UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

FACULTAD CIENCIAS DE LA TIERRA

CARRERA AGROINDUSTRIA

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"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"

AUTOR(ES):

Kevin Alexander Chari Castillo

Kerly Anahi Menoscal Cochea

DOCENTE - TUTOR:

Dr. Amaury Pérez Martínez, PhD

Puyo - Pastaza - Ecuador

2023

UEA
UNIVERSIDAD
ESTATAL AMAZÓNICA

FORMATO 4
APROBACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

En el siguiente cuadro se detalla un conjunto de criterios a evaluar con un total de cien (100) puntos.

Criterios	Puntaje	Argumentos de la calificación
1. TÍTULO		
El título es conciso e informativo de la idea principal del escrito. Genera expectativas de lectura que se cumplen.	5.0 / 5	
2. RESUMEN		
Entrega información necesaria que oriente al lector a identificar de que se trata la investigación y su relevancia. Incorpora los objetivos, metodología, principales harrazgos y conclusiones.	5.0 / 5	
3. INTRODUCCIÓN		
Entrega información sobre temática a tratar. Describe la relevancia del tema dentro de las temáticas de investigación, vinculación y docencia. Presentación del problema y objetivos del problema del artículo de manera clara y concisa.	20.0 / 20	
4. MARCO TEÓRICO		
Marco teórico coherente y articulado con los objetivos. Entrega conceptos de términos que son empleados en el estudio. Sustenta el referente conceptual con adecuadas fuentes de autoridad.	15.0 / 15	
5. METODOLOGÍA		
Describe el tipo de investigación a desarrollar. Expone con claridad el procesamiento de la información y obtención de los datos. Plantea los criterios de análisis con que se abordo la información.	15.0 / 15	

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS		
Entrega los resultados de manera organizada a partir del problema planteado, objetivos específicos, etc. Los cuadros y figuras son pertinentes y estan claramente representados. El texto no repite infromación entregada en los cuadros y figuras.	25.0 / 25	
7. CONCLUSIONES		
Las conclusiones deben ser claras y precisas, acorde a los objetivos trazados. Discute, reflexiona sobre los resultados obtenidos.	10.0 / 10	
8. REFERENCIAS		
Atiende las normas APA en las citas, fuentes y referencias. Las referencias bibliográficas tienen la fuente en el texto y viceversa.	5.0 / 5	
VALORACIÓN TOTAL	100	CIEN

DICTAMEN

Marque la casilla correspondiente a su criterio de evaluación respecto al documento revisado.

Recomendación	Marque con X
Aprobar	X
No Aprobar	
CALIFICACIÓN	100

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
JUAN ELIAS GONZALEZ RIVERA

JUAN ELIAS GONZÁLEZ RIVERA (PAR CIEGO)

Dado en la ciudad de PUYO, a los 11 días del mes de SEPTIEMBRE de 2023

UEA
UNIVERSIDAD
ESTATAL AMAZÓNICA

FORMATO 4
APROBACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

En el siguiente cuadro se detalla un conjunto de criterios a evaluar con un total de cien (100) puntos.

Criterios	Puntaje	Argumentos de la calificación
1. TÍTULO		
El título es conciso e informativo de la idea principal del escrito. Genera expectativas de lectura que se cumplen.	5.0 / 5	Cumple. En general es un excelente trabajo, felicitaciones a sus autores y tutor
2. RESUMEN		
Entrega información necesaria que oriente al lector a identificar de que se trata la investigación y su relevancia. Incorpora los objetivos, metodología, principales harrazgos y conclusiones.	5.0 / 5	Cumple
3. INTRODUCCIÓN		
Entrega información sobre temática a tratar. Describe la relevancia del tema dentro de las temáticas de investigación, vinculación y docencia. Presentación del problema y objetivos del problema del artículo de manera clara y concisa.	20.0 / 20	Cumple
4. MARCO TEÓRICO		
Marco teórico coherente y articulado con los objetivos. Entrega conceptos de términos que son empleados en el estudio. Sustenta el referente conceptual con adecuadas fuentes de autoridad.	15.0 / 15	Cumple
5. METODOLOGÍA		
Describe el tipo de investigación a desarrollar. Expone con claridad el procesamiento de la información y obtención de los datos. Plantea los criterios de análisis con que se abordo la información.	15.0 / 15	Cumple

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS		
Entrega los resultados de manera organizada a partir del problema planteado, objetivos específicos, etc. Los cuadros y figuras son pertinentes y estan claramente representados. El texto no repite infromación entregada en los cuadros y figuras.	25.0 / 25	Cumple
7. CONCLUSIONES		
Las conclusiones deben ser claras y precisas, acorde a los objetivos trazados. Discute, reflexiona sobre los resultados obtenidos.	10.0 / 10	Cumple
8. REFERENCIAS		
Atiende las normas APA en las citas, fuentes y referencias. Las referencias bibliográficas tienen la fuente en el texto y viceversa.	5.0 / 5	Cumple
VALORACIÓN TOTAL	100	CIEN

DICTAMEN

Marque la casilla correspondiente a su criterio de evaluación respecto al documento revisado.

Recomendación	Marque con X
Aprobar	X
No Aprobar	
CALIFICACIÓN	100

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
MARIA DEL CARMEN CASTELO NAVEDA

MARÍA DEL CARMEN CASTELO NAVEDA (PAR CIEGO)

Dado en la ciudad de PUYO, a los 08 días del mes de SEPTIEMBRE de 2023

Ouriginal by Turnitin

Firmado electrónicamente por:
AMAURY PEREZ

Document Information

Analyzed document	Chari-Menoscal-TICv17-RV-APM-06082023.doc (D172644150)
Submitted	2023-08-07 22:03:00
Submitted by	
Submitter email	ka.menoscalc@uea.edu.ec
Similarity	1%
Analysis address	amperez.uea@analysis.urkund.com

Sources included in the report

SA **Deny Oliva Merencio.docx**
Document Deny Oliva Merencio.docx (D118008218) 1

Entire Document

"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"
"Proposal of a technological route that allows the use of waste generated in the production of panela to obtain energy and biofertilizer with a circular economy approach."
Menoscal Cochea Kerly Anahi1 ka.menoscalc@uea.edu.ec Chari Castillo Kevin Alexander1 ka.charic@uea.edu.ec Pérez Martínez Amaury, Ph. D.1
amperez@uea.edu.ec
Universidad Estatal Amazónica, Facultad de Ciencias de la Tierra, Carrera de Ingeniería Agroindustrial (1)
Resumen
Las rutas tecnológicas se han convertido en herramientas que permiten planificar que productos se pueden obtener en una cadena de producción aprovechando sus diferentes residuos. La economía circular se integra en este contexto mediante la reutilización de los derivados y residuos generados en la elaboración de panela. Estos residuos, incluyen el bagazo y la cachaza que sirven para obtener productos tales como: alimentos, biofertilizantes, combustibles, entre otros. Por tal razón, el objetivo es proponer 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. La ruta tecnológica fue desarrollada por una metodología que contiene cuatro fases y otra centrada en la simulación de procesos con el software de SuperPro Desinger. Donde, la simulación reportó un VAN $ 556,000, determinando que el proyecto es económicamente factible. El digestato obtenido por las tecnologías implementadas en la simulación, es rico en nutrientes y se puede utilizar como fertilizante orgánico en la agricultura, evitando la necesidad de emplear fertilizantes químicos o su sustitución parcial. Además, el proceso de digestión anaeróbica produce biogás, que puede utilizarse como fuente de energía renovable para diversas aplicaciones.
Palabras Clave: ruta tecnológica, simulación, digestión anaerobia, economía circular, SuperPro Designer.
Abstract

"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"

"Proposal of a technological route that allows the use of waste generated in the production of panela to obtain energy and biofertilizer with a circular economy approach."

Menoscal Cochea Kerly Anahi[1]
ka.menoscalc@uea.edu.ec

Chari Castillo Kevin Alexander[1]
ka.charic@uea.edu.ec

Pérez Martínez Amaury, Ph. D.[1]
amperez@uea.edu.ec

Universidad Estatal Amazónica, Facultad de Ciencias de la Tierra, Carrera de Ingeniería Agroindustrial (1)

Resumen

Las rutas tecnológicas se han convertido en herramientas que permiten planificar qué productos se pueden obtener en una cadena de producción aprovechando sus diferentes residuos. La economía circular se integra en este contexto mediante la reutilización de los derivados y residuos generados en la elaboración de panela en la provincia de Pastaza. Estos residuos, incluyen el bagazo y la cachaza que sirven para obtener productos tales como: alimentos, biofertilizantes, combustibles, entre otros. Por tal razón, el objetivo es proponer 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. La ruta tecnológica fue desarrollada por una metodología que contiene cuatro fases y otra centrada en la simulación de procesos con el software de *SuperPro Desinger*. Donde, la simulación reportó un VAN $ 556,000, un TIR de 18.20%, un retorno de inversión de 26.66%, margen bruto de 39.69% y un ingreso de 2.10$ por unidad de producto para una capacidad de 2.277 t de caña/lote, determinando que el proyecto es económicamente factible con un tiempo de retribución de 3.75 años. El digestato obtenido por las tecnologías implementadas en la simulación, es rico en nutrientes y se puede utilizar como fertilizante orgánico en la agricultura, evitando la necesidad de emplear fertilizantes químicos o su sustitución parcial. Además, el proceso de digestión anaeróbica produce biogás, que puede utilizarse como fuente de energía renovable para diversas aplicaciones.

Palabras Clave*:* ruta tecnológica, simulación, digestión anaerobia, economía circular, *SuperPro Designer.*

Abstract

Technological routes have become tools that allow planning which products can be

obtained in a production chain, taking advantage of its different residues. The circular economy is integrated into this context through the reuse of derivatives and waste generated in the production of panela in the province of Pastaza. These residues include bagasse and filter cake, which are used to obtain products such as food, biofertilizers, and fuel, among others. For this reason, the objective is to propose a technological route that allows the use of waste generated in the production of sugar non-centrifugal, to obtain energy and biofertilizer with a circular economy approach. The technological route was developed by a methodology that contains four phases, and another focused on the simulation of processes with the SuperPro Designer software. Where the simulation reported a VAN of $556,000, an IRR of 18.20%, a return on investment of 26.66%, a gross margin of 39.69%, and an income of $2.10 per unit of product for a capacity of 2,277 t of cane/batch, determining that the project is economically feasible with a payback time of 3.75 years. The digestate obtained by the technologies implemented in the simulation is rich in nutrients and can be used as an organic fertilizer in agriculture, avoiding the need to use chemical fertilizers or their partial substitution. In addition, the anaerobic digestion process produces biogas, which can be used as a renewable energy source for various applications.

***Keywords**:* technology route, simulation, anaerobic digestion, circular economy, *SuperPro Designer*.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los modelos económicos circulares se han desarrollado sobre distintas ideas de aprovechamiento de los residuos generados en diferentes sectores económicos. Este aprovechamiento se centra en el uso y reducción de estos desechos ocasionados, fundamentalmente, por las industrias. Todo el paradigma económico circular se aplica a los residuos de distintos procesos como materias primas de entrada para otros, impulsando los beneficios para la sociedad de forma sostenible (Aso, 2021).

