que el Valor Actual Neto (VAN) es negativo. Al contrario de la capacidad 3 donde este indicador dio positivo, con un valor de $ 508 000.

Tabla 3 | Indicadores económicos de las tres capacidades evaluadas de la ruta tecnológica 2 generados en el *SuperPro Designer*.

Variables económicas		Capacidad 1 2270 kg **Cantidad**	Capacidad 2 4540 kg **Cantidad**	Capacidad 3 6810 kg **Cantidad**
Costo de adquisición de equipamiento ($)		500 000	559000	616 000
Costo de inversión ($)		3 081 000	3 439 000	3 784 000
Costo de producción ($)		648 000	758 000	866 000
Total de ingresos ($)		387 423	846 139	1 304 896
Indicadores dinámicos Económicos	VAN ($)	- 2 844 000	- 851 000	508 000
	TIR (%)	-	-	9,14
	Tiempo de retribución (Años)	-	-	6,40
	Retorno de la inversión (%)	-	-	15, 62
	Margen bruto (%)	-	-	35,65
Factibilidad		**No factible**	**No factible**	**Factible**

3.2. Discusión

Las rutas tecnológicas propuestas en esta investigación contienen operaciones unitarias para transformar las materias primas en los productos deseados. La tecnología 1 de producción de panela fue desarrollada por (Menoscal and Chari 2023) y la tecnología 2 donde se obtiene etanol carburante por Casco et al. (2022). Ambas investigaciones se efectuaron siguiendo una metodología de diseño asistido por computadora. En esta investigación se obtuvieron resultados similares a lo publicado por (Carrilho et al. 2016) y (Christofoletti et al. 2013) donde utilizan las vinazas para obtener biogás y digestato.

Otras investigaciones como la de (Möller and Müller 2012) sobre la obtención de digestato a partir de vinazas explican cómo la digestión anaerobia conduce a varias cambios en su composición. La utilización del digestato como fertilizante permite mitigar las emisiones de óxido nitroso de los fertilizantes nitrogenados como ha sido planteado por (Lourenço et al. 2019). Sin embargo, la composición del digestato puede variar pero ya existen estudios como los realizados por (Weinrich and Nelles 2021) donde aplica una simplificación sistemática para el proceso de digestión anaerobia ADM1 produzca fertilizantes con estándares óptimos para su uso en la agricultura.

El uso de la caña de azúcar para la producción de etanol y demás compuestos es muy frecuente debido a la riqueza de materia orgánica y azúcares presente en la caña, no obstante, esta materia prima no es la única usada para generar este tipo productos, un ejemplo de esto es la investigación de Cardona et al. (2005) que emplea como materia prima el maíz. Al hidrolizar las cadenas de amilosa y amilopectina presentes en el almidón de maíz se obtienen los azúcares reductores necesarios para la etapa fermentación y posteriormente se generan las vinazas que al implementar el proceso de digestión anaerobia se obtiene biogás y digestato.

Algunas investigaciones han empleado otras materias primas diferente a las vinazas para la obtención de los mismos productos antes descritos. En México en la producción de tequila a partir del agave se generan vinazas, las cuales según la investigación de Estrada and Weber (2022) son usadas para la generación de biogás y digestato, mediante un proceso de explosión de vapor e hidrólisis enzimática. Otro ejemplo para la producción de etanol es la investigación de (Monsalve et al. 2006) donde usa la cáscara de banano y el almidón de yuca para la generación de etanol, no obstante los resultados muestran que se generarían también azúcares residuales y biomasa lo que se podría optar más adelante un proceso de digestión anaerobia para la generación de biocombustibles y fertilizantes.