En la investigación realizada por Esposito et al. (2020), analiza que la economía circular y sus enfoques tienen una amplia discusión en cuanto al marco agroalimentario y científico en general. Esto se debe a que la mayor parte de los residuos son ocasionados por las distintas empresas alimentarias.

La agroindustria permite la generación de diferentes subproductos y residuos en grandes cantidades como menciona Vargas Corredor and Pérez Pérez (2018), donde su aprovechamiento es una gran solución para la reducción del impacto ambiental siendo uno de los mayores problemas a nivel mundial. Lo mismo ocurre con la producción de azúcar y panela de caña, donde sus residuos (bagazo, cachaza, etc) entran en esta categoría de contaminación por sus grandes cantidades sino son aprovechados como materias primas para la obtención de otros productos (coproductos). No obstante, estos pueden ser utilizados para la generación de biocombustibles, fertilizantes e incluso generación de energía eléctrica, calorífica y otros productos con valor agregado (Gutiérrez Antonio et al., 2020).

En el amplio contexto de la economía circular y los residuos ocasionados por las industrias, han llevado a toda una comunidad científica a distintas investigaciones (Silva Alvarado et al., 2023). Por ejemplo, Diéguez Santana et al. (2022) presentaron modelos conceptuales de la cadena de suministro de productos de pitajaya en relación con la economía circular, identificando las oportunidades de mejora.

Así mismo, Ocazionez Jiménez and Sandoval Rincón (2020), propuso la utilización de abono orgánico elaborado con estiércol de gallinas y residuos de la producción de cebollas, con la finalidad de compensar los nutrientes en el cultivo de las cebollas aplicando principios de la economía circular. De la misma manera, Bayona Ayala et al. (2020), aplicaron economía circular utilizando materias lignocelulósicas, como el bagazo de caña obtenido de la producción de panela para la elaboración de etanol, teniendo buenos resultados mediante la aplicación de hidrólisis con peróxido con la finalidad de aumentar los azúcares fermentables.

Por otra parte, la economía circular permite que los residuos sean reintroducidos a un sistema de producción mediante modelos estratégicos para reducir contaminaciones. De esta forma, se cierran los "bucles" de las cadenas productivas para que, por medio de búsqueda de información se planteen rutas tecnológicas adecuadas para el aprovechamiento de estos residuos (González & Pomar Fernández, 2021). Por ejemplo, una ruta tecnológica planteada por Flórez Martínez et al. (2022) basada en la búsqueda de información sobre el azúcar de caña no centrifugada, abarcando diferentes escenarios para el aprovechamiento de la materia prima.

La caña de azúcar corresponde a uno de los cultivos con mayores expansiones en la Amazonía ecuatoriana, especialmente en Pastaza, donde sus principales productos son la panela y el alcohol (Aguiar et al., 2021). Por otro lado, la producción de caña en toda la Amazonía corresponde a un 54.40%, mientras que un 65% en la elaboración de panela (Carvajal Padilla et al., 2021). La panela es un producto de interés a nivel nacional, donde esta industria por la falta de tecnología en el proceso, la convierte en una industria de carácter artesanal afectando a la sostenibilidad (Mosquera et al., 2007).

Aunque, en Colombia se han realizado aportes en cuanto al desarrollo del proceso de obtención de panela, estos no son suficientes. Uno de estos aportes es en la modelación matemática de los procesos energéticos y exergéticos, de tal manera que se analicen y evalúen propuestas de mejoras en los procesos unitarios claves para la obtención del producto (Guerrero Useda & Escobar Guzmán, 2015).

En Ecuador, se ha realizado diferentes investigaciones sobre la producción de panela. Estas investigaciones se centran en la simulación (Cerda-Mejia et al., 2021), calidad (Quezada Moreno et al., 2016) y sistemas de monitoreo (Mejía et al., 2022). Pero no se han desarrollado investigaciones sobre la aplicación de la economía circular en este proceso. Aunque se conoce que el bagazo y la cachaza son utilizados como fertilizantes (Matheus, 2004). Por ejemplo, León Martínez et al. (2013) menciona que, el bagazo de caña tiene dos

finalidades, alimentación animal y fines energéticos. De la misma manera, Bernal Gutiérrez et al. (2017); Ochoa George et al. (2010); Valdés Delgado (2015), consideran que la cachaza, pueden ser aprovechada en la obtención de biogás y biofertilizante. Por tanto, estos coproductos pueden ser utilizados en suelos para la misma agricultura de la caña de azúcar evitando el uso de fertilizantes sintéticos o químicos (FAO, 2002).

De acuerdo con Zea Barahona et al. (2019), se pueden lograr obtener fertilizantes por medio del bagazo de caña aplicando una fermentación con melaza y agua obteniendo resultados positivos en rentabilidad. Por otro lado, Arias Cedeño et al. (2021) al utilizar las cenizas del bagazo de caña obtenidas de la combustión como fertilizantes, obtuvo resultados óptimos en los parámetros del crecimiento de plantas agrícolas cultivadas en condiciones controladas, especialmente por poseer de macronutrientes con potencial fosfórico. De la misma manera, Eich Greatorex et al. (2017), al utilizar digestato, obtenido de una digestión anaerobia con materias ricas en lignina, como el bagazo, obtuvo un fertilizante con buen potencial al ser co-digeridos con estiércol.

Según Vaneeckhaute et al. (2015) menciona que el uso de fósforo contenido en el estiércol animal es una forma sostenible para obtener fertilizante. Esto se puede mejorar gracias a una co-digestión anaeróbica con la finalidad que se cree un digestato para uso en el campo como un fertilizante, lo que al ser combinados con la materia orgánica podrían ayudar al aprovechamiento de residuos (Eich Greatorex et al., 2017).

Aunque se han realizado investigaciones sobre el aprovechamiento de los coproductos de la industria de obtención de azúcar y panela, para la generación de nuevos productos, energía, biofertilizantes entre otros. No se aprecia que se haya realizado un análisis desde el enfoque de la economía circular de estos procesos. Por esta razón el objetivo de la investigación es proponer 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.

2. MATERIALES Y MÉTODOS/METODOLOGÍA

En la Figura 1 se muestra la metodología adaptada de Romero Vistín (2022) y Julián Ricardo et al. (2018) para la generación de la propuesta de una ruta tecnológica con un enfoque de economía circular. Las acciones que se realizaron en cada uno de los pasos se describen en los siguientes epígrafes que contiene las herramientas que se utilizaron y el objetivo de cada uno de ellos.

2.1 Desarrollo de la ruta tecnológica

La primera parte de la Figura 1, se aplica la metodología propuesta por Romero Vistín (2022) correspondiente al desarrollo de la ruta tecnológica. Esta parte de la metodología consta de cuatro fases descritas a continuación:

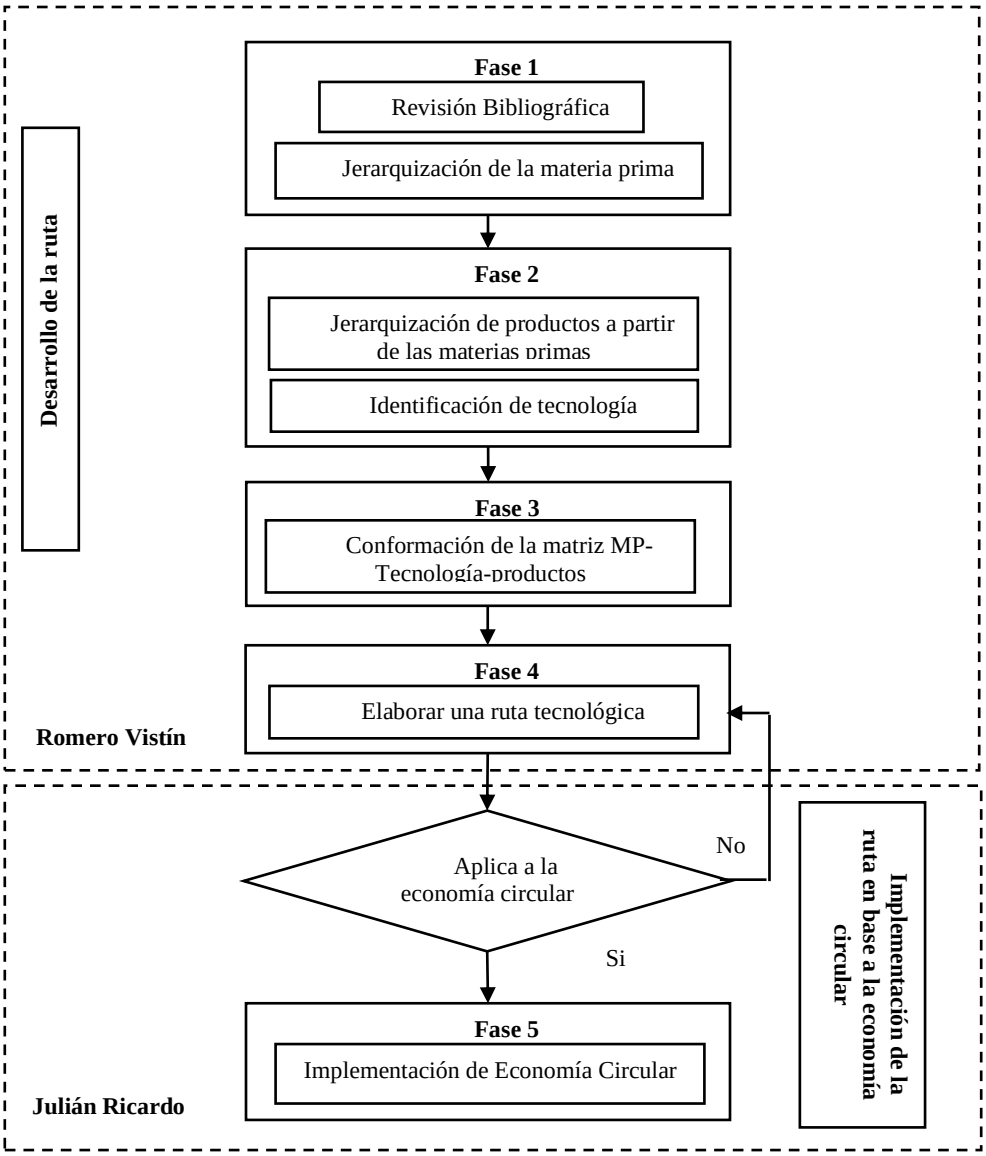

Figura 1. Metodologías aplicadas en la propuesta de la ruta tecnológica.
Fuente: Elaboración propia

- **Fase 1. Jerarquización de materia prima**

El objetivo de esta fase consiste en obtener la matriz para la jerarquización de materias primas a través de una revisión bibliográfica que permita tener fuentes de información para la identificación de las materias primas.

- **Fase 2. Jerarquización de productos a partir de las materias primas**

Tiene como objetivo identificar los productos que se obtienen a partir de las materias primas jerarquizadas.

- **Fase 3. Conformación de la Matriz**

Esta fase tiene como objetivo conformar una matriz de las materias primas, tecnologías y

productos, por medio de la identificación de las operaciones que se involucran para la transformación de materias primas en productos.