El diagrama de Economía circular propuesto en esta investigación (Figura 5), explica cómo los principios de este enfoque se pueden aplicar al diseño como un sistema eficiente donde los materiales usados para crear producto de una ruta tecnológica y aprovechar los residuos. Estos últimos bajo este enfoque nunca se convierten en residuos dando como paso final la regeneración de la naturaleza. Además, que está respaldado por una transición a la energía y materiales renovables, proporcionando un sistema resiliente para la gran mayoría de empresas, personas y medio ambiente (Ellen-MacArthur-Foundation, 2015). Un ejemplo similar a esta investigación es el procesamiento del coco donde se obtiene residuos los cuales son tratados para la generación de biomasa y generación de energía minimizando el impacto ambiental (Montano 2022)

La composición material de los insumos nutricionales técnicos a componentes biológicos, y facilitar su distribución en cascada a través de diversas aplicaciones antes de extraer materias primas valiosas y, finalmente, reintegrar sus nutrientes en la biosfera, constituye una implementación de los fundamentos esenciales del diagrama de mariposa de (Ellen-MacArthur-Foundation 2015). La investigación actual concuerda con los principios del ciclo de vida ya que algunos recursos son reintegrados de nuevo al sistema como es el caso CO_2lo que se conoce como regeneración. Por otra parte, el uso de la energía para el propio proceso muestra el cumplimiento del principio de regeneración de energía lo que hace que el proceso de obtención de biogás y digestato puede ser autosustentable. Finalmente, el uso de las vinazas para la producción de los productos antes mencionados cumple con el principio de reutilizar los materiales presentados en el diagrama mariposa y adaptados en la (Figura 5). Un ejemplo de economía circular es la investigación planteada por (Alvarado et al. 2023) aplicada en la cadena agroalimentaria del banano para el desarrollo de un modelo óptimo sostenible en el reutilización de materias primas.

El tratamiento de residuos ricos en material orgánico implica la implementación de tecnología para el proceso de transformación a productos derivados, esto involucra operaciones y equipamientos esenciales explicados en la Figura 6 y 7. Como ejemplo de efectividad de estos procesos se puede citar la investigación planteada por (Carvajal et al. 2021), en su investigación incluye los procesos y equipamientos desde la etapa de corte hasta la etapa de destilación para el análisis de una producción más limpia en destilerías de etanol, además propone usar el vapor generado como combustible en una etapa extra de recuperación de calor con el objetivo de reducir el consumo de agua. Otro ejemplo es la investigación de Casco, Diéguez, Sarduy, Vinocunga, Pomavilla and Perez (2022) en el diseño de procesos para la obtención de etanol carburante donde de forma similar se proponen los procesos y operaciones unitarias desde el acondicionamiento del bagazo, el pretratamiento hasta la producción de etanol sin desarrollar una ruta circular. Por su parte, (Gillianne et al. 2022) implementa una propuesta de flujo de materiales y energía para la producción de biogás, con un concepto hacia la economía circular, generando la reducción del consumo de combustibles fósiles y desechos orgánicos presentes en el proceso de producción de etanol.

Los indicadores medioambientales relacionados con el diseño de la ruta tecnológica de esta investigación muestran el aprovechamiento adecuado de los residuos en las tecnologías involucradas. Quezada et al. (2021) en el uso de la herramienta del ciclo de vida donde cantidad de materia prima usada es de 9,47 kg, el consumo de energía llega a los 1,14 kW-h/kg, algunos datos de igual manera son descartados ya que son reincorporados de nuevo al sistema lo que cierra el ciclo de vida.

Con la utilización de las vinazas se pueden reducir los impac-

tos ambientales, la huella del carbono por la reutilización de los residuos generados en la producción de bioetanol como ha sido analizado por (Aguiar, Panimboza, Soto, Cuyanquillo, Pérez and Diéguez 2021) y (Soto et al. 2020).

El análisis económico de la inversión reflejó un VAN negativo para las dos primeras capacidades de producción (Tabla 3). Esto significa que el valor presente de los flujos de efectivo futuros es insuficiente para cubrir el costo inicial de la inversión. Es decir, la inversión no es rentable bajo las condiciones especificadas en el análisis de VAN. Por lo que este resultado sugiere que la inversión no debería llevarse a cabo, ya que no generaría un retorno adecuado para compensar el costo inicial (Pérez et al. 2012).

La capacidad base de 2770 kg arrojó datos del VAN negativo lo que da como resultado que el proceso no será factible, además que el tiempo de retribución es muy alto. Debido a esto para tener el valor efectivo se optó analizar la tercera capacidad de 6810 kg lo cual arrojó un VAN de $ 508,000, lo que indica que el proceso será económicamente factible en un margen de tiempo aceptable. Un ejemplo claro de un proceso económicamente factible es la investigación planteada por (Tuquerres et al. 2020) donde de una forma similar se evaluaron diferentes capacidades. con el software *SuperPro Designer*.

4. Conclusiones

La ruta tecnológica que se propuso en esta investigación evidenció el aprovechamiento de las vinazas bajo un enfoque de economía circular ya que inicia en la caña de azúcar y termina en la caña de azúcar. Esta ruta quedo conformada por la tecnología 2, 3 y 4. En la tecnología 2 se obtuvieron las vinazas junto al bioetanol, CO_2y partió de la caña de azúcar. Las vinazas obtenidas anteriormente se convirtieron en materias primas para producir biogás y digestato en la tecnología 3. Por su parte, la tecnología 4 demostró el aprovechamiento del digestato como biofertilizante para el cultivo de caña de azúcar.

Durante esta ruta tecnológica se generan coproductos como el CO_2, bioetanol y biogás, los que pueden ser aprovechados como materias primas para la producción de otros productos, en algunos casos utilizados directamente o integrados a la ruta tecnológica propuesta. Por lo que conlleva a una disminución de los impactos ambientales que pueden provocar las tecnologías involucradas en la ruta.

El diseño de proceso efectuado utilizando las técnicas de simulación permitió demostrar cuales son las alternativas tecnológicas factibles, viables y compatibles (sostenibles). La alternativa de producción que presentó los mejores indicadores económicos fue la de 6810 kg, con un retorno de inversión del 15,65 % en un periodo de seis años.

Contribuciones de los autores

Micaela Nikolls Lojano Gómez: Adquisición y análisis de los datos; redactó el manuscrito, aprobó la versión enviada y la versión sustancialmente editada

Alba Jhoanna Pila Lidioma: Adquisición y análisis de los datos; redactó el manuscrito, aprobó la versión enviada y la versión sustancialmente editada

Estela Guardado Yordi: Concepción del trabajo; aprobó la versión enviada y la versión sustancialmente editada

Todos los autores aporbaron la version enviada y editada.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

5. Referencias

ADEN, A., M. RUTH, K. IBSEN, J. JECHURA, et al. Lignocellulosic Biomass to Ethanol Process Design and Economics Utilizing Co-Current Dilute Acid Prehydrolysis and Enzymatic Hydrolysis for Corn Stover. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, 2002. Technical Report NREL/TP-510-32438. https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1400855/.

AGUIAR, S., A. PANIMBOZA, A. SOTO, J. CUYANQUILLO, et al. Propuesta para la producción más limpia en destilerías artesanales. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, 2021, 24(2). https://doi.org/10.31910/rudca.v24.n2.2021.1500.

ALVARADO, P., E. CRESPO, D. ALCIVAR, K. SANTANA, et al. Prospectiva de la economía circular en una cadena agroalimentaria del banano. TEC Empresarial, 2023, 17(1), 34-52. https://doi.org/10.18845/te.v17i1.6475.

CAMACHO, R. AND L. DUHARTE Caracterización químico-física de vinazas de destilerías. Ciencia en su PC, 2018, 1(2), 1-13. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181358410001.

CARDONA, C., Ó. SÁNCHEZ, M. MONTOYA AND J. QUINTERO Simulacion de procesos para la obtencion de etanol a partir de caña de azúcar y maíz. Scientia Et Technica, 2005, 11(28), 187-192. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84911707033.

CARRILHO, E., G. LABUTO AND M. KAMOGAWA Destination of vinasse, a residue from alcohol industry: Resource recovery and prevention of pollution. Environmental materials and waste, 2016, 21-43. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803837-6.00002-0.