- **Fase 4. Elaboración de la ruta tecnológica**

El objetivo de esta fase consiste en elaborar una ruta tecnológica que permita tomar la decisión si es o no aplicable una economía circular.

2.2 Implementación de la ruta tecnológica.

Para la implementación de la ruta tecnológica se utilizó la herramienta informática *SuperPro Designer* v 10.0, donde se siguieron los pasos propuestos por la metodología de Julián Ricardo et al. (2018) que permitieron que se lleve a cabo la simulación. Esta metodología se basa en la simulación de procesos donde consta de dos pasos, la entrada de los datos para que se realice la simulación, y el proceso para que se lleve a cabo esta simulación.

Para el primer paso de entrada de datos, se buscó información sobre la composición química de la caña de azúcar, bagazo, cachaza y estiércol de cerdo. Por lo cual se necesitó de artículos científicos, revistas, libros, entre otras fuentes confiables, así como para las condiciones de operación.

2.2.1 Entrada de datos para la simulación

Método de operación

El *SuperPro Designer* permite simular de dos maneras, continua o discontinua. En este trabajo se realizó de forma discontinua, donde por medio de la producción de panela se obtiene bagazo y cachaza que sirven como materias primas para que pasen al acondicionamiento, posterior a esto ocurre una hidrólisis y finalmente termina en una digestión anaerobia para la producción de biogás y digestato.

Registro de materiales

En el proceso de simulación para la obtención de digestato y biogás se utilizó los siguientes materiales: caña de azúcar, enzimas, vapor y estiércol de cerdo. Donde, cada uno tiene distintas composiciones como se muestra en la Tabla 1 para una capacidad de 2.277 t de caña/lote.

Tabla 1. Composición química de la caña de azúcar y estiércol.

Componentes	Caña de azúcar	Referencia	Estiércol de cerdo	Referencia
Agua	70.540%	(Álvarez Díaz et al., 2019)	90.800	(Chastain et al., 1999)
Carbohidratos	13.000%		-	
* Proteínas	0.600%		*9.200%	(Chastain et al., 1999)
Lípidos	0.365%		-	
Cenizas	1.270%		-	
Azúcares	14.000%		-	
Alcoholes	0.225%		-	

*****Contiene microorganismos

Fuente: Elaboración propia.

Construcción de diagrama de flujo.

Se utilizó la herramienta informática *SuperPro Designer* para desarrollar las transformaciones y operaciones involucradas en el proceso con la finalidad de elaborar un diagrama de flujo.

Procedimiento operacional.

Se configuraron las operaciones y transformaciones involucradas en la producción de panela, digestato y biogás, desde un acondicionamiento de la materia prima hasta la obtención de los productos finales (Ochoa George et al., 2010); (Valdés Delgado, 2015); (Aguilar et al., 2010). Primero se obtuvieron subproductos, bagazo y cachaza, por medio de las operaciones para la producción de panela (Bohórquez et al., 2014). Este proceso es seguido del acondicionamiento del bagazo y cachaza para que pasen por un molino y faciliten el proceso de co-digestión o hidrólisis realizado en un biorreactor donde se incorporan enzimas y a determinadas temperaturas rompen las fibras donde se obtienen azucares reductores y otros componentes (Zhao et al., 2009). Finalmente, estos son llevados a un tanque de almacenamiento para que pasen a un digestor donde se incorpora el estiércol de cerdo y todas las reacciones químicas involucradas en el proceso de digestión anaerobia (Martinez et al., 2014);(Pinos et al., 2012); (Camargo & Williams, 2012).

2.2.2 Proceso de simulación

La simulación de la propuesta del proceso tecnológico permitió la resolución de los balances de masa y energía, el dimensionamiento del equipamiento, la estimación del costo de inversión, producción a partir del diagrama de flujo del proceso, la caracterización de las corrientes de salida, en función de si son productos, coproductos o residuos.

Análisis económico

Se identificó y analizó los costos de operación, se incluyeron los materiales y materias primas, las facilidades auxiliares, tiempo de operación de los equipos en cada etapa, salarios, entre otros. Se accedió a las evaluaciones por medio del *SuperPro Designer* en el apartado *Section: Main Section/Operating Cost Adjustments* y *Labor*. Por otro lado, para un reporte económico sobre la producción se dirigió a la sección de *Reports/Economic Evaluation (EER)*.

Análisis medioambiental

Para el análisis medioambiental se usó la metodología planteada por (Pérez Martínez et al., 2012) que sirvieron para los cálculos de los indicadores.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Desarrollo de la ruta tecnológica

Jerarquización de las materias primas

Los principales cultivos que se encuentran en la provincia de Pastaza según los datos obtenidos del Sistema de Información Pública Agropecuaria (SIPA), se detallan en la Tabla 2. Se observa que la caña de azúcar, plátano y banano son las materias primas más importantes en el área de producción de la provincia de Pastaza con buenos rendimientos. Sin embargo, existen otras como el cacao, maíz duro seco, café, limón, piña y yuca cultivadas en menor proporción, pero son importantes por su rendimiento en el desarrollo de la provincia.

La industria azucarera constituye una de las actividades más relevantes que vincula la agricultura con la industria, siendo una de las más antiguas. En Pastaza, se representa como un rubro agrícola principal, donde la materia prima es explotada como monocultivo y asociada a otros para obtener panela en bloque y granulada, miel, jugo de caña y aguardiente (Valle et al., 2021).

Tabla 2. Jerarquización de materias primas en la provincia de Pastaza

N°	Materia prima	Producción (t)	Rendimiento (t/Ha)	Referencia
1	Caña de azúcar	10,201	16.58	(SIPA, 2022)
2	Plátano	3,064	4.60	
3	Banano	1,394	26.59	
4	Yuca	848	2.03	
5	Maíz duro seco	111	1.20	
6	Cacao	46	0.42	
7	Limón	13	4.56	
8	Café	0	0.17	
9	Piña	0	19.09	

Fuente: Elaboración propia

Jerarquización de los productos a partir de materias primas

La fabricación de panela en la provincia de Pastaza está enfocada como una de las industrias que se basa en producciones artesanales (Quezada-Moreno et al., 2015). De acuerdo con datos establecidos por la Asociación de Cañicultores de Pastaza (ASOCAP), un 54.4% de caña de azúcar de la Amazonía ecuatoriana va direccionada a la elaboración de panela con un 65% de producción, mientras que un 35% va dirigida a la producción de aguardiente de caña (Carvajal Padilla et al., 2021).

Descripción de las tecnologías utilizadas.

En la Tabla 3 se muestra una matriz de interacción entre las materias primas, los productos obtenidos y las tecnologías aplicadas. Para la jerarquización de los productos a partir de las materias primas se aplican las tecnologías adecuadas, donde la Tecnología 1, se basa en la obtención de la panela teniendo como materia prima la caña de azúcar y como productos la panela, bagazo y cachaza. En la tecnología 2 se obtiene el etanol, CO_2 y las vinazas como productos por medio del bagazo, al ser obtenido de la Tecnología 1 es un coproducto que se vuelve como materia prima en la Tecnología 2. En cuanto a la tecnología 3, el bagazo, la cachaza y vinazas pasan como materias primas para la obtención

de biogás y digestato. Finalmente, en la tecnología 4 el digestato, obtenido de la tecnología anterior, se implementa como fertilizante en los cultivos de caña de azúcar. Cada una de estas tecnologías conlleva de operaciones unitarias para la obtención de los productos y coproductos, estas se detallan a continuación.

Tecnología 1 (Bagazo, Cachaza, Panela)

- En esta tecnología se llevan a cabo las operaciones como la molienda, filtración, evaporación y cristalización.

Tecnología 2 (Etanol, Vinazas, CO_2)

- Para la obtención de los productos en esta tecnología se lleva a cabo una fermentación y destilación.

Tecnología 3 (Biogás, Digestato)

- Para esta tecnología se efectúa la etapa de hidrólisis y la etapa de digestión anaerobia.

Tecnología 4 (Cultivos de caña)

- El digestato obtenido se usa para el cultivo de caña de azúcar como un fertilizante, donde las tecnologías aplicadas son, preparación de suelo, siembra, fertilización, riego, control de malezas, maduración, corte, alce, transporte y manejo de residuos.

Tabla 3. Jerarquización de los productos a partir de las materias primas con sus respectivas tecnologías.

		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									
	Digestato									Tecnología 4

Fuente: Elaboración propia

Existen dos escenarios distintos que pueden formar una ruta tecnológica, como se muestra en la Figura 2. Un escenario se basa en la diversificación de la panela centrada en la obtención de etanol y otro tiene enfoque de economía circular, donde se aprovecha el bagazo y cachaza, para la obtención de biogás y digestato. Además, se pueden aplicar una tecnología para el digestato e incorporarlo en los cultivos de caña como un biofertilizante.

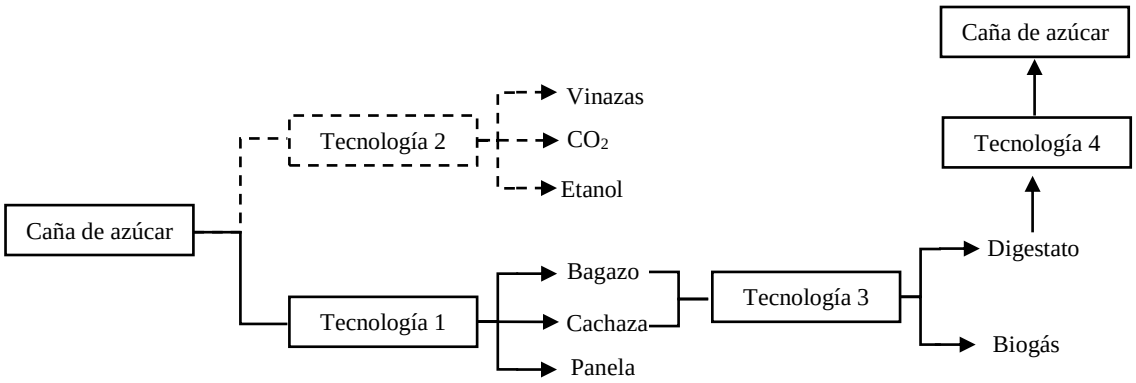

Figura 2. Esquema general de las rutas tecnológicas con sus productos.
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3 se muestra el enfoque de economía circular, donde se utiliza caña de azúcar como materia prima que sigue una serie de procesamientos en la que se obtiene diferentes residuos y productos. La tecnología 1 está en competencia con la tecnología 2 pero esta termina con la obtención de vinazas, dióxido de carbono y etanol, a diferencia de la tecnología 1 que sigue con el enfoque planteado y se obtienen 3 productos la panela, el bagazo y cachaza. La panela puede ser un producto para comercializar, pero no cumple con el enfoque buscado, en cambio, el bagazo y la cachaza pasan por los diferentes procesos de la tecnología 3 convirtiéndose en digestato nutrido con estiércol de cerdo que puede ser utilizado en la tecnología 4. En uno de los procesos de la tecnología 4 se encuentra la etapa de fertilización para el óptimo crecimiento de los cultivos cañas, por lo que se utilizaría el digestato como fertilizante obtenido de la misma producción del procesamiento de la caña, cumpliendo con el enfoque de economía circular.

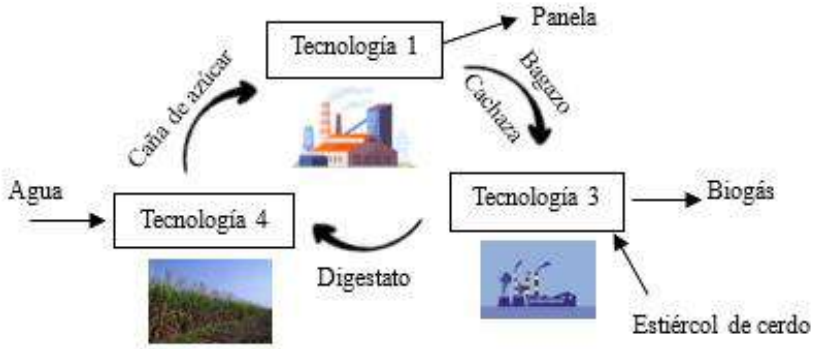

Figura 3. Esquema de economía circular.

Fuente: Elaboración propia

La caña de azúcar es una materia prima donde se pueden llegar a obtener una variabilidad de coproductos, algunos de ellos pueden formar parte de una economía circular. Por ejemplo, el bagazo y la cachaza al seguir con una determinada tecnología se puede obtener biogás y digestato (Romero & Alvarez-Yanamango, 2018), donde el digestato puede ser reincorporado en los cultivos de caña de azúcar como biofertilizante cumpliendo el objetivo de la economía circular (Matheus, 2004). Existe similitud con una investigación

realizada por Alzate Acevedo et al. (2021) donde aplica una economía circular en base a los residuos de la producción y procesamiento del banano. La economía es aplicable ya que el banano tiene altos contenidos de celulosa, hemicelulosa entre otros tipos de fibra que permiten una fermentación y una degradación anaerobia, con la finalidad de obtener productos como biocombustibles, biogás, biodiesel y fertilizantes orgánicos que pueden ser reincorporados en los cultivos del banano.

3.2. Implementación de la ruta tecnológica

Definición del esquema tecnológico

Para empezar, se da a conocer todo proceso que ha sido necesario para la llevar a cabo la implementación de la ruta tecnológica, de modo que se usan 2 tecnologías y se divide en 4 secciones A, B, C y D: Sección A; Producción de panela, Sección B; Acondicionamiento de los coproductos, Sección C; Co-digestión, Sección D; Digestión anaerobia. Para la definición del esquema tecnológico se utilizó el software de simulación *SuperPro Desing*. Como se puede presenciar en la Figura 4 la ruta tecnológica inicia con la producción de panela (Sección A), proceso donde consiste en la entrada de la caña de azúcar para obtener la panela y como coproductos el bagazo y la cachaza.

Los equipos que se utilizaron son: a) Molino, b) Filtro, c) Clarificador, d) Evaporadores, e) Concentrador, f) Mezclador.

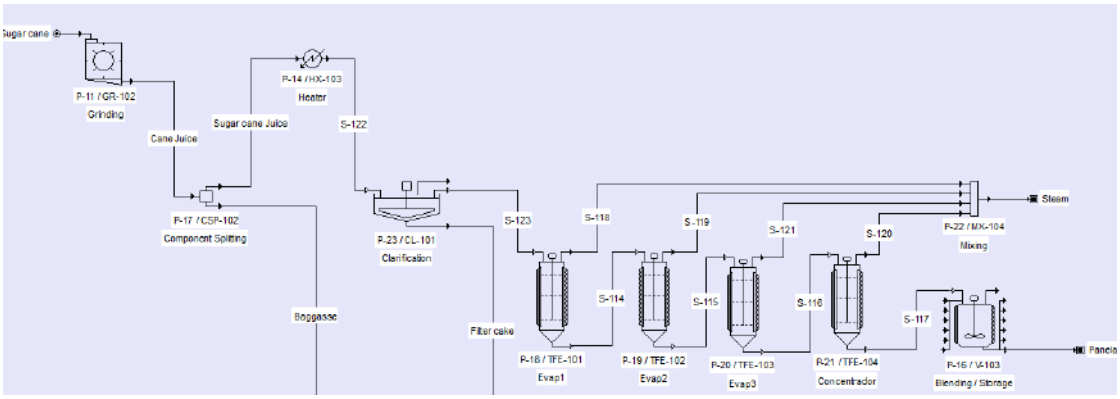

Figura 4. Sección A, Producción de panela
Fuente: Elaboración propia

En la etapa de Acondicionamiento de los Coproductos (Sección B), como se muestra en la Figura 5, el bagazo y cachaza obtenidos en la producción de panela entran al proceso de molienda donde se reduce significativamente el tamaño facilitando los procesos que se presentan más adelante. Luego, se transporta el bagazo triturado y la cachaza por medio de un transportador tipo tornillo que empuja y mueve estos coproductos a una bomba de engranes de tipo hidráulico que consta de 2 engranajes encerrados, usado para transportar sólidos y fluidos al siguiente procedimiento. Los equipos usados en el proceso de acondicionamiento fueron: a) Molino de Martillo, c) Separador de compuestos, d) Transportador tipo tornillo, e) Bomba de engranes.

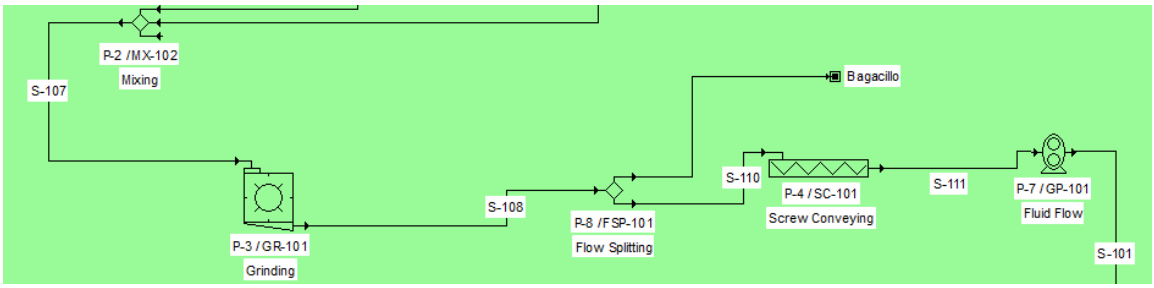

Figura 5. Sección B, Acondicionamiento de los Coproductos
Fuente: Elaboración propia

Para la etapa de co-digestión (Sección C) mostrada en la Figura 6, se comienza con el proceso de hidrólisis térmica. En el cual, se hace un tratamiento de temperatura a una presión alta, donde ingresa una corriente de vapor que permite romper los enlaces químicos de los compuestos del bagazo y cachaza. Luego, el producto de la hidrólisis pasa por un enfriador que equilibra la temperatura y este entre a un mezclador donde se añade la enzima hidrolasa que cataliza las reacciones químicas. Seguidamente, el producto pasa a la etapa de hidrólisis enzimática donde se rompen los enlaces faltantes e ingresen a una zona de almacenamiento que está a aproximadamente a una temperatura de 25.2° C. Para esta serie de etapas se usaron los siguientes equipos: a) Reactor de agitación continua (hidrólisis térmica), b) Intercambiador de calor (enfriador), c) Mezclador, d) Reactor de agitación continua (hidrólisis enzimática), e) Almacenador de materia.

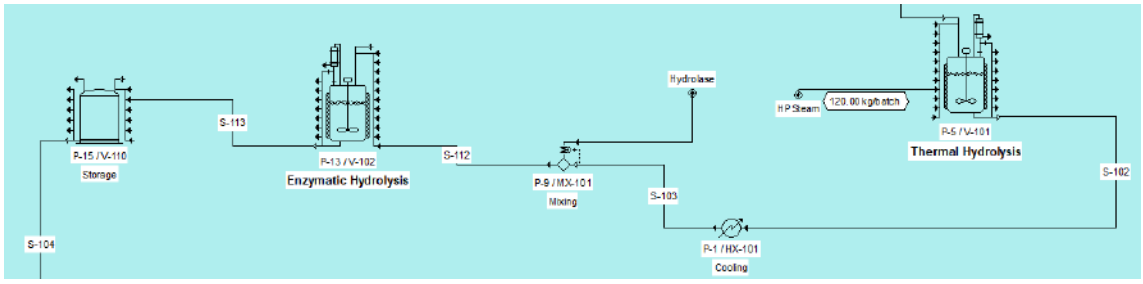

Figura 6. Sección C, Hidrólisis o Co-Digestión
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 7 se encuentra la etapa de digestión anaerobia (Sección D), que comienza con el transporte del bagazo y cachaza almacenados, posteriormente hidrolizados, hacia un enfriador para estabilizar la temperatura de 25°C a 25.2°C. Una vez estabilizada la temperatura de la materia que ingresó al enfriador, se pasa a un mezclador donde entra el estiércol de cerdo compuesto de agua y proteínas necesarias para el proceso de digestión anaerobia. Consiguiente, se pasa la mezcla al digestor anaeróbico para establecer las condiciones adecuadas para que los microorganismos actúen correctamente y se genere el producto de digestato y biogás, que se puede hacer opcionalmente un sistema de almacenamiento y tratamiento de gases. Los equipos usados para el proceso de digestión son: a) Intercambiador de calor (enfriador), b) Mezclador, c) Digestor anaeróbico.

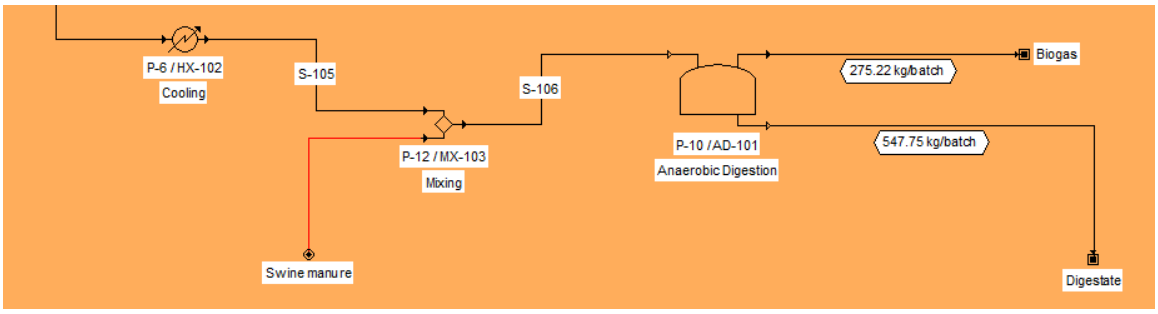

Figura 7. Sección D, Digestión Anaerobia.
Fuente: Elaboración propia

Las tecnologías aplicadas para la obtención del digestato y biogás fueron: producción de panela, acondicionamiento de coproductos, co-digestion y digestión anaerobia. El proceso inicia con la elaboración de panela donde la caña de azúcar pasa por un molino y posterior el jugo extraído llevarlo a evaporadores hasta finalmente una concentración (Guerrero Useda & Escobar Guzmán, 2015). El diagrama de flujo basado en la co-digestión y digestión anaerobia, etapa siguiente al acondicionamiento, permiten tener polímeros, de acuerdo con Albernas Carvajal et al. (2017); Casco-Méndez et al. (2022).