CARVAJAL, V., R. AMBULUDI, E. CHELE, L. SARDUY AND K. DIÉGUEZ Alternativas de producción más limpias para la destilería "Puro Puyo" Pastaza, Ecuador. I+D Tecnológico, 2021, 17(1), 1-9. https://doi.org/10.33412/idt.v17.1.2906.

CASCO, G., K. DIÉGUEZ, L. SARDUY, R. VINOCUNGA, et al. Process design for obtaining bioethanol fuel by enzymatic hydrolysis of cane bagasse in the Pastaza province. Rev Centro Azucar, 2022, 49(2), 35-46. http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/700.

CERDA, V., E. GUARDADO, G. CERDA, R. VINOCUNGA, et al. Procedimiento para la determinación de los parámetros de operación y de diseño considerando la calidad del azúcar no centrífugo granulado. Entre Ciencia e Ingeniería, 2022, 16(31), 43-50. https://doi.org/10.31908/19098367.2659.

CFN. Cultivo de caña de azúcar. Ficha sectorial, 2017. https://www.cfn.fin.ec/wp-content/uploads/2018/01/Ficha-Sectorial-Azucar-y-Cana.pdf.

CHRISTOFOLETTI, C., J. ESCHER, J. CORREIA, J. MARINHO AND C. FONTANETTI Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. Waste Management, 2013, 33(12), 2752–2761. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.005.

CONADESUCA. Vinazas: Alternativas de uso. Ciudad de México, 2016. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/171932/Nota_

Informativa_Septiembre_Vinazas.pdf.

DIMIAN, A. C., C. S. BILDEA AND A. A. KISS. Introduction in Process Simulation. In: Computer Aided Chemical Engineering, 2014, 35, 35–71. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62700-1.00002-4.

DORMOND, H., A. ROJAS, C. BOSCHINI, G. MORA AND G. SIBAJA Evaluación preliminar de la cáscara de banano maduro como material de ensilaje, en combinación con pasto King Grass (Pennisetum purpureum). InterSedes, 2011, 12(23), 17-31. https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/intersedes/article/view/974.

DURÁN, M., I. SANABRIA AND N. GUTIÉRREZ. Evaluación de la producción de metano en la digestión anaerobia de vinazas pretratadas con ozono. 2015, vol. 24, pp. 167-177. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372015000200011&lng=en&nrm=iso.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Growth Within: A Circular Economy Vision for a Competitive Europe. 2015 (consulta: 15-12-2023). https://www.werktrends.nl/app/uploads/2015/06/Rapport_McKinsey-Towards_A_Circular_Economy.pdf.

ESTRADA, A. AND B. WEBER Biogás y bioetanol a partir de bagazo de agave sometido a explosión de vapor e hidrólisis enzimática. Ingeniería, investigación y tecnología, 2022, 23(2), 1-10. https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2022.23.2.009.

BOWMAN, G., L. AYED AND V. BURG Material and energy flows of industrial biogas plants in Switzerland in the context of the circular economy. Bioresource Technology Reports, 2022, 20, 101273. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101273.

GRAZIANI, P. Economía circular e innovación tecnológica en residuos sólidos: Oportunidades en América Latina. Caracas: CAF, 2018. ISBN 978-980-422-092-0.

LOURENÇO, K., R. ROSSETTO, A. VITTI, Z. MONTEZANO, et al. Strategies to mitigate the nitrous oxide emissions from nitrogen fertilizer applied with organic fertilizers in sugarcane. Science of the Total Environment, 2019, 650, 1476–1486. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.037.

LUO, G., F. TALEBNIA, D. KARAKASHEV, L. XIE, et al. Enhanced bioenergy recovery from rapeseed plant in a biorefinery concept. Bioresource Technology, 2011, 102(2), 1433-1439. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.09.071.