Las tecnologías propuestas son muy similares a lo planteado por (Rojas Remis & Mendoza Espinosa, 2012) donde el proceso consta de la etapa de recolección y mezcla, digestión, absorción y almacenamiento. De la misma manera Mantilla González et al. (2007) disponen de una tecnología planteada en una planta piloto donde comienza con una etapa de, recolección de materia prima, mezclado, biodigestión, limpieza de biogás y almacenamiento.

Balances de masa y Energía.

En la Tabla 4 se muestran las corrientes intermedias obtenidas de la producción de panela que sirven para la implementación de la ruta tecnológica para una capacidad de 2.277 t de caña/lote. Los valores fueron modificados para que nos dé un 100% de la composición, en Anexos se encuentra la tabla con mayor detalle. De la misma forma se encuentran como corrientes de salida el digestato y sus composiciones, entre ellas las estruvitas.

Las corrientes más importantes para la economía son: el bagazo, cachaza y digestato, cada una se diferencia por su respectiva composición en donde se comparan sus porcentajes resultantes tanto, para los datos bibliográficos, como para los datos del software de *SuperPro Desing*. Por lo cual, existe una gran diferencia en los resultados con respecto al bagazo, variando prudentemente su porcentaje de los componentes como el agua, carbohidratos, proteínas y lípidos. A diferencia de los valores obtenidos en los componentes de la cachaza ya que estos son muy parecidos, con una diferencia del 1 al 5%. En la composición del digestato obtenido en la simulación se encuentran iones o moléculas de nitrógeno, fósforo y magnesio, esto con la combinación del alto pH del estiércol ayuda a mejorar la formación de las dos estruvitas en porcentajes bajos ($MgKPO_4$; $MgNH_4PO_4$)

(Möller & Müller, 2012).

Tabla 4. Composición química de las corrientes más importantes para la economía circular

Componentes	Bagazo			Cachaza			Digestato		
	SPD (%)	Teórico (%)	Ref.	SPD (%)	Teórico (%)	Ref.	SPD (%)	Teórico (%)	Ref.
Agua	49.7790	27.8750	(Mahmud & Anannya, 2021)	72.7540	70.7200	(Aguilar et al., 2010)	88.8383	-	(Möller & Müller, 2012); (Vaneeckhaute et al., 2015)
Carbohidratos	42.9605	62.8100		7.7960	6.1500	(Ochoa George et al., 2010)	1.0128	-	
Proteínas	0.6529	2	(Vera Rodríguez et al., 2021)	5.4210	4.3900	(Gálvez et al., 2000)	0.0823	-	
Lípidos	0.6099	1.5000	(Huang et al., 2017)	2.4640	3.5100	(Martínez et al., 2002)	0.0515	-	
Cenizas	3.1062	2.8150	(Da Silva et al., 2011); (Elbager & Yao, 2016)	4.3950	2.9300	(Gálvez et al., 2000); (Aguilar et al., 2010)	2.9311	-	
Azúcares	2.8916	3	(Díaz, 2008)	4.2710	3.5200	(Gálvez et al., 2000)	1.1721	-	
Alcoholes	-	-	-	2.8990	8.7800	(Martínez et al., 2002)	0.0281	-	
MgKPO4	-	-	-	-	-	-	0.2634	-	
MgNH4PO4	-	-	-	-	-	-	0.2170	-	
Fosfato de Hierro	-	-	-	-	-	-	0.2822	-	
Fosfato de calcio	-	-	-	-	-	-	2.0635	-	

SPD: *SuperPro Designer*; Ref: Referencia

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, las estruvitas y los fosfatos presentes en el digestato concuerdan con los estudios realizados por Möller and Müller (2012), mencionando que la aplicación del digestato tiene beneficios potenciales con la disponibilidad de nitrógeno y rendimientos en cultivos, a diferencia de abonos de animales que no son tratados. Las estruvitas pueden ser utilizadas como fertilizantes de nutrientes mixtos, dando una alta disponibilidad de fósforo en la planta (Vaneeckhaute et al., 2015), debido a que el digestato tiene aproximadamente una solubilidad en los reactivos con extracción de estiércol animal.

Dimensionamiento y costo de equipamiento

Para la identificación del dimensionamiento y costo de equipamiento se necesita establecer todo el proceso de producción para la obtención de biogás y digestato, en donde se plasma de manera gráfica en el software Súper Pro que equipos son los necesarios para realizar dicho trabajo y, además, cual es la capacidad de cada unidad dependiendo la disponibilidad de materia prima. En donde se llega a determinar que para la producción del biogás y digestato se debe de disponer de al menos 18 equipos como se muestra en la Tabla 5, cada uno con su parámetro de diseño para poder plasmar el dimensionamiento y su costo

unitario. No obstante, cada equipo consta de 1 unidad obteniendo como un costo total por los equipos utilizados de $104,000 de costos.

Tabla 5. Descripción del dimensionamiento y costo de los diferentes equipos.

Cantidad	Equipo	Parámetro de diseño	Costo unitario ($)	Costo ($)
1	Moledora	Rendimiento nominal = 1945.71 kg/h	1,000	1,000
1	Divisor de componentes	Rendimiento nominal = 1945.71 kg/h	5,000	5,000
1	Intercambiador de calor	Área de intercambio = 0.45 m2	5,000	5,000
1	Clarificador	Área de superficie = 0.87 m2	5,000	5,000
1	Evaporador de película delgada	Área de película = 6.49 m2	5,000	5,000
1	Evaporador de película delgada	Área de película = 2.36 m2	5,000	5,000
1	Evaporador de película delgada	Área de película = 0.36 m2	5,000	5,000
1	Evaporador de película delgada	Área de película = 0.11 m2	5,000	5,000
1	Tanque de mezcla	Volumen de tanque = 228.80 L	2,000	2,000
1	Moledora	Rendimiento nominal =801.33 kg/h	1,000	1,000
1	Transportador de tornillo	Longitud de la tubería = 15.00 m	1,000	1,000
1	Bomba de engranajes	Potencia de la bomba = 0.03 kW	2,000	2,000
1	Reactor con agitador	Volumen del tanque = 24.08 L	3,000	3,000
1	Intercambiador de calor	Área de intercambio = 0.99 m2	9,000	9,000
1	Reactor con agitador	Volumen del tanque = 31.71 L	6,000	6,000
1	Tanque de fondo plano	Volumen del tanque = 0.18 m3	7,000	7,000
1	Intercambiador de calor	Área de intercambio = 0.00 m2	9,000	9,000
1	Digestor anaeróbico	Volumen de tanque = 11009.55 L	10,000	10,000
		TOTAL		104,000

Fuente: Elaboración propia

El equipamiento involucrado en el proceso de la ruta tecnológica no coincide con las investigaciones realizadas por otros autores en cuanto a la obtención del biogás, donde se ha prestado menos atención en la producción del digestato. Por eso, a la hora de comparar el costo de adquisición por kg de producto del proceso de la ruta tecnológica para la obtención de biogás en la simulación obtuvo un valor de 288.2234 $/m^3 mientras que el obtenido por Truc et al. (2018) fue de 529391.2567 $/m^3. Sin embargo, esto se debe a que los equipos utilizados en la investigación se centran en la producción y mejoramiento del biogás y por ende se ocupan más equipos, así como el incremento de su capacidad.

Estimación de costos de inversión

La estimación de costos de inversión empieza con los costos directos totales de la planta (CDTP), conformados por los costos de compra del equipamiento, instalación, manejo de tuberías, instrumentación, aislamiento, eléctrico, edificios, mejoramiento de terreno y las instalaciones auxiliares, arrojando un total de $ 338,000 en CDTP. Además, están los costos indirectos totales de planta agrupando la ingeniería necesaria y la construcción implementada, con un total de $ 203,000 de CITP. Por otro lado, están los costos totales de planta (CTP) producto de la suma de los CDTP más los CITP, con un valor de $ 540,000 de CTP. También, se toma en cuenta la tarifa del contratista y contingencia (TCC), con un valor de $ 27,000 y de $54,000, sumando $81,000 de TCC. Por último, está el costo de capital fijo directo (CFD) que es la suma del TCC más los CTP dando un valor total de $

621,000 como se puede observar en la Tabla 6.

Tabla 6. Descripción de la estimación de los costos de inversión.

Estimación de costos de inversión			
Costos directos totales de la Planta (CDTP)		**Costos indirectos totales de la Planta (CITP)**	
Ítem	**Importe**	**Ítem**	**Importe**
Costo de compra del equipo	104,000	Ingeniería	84,000
Instalación	38,000	Construcción	118,000
Proceso de tuberías	36,000	**CITP**	203,000
Instrumentación	42,000	**Costo total de la Planta (CTP)**	
Aislamiento	3,000	**CTP**	540,000
Eléctrica	10,000	**Tarifa del contratista y Contingencia (TCC)**	
Edificios	47,000	Tarifa del contratista	27,000
Mejoramiento de terreno	16,000	Contingencia	54,000
Facilidades auxiliares	42,000	**TCC**	81,000
CDTP	338,000	**Costo de capital fijo directo (CFD)**	
		CFD	621,000

Fuente: Elaboración propia

En la estimación de costos de inversión se obtuvo un valor de $621,000, que son repartidos para las diferentes áreas de producción, edificación, recursos humanos y equipamiento. Según una encuesta realizada a 58 productores de caña en la provincia de Pastaza, la caracterización socioeconómica y productiva de los cañicultores oscila entre una media de $45,147 como señala Aburto et al. (2008);Morales Zamora et al. (2013) en costos de inversión. Este valor se encuentra muy alejado a lo obtenido en los reportes de evaluación económica del SuperPro Desing, no obstante, es importante mencionar que el valor varía debido a que el equipamiento va dirigido a la producción no solamente de panela, si no, para la obtención de biogás y digestato.

Costo operativo anual

En la tabla 7 se pueden ver los costos operativos que se generan al año con respecto a las materias primas, mano de obra, instalaciones, utilidades entre otros costos del producto, generados por la herramienta informática *SuperPro Designer*.

De acuerdo con los costos operativos anuales, como se muestra en la Tabla 7, las materias primas tienen un 22.49% de los costos, 38.80% de las instalaciones y 7.08% de las utilidades. Bajo estos sistemas de producción, se pueden llegar a generar un mayor valor agregado a los productos que se buscan ofrecer, cuya materia prima es la panela, por citar un ejemplo. Además, esta alternativa puede ser considerada adecuada para evitar la caída de precios de venta por periodos de sobreofertas (Gil, 2017). Una encuesta realizada por Valle et al. (2021) a los cañicultores de Pastaza, muestra que los costos en fertilizantes químicos van desde los $ 40 a $ 50 por hectárea. Sin embargo, en términos de tecnologías en cuanto a la producción de panela se están incorporando nuevos procesos tecnológicos para aprovechar los coproductos, donde uno de los productos tiene enfoque de economía circular, ya que se convierte en materia prima para la siembra de los cultivos de caña. De la

misma forma, se obtiene biogás, que puede ser usado en los procesos de combustión o energía (Hall & Scrase, 1998), que son necesarios en las etapas de evaporación.

Tabla 7. Descripción de los costos de producción anual.

Costo del producto	$	%
Materias primas	68,000	22.49
Dependiente de la mano de obra	96,000	31.63
Dependiente de la instalación	117,000	38.80
Consumibles	0	0.00
Tratamiento-eliminación de residuos	0	0.00
Utilidades	21,000	7.08
Transporte	0	0.00
Misceláneas	0	0.00
Publicidad/venta	0	0.00
Regalías corrientes	0	0.00
Eliminación fallida del producto	0	0.00
TOTAL	302,000	100.00

Fuente: Elaboración propia**.**

Factibilidad económica

En la Tabla 8, se puede observar todos los indicadores que intervienen como recursos económicos o financieros los cuales son necesarios para desarrollar y adquirir los recursos básicos para llevar a cabo el diseño de planta para el digestor.

Tabla 8. Recursos económicos y financieros para la producción de digestato

Indicadores	Cantidad	Unidad
VAN	556,000	$
TIR	18.20	%
Tiempo de retribución	3.75	Año
Retorno de la inversión	26.66	%
Margen bruto	39.69	%
Ingreso por unidad de producto	2.10	$/kg MP

VAN: Valor actual neto; TIR: Tasa interna de retorno

Fuente: Elaboración propia.

El resultado del Valor actual Neto (VAN) se determina calculando los diferentes costos y beneficios de la inversión de la tecnología, el cual, para la producción de digestato y biogás dio positivo, con un valor de $556,000, lo que determina que el proceso será económicamente factible. Por ejemplo, una investigación realizada por los autores, Casco-Méndez et al. (2022); Tuquerres Curipallo et al. (2020) plantean una simulación a partir de los derivados de la caña de azúcar como el bioetanol y ácido cítrico a partir del bagazo de caña aplicando el software *SuperPro Desinger* obteniendo un VAN positivo en ambos casos a determinadas capacidades. Por otro lado, los indicadores financieros mencionados por (Gil, 2017) muestra que el margen bruto es del 12.1%, mientras que lo obtenido en la simulación es mucho más elevado, como se observa en la tabla 8. A pesar de que ambas producciones son tradicionales, la diferencia recae en la obtención de productos y coproductos, en la una solo se obtiene panela y en la otra digestato y biogás.

Análisis medioambiental

Para el análisis medio ambiental se tomaron en cuenta los indicadores que se muestran en la Tabla 9, tomando en cuenta que los vertimientos sólidos, como el bagazo y líquidos, cachaza no son como tales residuos que va al medio ambiente, si no, son reincorporados al proceso siguiente con la finalidad de que se usen nuevamente como materias primas para generar biogás y digestato.

Tabla 9. Indicadores medio ambientales

Indicadores	Cantidad	Unidad
Materia prima	3.14	kg/kg
Energía	0.049	kW/kg
Agua de enfriamiento	29896.06	kg/kg
Vapor	1059.53	kg/kg
Vertimiento de gases	1.61	kg/kg

Fuente: Elaboración propia

Una investigación realizada por Quezada Moreno et al. (2021) utilizando la herramienta del análisis de ciclo de vida, menciona que en una unidad de producción con capacidad de 10 t de caña/día, generan 1056 kg de panela. La materia prima en esta literatura dispone de 9.47 kg/kg, energía 1.14 kW/kg, vertimientos líquidos de 0.29 kg/kg, sólidos 0.07 kg/kg y gaseosos 24.97 kg/kg. Donde, en la simulación los vertimientos gaseosos son muy bajos a diferencia de la literatura, mientras que los líquidos y sólidos se descartan. Esto se debe a que el bagazo y la cachaza como coproductos son reincorporados como materias primas para producir biogás como energía y digestato en biofertilizante.

4. CONCLUSIONES

La producción y utilización del digestato dentro de la ruta tecnológica propuesta permitió cerrar el bucle tecnológico de la economía circular. La conformación de esta ruta permitió el aprovechamiento de los residuos generados en la producción de panela, para la obtención de energía y biofertilizante. Las etapas que conforman esta ruta son: la producción de panela, la cogestión y la digestión anaerobia. Procesos que se ha demostrado su viabilidad tecnológica y que a través de la simulación realizada se demostró su factibilidad económica con unos indicadores dinámicos económicos que así lo aseveran VAN ascendió a $ 556,000, la tasa interna de retorno a 18.20% y el tiempo de retribución en 3.75 años. Estas tecnologías pueden ser implementadas sin afectar al medio ambiente debido a que el bagazo y la cachaza se convierten en productos intermedios de la ruta tecnológica y no se vierten en el medio ambiente, reduciendo la contaminación del proceso.

REFERENCIAS

Aburto, J., Martínez, T., & Murrieta, F. (2008). Evaluación técnico-económica de la producción de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos. *Tecnología, Ciencia, Educación*, *23*(1), 23-30.

Aguiar, S., Panimboza Ojeda, A. P., Soto Cabrera, A. I., Cuyanquillo Barrionuevo, J. X., Pérez Martínez, A., & Diéguez Santana, K. (2021). Propuesta para la producción más limpia en destilerías artesanales. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, *24*(2). https://doi.org/10.31910/rudca.v24.n2.2021.1500

Aguilar, N., Rodríguez, D., & Castillo, A. (2010). Azúcar, coproductos y subproductos en la diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar. *Revista VIRTUALPRO Procesos Industriales*, *106*(11), 1-28.

Albernas Carvajal, Y., Corsano, G., González Cortés, M., & González Suárez, E. (2017). Preliminary design for simultaneous saccharification and fermentation stages for ethanol production from sugar cane bagasse. *Chemical Engineering Research and Design*, *126*, 232-240. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.08.029

Álvarez Díaz, N. G., Aguilar Cuevas, A. P., Muñiz Márquez, D. B., & Aguilar Zárate, P. (2019). Análisis de composición proximal del jugo de caña de azúcar cultivada en la Huasteca Potosina. *TECTZAPIC Revista de divulgación científica y tecnológica*.

Alzate Acevedo, S., Díaz Carrillo, Á. J., Flórez-López, E., & Grande-Tovar, C. D. (2021). Recovery of banana waste-loss from production and processing: a contribution to a circular economy. *Molecules*, *26*(17), 5282. https://doi.org/10.3390/molecules26175282

Arias Cedeño, Q., López Sánchez, R., Sainz Rosales, L. R., Verdecia Casanova, M. V., & Eichler Löbermann, B. (2021). Potencial fertilizante de cenizas de bagazo de caña de azúcar de industrias azucareras. *Revista Cubana de Química*, *33*(3), 452-466.

Armenta Bojórquez, A. D., García Gutiérrez, C., Camacho Báez, R. J., Apodaca Sánchez, M. A., Gerardo Montoya, L., & Nava Pérez, E. (2010). Biofertilizantes en el desarrollo agrícola de México. *Ra Ximhai*, *6*(1), 51-56.

Aso, S. N. (2021). Digestate: The coproduct of biofuel production in a circular economy, and new results for cassava peeling residue digestate. *IntechOpen*, 1-27. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.91340

Bashan, Y. (1998). Proposal for the division of plant growth- promoting rhizobacteria into two classifications: biocontrol PGPB (plant growth-promoting bacteria) and PGPB. *Soil Biol. Biochem*, *30*.

Bayona Ayala, O. L., J., A. R. L., & Candela Soto, A. M. (2020). Conversión de azúcares fermentables presentes en la biomasa lignocelulósica pretratada con peróxido de hidrógeno. In *Gestión de residuos y biomasa: Avances en la economía circular*. Universidad Santo Tomás Bucaramanga.

Benítez Odio, M., Martínez Robaina, A., Herrera Gallo, M., Páez Fernández, P. L., & del Busto Concepción, A. (2020). Estrategia para implementar la gestión del conocimiento en el Sistema de Innovación Agropecuario Local. *Cooperativismo y Desarrollo*, *8*(1), 45-56.

Bernal Gutiérrez, R. M., López González, L., Ríos Obregón, J. M., Jiménez Hernández, J., García Quintana, Y., & Arteaga Crespo, Y. (2017). Thermoalkaline pretreatment

influence on anaerobic biodegradability of filter cake for methane production. *MOL2NET*, *3*, 1-7. https://doi.org/10.3390/mol2net-03-015339

Bohórquez, A., Puentes, Y., & Menjivar, J. (2014). Evaluación de la calidad del compost producido a partir de subproductos agroindustriales de caña de azúcar. *Corpoica. Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, *15*(1), 73-81.

Camargo, N., & Williams, D. (2012). Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del Meta. *Tecnura*, *16*(34), 142-156.

Carvajal Padilla, V. P., Ambuludi Paredes, R. R., Chele Yumbo, E. A., Sarduy Pereira, L. B., & Diéguez Santana, K. (2021). Alternativas de producción más limpias para la destilería "Puro Puyo", Pastaza, Ecuador. *Revista de I+D Tecnológico*, *17*. http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/339/3392002002/index.html

Casco-Méndez, G. M., Diéguez-Santana, K., Sarduy-Pereira, L., Vinocunga-Pillajo, R. D., Pomavilla-Guaminga, S. I., & Pérez-Martínez, A. (2022). Diseño del proceso de obtención de bioetanol carburante mediante hidrólisis enzimática del bagazo de caña en Pastaza. *Centro Azúcar*, *49*, 35-46. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612022000200035&nrm=iso

Cerda-Mejia, V., Pérez-Martínez, A., Guardado-Yordi, E., Cerda-Mejia, G., Diéguez-Santana, K., Benítez-Cortés, I., & González-Suárez, E. (2021). Simulation strategy to reduce quality uncertainty in the sugar cane honey process design. *Ingeniería e Investigación*, *41*(1), e81484. https://doi.org/10.15446/ing.investig.v41n1.81484

Cerdá, E. (2012). Energía obtenida a partir de biomasa. *Cuadernos económicos de ICE*(83), 117-114.

Chastain, J. P., Camberato, J. J., Albrecht, J. E., & Adams, J. (1999). Swine manure production and nutrient content. *South Carolina Confined Animal Manure Managers Certification Program*, *3*, 1-17.

Da Silva, A. S. A., Lee, H. S., Endo, T., & Bon, E. P. (2011). Major improvement in the rate and yield of enzymatic saccharification of sugarcane bagasse via pretreatment with the ionic liquid 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate ([Emim][Ac]). *Bioresource Technology*, *102*(22), 10505-10509. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.08.085

Dal Bianco, M., Sampaio Carneiro, M., Takeshi Hotta, C., Giacomini Chapola, R., Hoffmann, H. P., Franco Garcia, A. A., & Mendes Souza, G. (2012). Sugarcane improvement: how far can we go? *Current Opinion in Biotechnology*, *23*(2), 265-270. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2011.09.002

Díaz, R. (2008). Caracterización Energética del Bagazo de Caña de Azúcar del Ingenio Valdez. Ecuador. *CARBON*, *24*(23.48), 23-52.