MENOSCAL, K. AND K. CHARI. Propuesta de una ruta tecnológica que permita el aprovechamiento de los residuos generados en la producción de panela, para la obtención de energía y biofertilizante con un enfoque de economía circular. Tesis de Grado Universidad Estatal Amazónica 2023.

MÖLLER, K. AND T. MÜLLER Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. Eng. Life Sci, 2012, 12(3), 242-257. https://doi.org/10.1002/elsc.201100085.

MONSALVE, J., V. MEDINA AND Á. RUIZ Producción de etanol a partir de la cáscara de banano y de almidón de yuca. Dyna, 2006, 73(150), 21-27. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532006000300002&script=sci_arttext.

MONTANO, B. Propuesta de revalorización de residuos de coco en el marco de la economía circular para la empresa More S. de RL. Tesis de Grado Escuela Agrícola Panamericana, 2022. https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/7292.

MOSQUERA, S., J. CARRERA AND H. VILLADA. Variables que afectan la calidad de la panela procesada en el departamento del Cauca. Tesis de Maestria, 2007. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6117629.

PANUCCIO, M., F. ROMEO, C. MALLAMACI AND A. MUSCOLO Digestate application on two different soils: Agricultural benefit and risk. Waste Biomass Valorization, 2021, 12(8), 4341–4353. https://doi.org/10.1007/s12649-020-01318-5.

PÉREZ, A., E. CERVANTES, M. JULIÁN, E. GONZÁLEZ, et al. Procedimiento para enfrentar tareas de diseño de procesos de la industria azucarera y sus derivados. Revista mexicana de ingeniería química, 2012, 11(2), 333-349. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382012000200012&lng=es&tlng=es.

PERIS, R. Biogas Process Simulation using Aspen Plus. Master Thesis Syddansk Universitet, 2011. http://hdl.handle.net/2099.1/14429.

QUEZADA, W., M. PROAÑO, M. VIVAS, A. JIMÉNEZ, et al. Evaluación del impacto ambiental en el proceso de elaboración de panela mediante el Análisis de Ciclo de Vida. Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry, 2021, 78(592), 61-66. https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/385613.

RUEDA, G., MISTRETTA, M., PERALTA, F., GUTIÉRREZ, C., GOLATO, M., PAZ, D. AND G. CÁRDENAS. Caracterización energética de vinazas de caña de azúcar como posible biocombustible para calderas de vapor bagaceras. In Proceedings of the Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente, Argentina. 2016, 611-617.

SHEEHAN, G. AND P. GREENFIELD Utilisation, treatment and disposal of distillery wastewater. Water Research, 1980, 14(3), 257-277. https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90097-4.

SOTO, A., A. PANIMBOZA, A. RAMONES, A. PÉREZ, et al. Huella de carbono en el cultivo de la caña de azúcar. Evaluación agrícola de un caso de estudio de la amazonia ecuatoriana. Ingenio Magno, 2020, 11(1), 22-32. http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/1999.

TUÁREZ, M., M. LAZ, S. BERMELLO AND E. DÍAZ Evaluación de levaduras en la producción de etanol a partir de melaza de caña de azúcar. Revista ESPAMCIENCIA, 2020, 11(2), 115-119. https://doi.org/10.51260/revista_espamciencia.v11i2.193.

TUQUERRES, H., G. CERDA, V. TENEMASA, K. DIÉGUEZ, et al. Process design to obtaining citric acid from the sugarcane bagasse available in Pastaza, Ecuador. Centro Azúcar, 2020, 47(2), 86-96. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612020000200086&lng=es&tlng=en.

VARELA, J. La economía circular: una propuesta de futuro para España y Europa. Trabajo de grado Universidad de Coruña, 2018. https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/21053.

WEINRICH, S. AND M. NELLES Systematic simplification of the Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) – Model development and stoichiometric analysis. Bioresource Technology, 2021, 333. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125124.

WILTS, H. Key Challenges for Transformations Towards a Circular Economy – The Status Quo in Germany. International Journal of Waste Resources, 2017, 7(262), 1-5. https://doi.org/10.4172/2252-5211.1000262.