Diéguez Santana, K., Sarduy Pereira, L. B., Sablón Cossío, N., Bautista Santos, H., Sánchez Galván, F., & Ruíz Cedeño, S. M. (2022). Evaluation of the Circular Economy in a Pitahaya Agri-Food Chain. *Sustainability*, *14*(5).

https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su14052950

Duxbury, J. M. (1994). The significance of agricultural sources of greenhouse gases. *Fertilizer research*, *38*, 151-163.

Eggleston, G., Aita, G., & Triplett, A. (2021). Circular sustainability of sugarcane: natural, nutritious, and functional unrefined sweeteners that meet new consumer demands. *Sugar Tech*, *23*(5), 964-973. https://doi.org/10.1007/s12355-021-00994-4

Eich Greatorex, S., Vivekanand, V., Estevez, M. M., Schnürer, A., Børresen, T., & A Sogn, T. (2017). Biogas digestates based on lignin-rich feedstock-Potential as fertilizer and soil amendment. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *64*(3), 347-359. https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1352086

Elbager, E. M., & Yao, H. (2016). Kinetic thermal behaviour and evaluation of physical structure of sugar cane bagasse char during non-isothermal steam gasification. *Journal of Materials Research and Technology*, *5*(4), 317-326. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.03.006

Esposito, B., Sessa, M. R., Sica, D., & Malandrino, O. (2020). Towards circular economy in the agri-food sector. A systematic literature review. *Sustainability*, *12*(18). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su12187401

FAO. (2002). *Los fertilizantes y su uso*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes. .

Flórez Martínez, D. H., Contreras Pedraza, C. A., Escobar Parra, S., & Rodríguez Cortina, J. (2022). Key Drivers for Non-Centrifugal Sugar Cane Research, Technological Development, and Market Linkage: A Technological Roadmap Approach for Colombia. *Sugar Tech*, *25*(2), 373–385. https://doi.org/10.1007/s12355-022-01200-9

Flórez Martínez, D. H., Contreras Pedraza, C. A., & Rodríguez , J. (2021). A systematic analysis of non-centrifugal sugar cane processing: Research and new trends. *Trends in Food Science and Technology*, *107*, 415–428. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.11.011.

Gálvez, L., Cabello, A., & Villamil, G. (2000). *Manual de los derivados de la caña de azúcar*. ICIDCA.

García Ramos, C. M., Quirós Roque, V. A., & Rosales Mendoza, L. E. (2022). Los residuos generados en la producción de la industria azucarera en los últimos 25 años. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, *8*(16), 1979-1991. https://doi.org/https://doi.org/10.5377/ribcc.v8i16.15041

Geissdoerfer, M., Morioka, S. N., de Carvalho, M. M., & Evans, S. (2018). Business models and supply chains for the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, *190*, 712-721. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.159

Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems.

Jornual of Cleaner Production, *114*, 11-32. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007

Gil, J. G. R. (2017). Characterization of traditional production systems of sugarcane for panela and some prospects for improving their sustainability. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, *70*, 8045-8055. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-28472017000100003&nrm=iso

González, G. C., & Pomar Fernández, S. (2021). La economía circular en los nuevos modelos de negocio. *Entreciencias: Diálogos En La Sociedad Del Conocimiento*, *9*(23). https://doi.org/https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2021.23.79933

Grageda Cabrera, O. A., Díaz Franco, A., Peña Cabriales, J. J., & Vera Nuñez, J. A. (2012). Impacto de los biofertilizantes en la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *3*(6), 1261-1274.

Guerrero Useda, M. E., & Escobar Guzmán, J. D. (2015). Eficiencia técnica de la producción de panela. *Revista de Tecnología*, *14*(1), 107-116.

Gutiérrez Antonio, C., De Lira Flores, J. A., Quiroz Pérez, E., & Martínez Guido, S. I. (2020). Conversión de residuos agroindustriales para la generación de biocombustibles, productos de valor agregado y bioenergía. *Digital Ciencia@UAQRO*, *3*(4), 27-35. https://revistas.uaq.mx/index.php/ciencia/article/view/41

Gutiérrez, O. (2010). Desarrollo de la metodología Innovación Rural Participativa en la zona andina central de Colombia. *Agronomía Colombiana*, *28*(3), 509-516.

Hall, D. O., & Scrase, J. I. (1998). Will biomass be the environmentally friendly fuel of the future? *Biomass and Bioenergy*, *15*(4-5), 357-367.

Huang, H., Moreau, R. A., Powell, M. J., Wang, Z., Kannan, B., Altpeter, F., Grennan, A. K., Long, S. P., & Singh, V. (2017). Evaluation of the quantity and composition of sugars and lipid in the juice and bagasse of lipid producing sugarcane. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *10*, 148-155. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2017.03.003

Jaffé, W. R. (2015). Nutritional and functional components of non-cen trifugal cane sugar: A compilation of the data from the analytical literature. *Journal of Food Composition and Analysis 43*, 194-202. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.06.007

Julián Ricardo, M. C., Baltá García, J. G., Pérez Sánchez, E. J., & Pérez Sánchez, A. (2018). Simulación del proceso de producción de cerveza a escala piloto. *AFINIDAD*, *75*(581), 39-44.

Karaj, S., Rehl, T., Leis, H., & Müller, J. (2010). Analysis of biomass residues potential for electrical energy generation in Albania. *Renewable and sustainable energy Reviews*, *14*(1), 493-499.

Lagos Burbano, E., & Castro Rincón, E. (2019). Caña de azúcar y subproductos de la agroindustria azucarera en la alimentación de rumiantes. *Agronomía*

Mesoamericana, *30*(3), 917-934. https://doi.org/10.15517/am.v30i3.34668

Legendre, L. B. (1988). Chapter 12 - Varietal Differences in the Chemical Composition of Sugarcane. *Sugar Series*, *9*, 176-185. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-43020-5.50018-7

León Martínez, T. S., Dopíco Ramírez, D., Triana Hernández, O., & Medina Estevez, M. (2013). Paja de la caña de azúcar. Sus usos en la actualidad. *Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, *47*(2), 13-22.

Lora, E. S., Arrieta, F. P., Carpio, R. C., & Nogueira, L. A. H. (2000). Clean production: efficiency and environment. *International sugar journal*, *102*(1219), 343-346.

Mahmud, A., & Anannya, F. R. (2021). Sugarcane bagasse - A source of cellulosic fiber for diverse applications. *Heliyon*, *7*(8), e07771. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07771

Mantilla González, J. M., Duque Daza, C. A., & Galeano Urueña, C. H. (2007). Diseño y estudio económico preliminar de una planta productora de biogas utilizando residuos orgánicos de ganado vacuno. *Ingeniería e Investigación*, *27*(3), 133-142.

Martinez, C., Oechsner, H., Brulé, M., & Marañon, E. (2014). Estudio de algunas propiedades físico mecánicas y químicas de residuos orgánicos a utilizar en la producción de biogás en Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, *23*(2), 63-69.

Martínez, R., Castro, I., & Oliveros, M. (2002). Characterization of products from sugar cane mud. *Revista de la Sociedad Química de México*, *46*(1), 64-66.

Matheus, J. (2004). Evaluación agronómica del uso de compost de residuos de la industria azucarera (biofertilizante) en el cultivo de maíz (Zea mays L.). *Bioagro*, *16*, 219-224. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612004000300009&nrm=iso

Mejía, V. C., Mejía, G. C., Rubio, O. G., Cortes, I. B., Yordi, E. G., Tenezaca, B. O., Miño Valdés, J., Suárez, E. G., & Martínez, A. P. (2022). Automatic Control System for Cane Honey Factories in Developing Country Conditions. *Processes*, *10*(5), 915. https://www.mdpi.com/2227-9717/10/5/915

Möller, K., & Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in life sciences*, *12*(3), 242-257.

Morales Zamora, M., González Suárez, E., Mesa Garriga, L., & Castro, E. (2013). Estrategia de reconversión de la industria diversificada de la caña de azúcar para la producción conjunta de bioetanol y coproductos. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*(66), 189-198.

Mosquera, S. A., Carrera, J. E., & Villada, H. S. (2007). Variables que afectan la calidad de la panela procesada en el departamento del Cauca. *Facultad de Ciencias Agropecuarias*, *5*(1), 18-27.

Nath, A., Dutta, D., Kumar, P., & Singh, J. (2015). Review on Recent Advances in Value

Addition of Jaggery based Products. *Journal of Food Processing & Technology*, *6*(4), 1-4. https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000440

Ocazionez Jiménez, I. C. P., & Sandoval Rincón, M. V. (2020). Elaboración y caracterización fisicoquímica y microbiológica de abonos orgánicos: alternativa para mitigar el efecto contaminante de la gallinaza en la agricultura. In *Gestión de residuos y biomasa : avances en la economía circular*. Universidad Santo Tomás.

Ochoa George, P. A., Eras, J. J. C., Gutierrez, A. S., Hens, L., & Vandecasteele, C. (2010). Residue from Sugarcane Juice Filtration (Filter Cake): Energy Use at the Sugar Factory. *Waste Biomass Valor*, *1*, 407-413. https://doi.org/10.1007/s12649-010-9046-2

Otero Guerrero, O. (2017). *Evaluación del potencial de producción de biogás a partir de residuos agroindustriales de la caña de azúcar* [Tesis para la obtención de título Universidad ICESI]. Cali.

Pérez Martínez, A., Cervantes Mendieta, E., Julian Ricardo, M. C., Gonzalez Suárez, E., Gomez Atanay, A., Oquendo Ferrer, H., Galindo Llanes, P., & Ramos Sanchez, L. (2012). Procedimiento para enfrentar tareas de diseño de procesos dela industria azucarera y sus derivados. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, *11*(2), 333-349.

Pinos, J., García, J., Peña, L., Rendón, J., González, C., & Tristán, F. (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. . *Agrociencia*, *46*(4), 359-370.

Quezada-Moreno, W., Gallardo-Aguilar, I., & Quezada-Torres, W. (2015). Temperatura y concentración del jugo de caña según pisos climáticos en Ecuador. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, *49*(1), 17-21.

Quezada Moreno, W., González Suárez, E., Quezada Torres, W., & Mera, M. (2016). Cane Honey?: Process, Qualityand Harmlessness. *International Journal of Engineering Research*, *5*(7), 589-593.

Quezada Moreno, W. F., Quezada Torres, W. D., Proaño Molina, M., M., M. G., Vivas Vivas, M., Jiménez Sánchez, A., González Suaréz, E., Molina Borja, F., & Zambrano Ochoa, Z. (2021). Evaluación del impacto ambiental en el proceso de elaboración de panela mediante el Análisis de Ciclo de Vida. *AFINIDAD*, *78*(592), 61-66.

Quintero González, J. R., & Quintero González, L. E. (2015). Biomasa: métodos de producción, potencial energético y medio ambiente. *Revista I3+*, *2*(2), 28-44.

Rivas Murillo, J. S., Rodriguez Pulecio, S. A., & Coronado Marín, J. J. (2004). Análisis de la confiabilidad de los ejes de molino de caña de azúcar. *Tecnura*, *8*(15), 45–54. https://doi.org/10.14483/22487638.6146

Rojas Remis, R., & Mendoza Espinosa, L. G. (2012). Utilización de biosólidps para la recuperación energética en México. *Producción + Limpia*, *7*(2), 74-94.

Romero, H., & Alvarez-Yanamango, E. (2018). Production of Biogas and Biofertilizers

from Only Sugarcane Waste in a Pilot-Scale Two-Phase Anaerobic Digester System. *Journal of Engineering Research and Application*, *8*(9), 64-71. https://doi.org/10.9790/9622-0809056471

Romero Vistín, A. S. (2022). *Ruta tecnológica para el desarrollo agroindustrial de la provincia de Pastaza a partir de la matríz de productos y de las materias primas disponibles* [Tesis de Maestría, Universidad Estatal Amazónica]. Puyo

Ruge Ruge, I. A., & Pérez Holguín, W. J. (2017). Diagnóstico tecnológico del uso de dispositivos programables en la industria boyacense. Caso de estudio: cadena agroindustrial de la panela. *Tecnura: Tegnología y Cultura Afirmando el Conocimiento*, *21*(52), 130-147. https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.2.a10

Ruiz Mostacilla, S., & Sandino, M. C. (2013). Propuesta metodológica para la gestión de residuosen la industria azucarera usando lean manufacturing. *Magazín Empresarial*, *9*(21), 59-65.

Silva Alvarado, P. M., Orozco Crespo, E., Verduga Alcívar, D. A., Diéguez Santana, K., Ruiz Cedeño, S. M., & Sablón Cossío, N. (2023). Prospective of the circular economy in a banana agri-food chain. *TEC Empresarial*, *17*(1), 34-52. https://doi.org/https://doi.org/10.18845/te.v17i1.6475

SIPA. (2022). *Información productiva territorial*. Sistema de Información Pública Agropecuaria. http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/cifras-agroproductivas

Soria Fregoso, M. d. J., Ferrera Cerrato, R., Etchevers Barra, J., Alcántar González, G., Trinidad Santos, J., Borges Gómez, L., & Pereyda Pérez, G. (2001). Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta liquida de cerdo. *Terra Latinoamericana*, *19*(4), 353-362.

Tovar Perilla, N. J., Bermeo Andrade, H. P., Torres Delgado, J. F., & Gómez, M. I. (2018). Metodología para soportar el proceso de toma de decisiones en la priorización de planes de mejora en el sector agrícola: Caso de estudio. *Dyna 85*(204), 356-363. https://doi.org/10.15446/dyna.v85n204.63712

Truc, T. Q., Wall, D. M., Ring, D., Rajendran, K., & Murphy, J. D. (2018). Techno-economic analysis of biogas upgrading via amine scrubber, carbon capture and ex-situ methanation. *Applied Energy*, *212*, 1191-1202. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.099

Tuquerres Curipallo, H., Cerda Mejía, G., Tenemasa, V., Diéguez Santana, K., Carrera Sánchez, K., & Pérez Martínez, A. (2020). Diseño del proceso para la obtención de ácido cítrico a partir del bagazo de caña disponible en Pastaza, Ecuador. *Revista Centro Azúcar*, *47*(2), 86-96.

Valdés Delgado, A. (2015). Residuos azucareros como fuente de combustible para la generación eléctrica. *IBEROAMERICANO*, 3-9.

Valle, S. B., Yaguache, B. D., Caicedo, W. O., Toscano, J. F., Yucailla, D. M., & Abril, R. V. (2021). Socio-economic and productive characterization of sugarcane farmers in

Pastaza province, Ecuador. *Cuban Journal of Agricultural Science*, *55*(2). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2079-34802021000200004&nrm=iso

Vaneeckhaute, C., Janda, J., Meers, E., & Tack, F. (2015). Efficiency of Soil and Fertilizer Phosphorus Use in Time: A Comparison Between Recovered Struvite, FePO4-Sludge, Digestate, Animal Manure, and Synthetic Fertilizer. *Nutrient Use Efficiency: from Basics to Advances*, 73-85. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2169-2_6

Vargas Corredor, Y. A., & Pérez Pérez, L. I. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad De Ciencias Básicas*, *1*(1), 59-72. https://doi.org/https://doi.org/10.18359/rfcb.3108

Vargas Hernandes, J. G., & Morales Medrano, M. J. (2019). The Circular Economy: Analysis Based on The Theory of Resources and Capabilities. *Revista Gestão & Sustentabilidade*, *1*(1), 298-309.

Velasquez, F., Espitia, J., Mendieta, O., Escobar, S., & Rodriguez, J. (2019). Non-centrifugal cane sugar processing: A review on recent advances and the infuence of process variables on qualities attributes of fnal products. *Journal of Food Engineering*, *255*, 32-40. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.03.009

Vera Rodríguez, J. H., Medranda Parraga, T. L., Siguencia Chuya, J. A., Mendieta Franco, R. A., & Pérez Guallpa, M. J. (2021). Caracterización nutricional de los residuos orgánicos en la caña de azúcar del cantón La Troncal. *Hombre, Ciencia y Tecnología*, *25*(2), 110-119.

Zea Barahona, C. A., Soledispa Rodríguez, X. E., Ayón Ponce, G. I., & Toala Zorrila, M. C. (2019). El abono elaborado del bagazo de caña de azúcar como alternativa para la generación de ingresos para los habitantes del sitio San Carlos. *Polo del Conocimiento*, *4*(6), 335-351. https://doi.org/10.23857/pc.v4i6.1024

Zhao, B., Yue, Z., Ni, B., Mu, Y., Yu, H., & Harada, H. (2009). Modeling anaerobic digestion of aquatic plants by rumen cultures: Cattail as an example. *Water Research*, *43*(7), 2047-2055.

ANEXOS

MARCO TEÓRICO

5.1. Tecnología de Producción de panela

La panela es uno de los productos obtenidos por medio de una industria donde se dispone de una baja mecanización en su cadena productiva, lo que conlleva a retos de sostenibilidad y competitividad. En la producción de la panela se identifican eslabones como: proveedores, cultivadores, procesadores, comercializadores y clientes. Los procesadores, es uno de los eslabones importantes a tomar en cuenta, ya que mayoritariamente se enfocan en las pequeñas empresas agroindustriales donde se

transforma la caña de azúcar en lo que se conoce como panela (Nath et al., 2015).

La producción de panela está enfocada mucho más a los mercados locales, por lo que se dirige a un consumo interno. Sin embargo, se busca una forma de que se puedan consumir en el extranjero. Por ejemplo, Colombia en 2016 promovió la ampliación en los mercados internacionales como Estados Unidos, Suiza, Canadá y la Unión Europea (Guerrero Useda & Escobar Guzmán, 2015).

El uso de procesos mecánicos para la extracción del jugo de caña por medio de molinos se remonta en el siglo XVI, una práctica originaria de Asia e India. Desde ese momento, las investigaciones para mejorar la producción de panela se han basado en maximizar la extracción del jugo de caña y minimizar el consumo de energía y costos de mantenimiento (Lora et al., 2000).

5.1.1. Materias primas

La caña de azúcar es una materia prima que se adapta de una manera rápida a los diferentes climas, suelos, superficies y sistemas de producción. Además, compone una gran cantidad de producción en cuanto a materia verde y seca se refiere, convirtiendo el dióxido de carbono del ambiente en diferentes compuestos de azúcares formados por cuatro carbonos. Esto le ayuda a aprovechar de mejor manera las moléculas de agua, en el que desgasta 277 de agua por cada molécula de CO_2 y mantiene el porcentaje de humedad del suelo(Lagos Burbano & Castro Rincón, 2019).

Por otro lado, la caña de azúcar tiene una composición del tallo y el jugo descrita en la tabla 10, esta dependerá de la variedad y la zona en la que se encuentre. No obstante, los porcentajes de variación no fluctúan en grandes cantidades(Legendre, 1988).

Tabla 10. Composición química del tallo y de jugo de caña

Componente	Cantidad (Rango%)
Tallos	
Agua	73 – 76
Sólidos	24 – 27
sólidos solubles	10 – 16
fibra seca	11 – 16
Jugo	
Azúcares totales	
glucosa	75 – 92
fructosa	70 – 88
sacarosa	2 – 4
Sales minerales	
inorgánicas	3.0 – 3.4
orgánicas	1.5 – 4.5
Ácidos orgánicos	1 – 3
Aminoácidos	1.5 – 5.5
Otros componentes	
proteínas	0.5 – 0.6
almidones	0.001 – 0.050
Gomas	0.3 – 0.6
ceras, grasas, etc.	0.15 – 0.50

compuestos fenólicos	0.10 – 0.80

Fuente: Modificado de (Legendre, 1988)

Además, esta planta es de mucha utilidad para la economía de una variabilidad de zonas alrededor del mundo. Especialmente en lugares que están ubicados en áreas tropicales, subtropicales y templadas, concentrándose su cantidad mayoritaria de producción, en Asia y el continente americano. Su producción esta alrededor de 168 millones de toneladas métricas, con un porcentaje de incremento de 8 millones por año, llegando a un rendimiento de 77 toneladas por cada hectárea. Dentro de esta producción, solo el 24% se le adjunta como valor comercial, el 76% faltante son residuos obtenidos de la elaboración de la azúcar o azúcar no centrifugada (panela), ya sea el bagazo, tallos, hojas, cogollos, melaza y cachaza (Dal Bianco et al., 2012).

5.1.2. Operaciones unitarias

Los procesos unitarios en la producción de panela o azúcar sin refinar son los mismos en sus primeras fases, como cita (Guerrero Useda & Escobar Guzmán, 2015), la primera es la disposición de la caña cerca de la zona donde se encuentran los molinos, luego la molienda donde se extrae el jugo de caña. Posterior a la extracción, el jugo se decanta y clarifica para que se evapore y concentre para obtener la miel de caña, finalmente se realiza la cristalización para obtener el azúcar no centrifugada o panela.

En cuanto a los molinos y su capacidad extractiva del jugo, se considera aceptable en un valor entre 50% y 70%. La operación que se realiza se lo hace mediante un tándem de molinos cañeros. Sin embargo, pueden persistir problemas en torno al desgaste sobre los ejes superiores e inferiores de los molinos. Para lograr disminuir el esfuerzo de los ejes del molino, se recomienda usar un diseño de acople que alcance niveles de fuerza y momentos cercanos a los del cardán (Rivas Murillo et al., 2004).

Por otro lado, en la evaporación de los jugos extraídos se requiere de energía, donde los trapiches paneleros tradicionales trabajan por medio del calor obtenido efectuado por la combustión de las partículas de biomasa, ya sea bagazo, leña, entre otros. Los hornos que se usan para la evaporación, denominadas hornillas paneleras, se construyen de manera empírica y los más eficientes tienen las cámaras de combustión (Guerrero Useda & Escobar Guzmán, 2015).

En el área de moldeo se dispone de pisos de concreto y en dependencia del lugar de producción pueden llegar a tener tres mesas de moldeo. Una vez terminado el proceso de evaporación y concentración de jugo pasa por un punteo donde se pueden identificar la formación de burbujas tomando una muestra de la miel obtenida en el final de proceso anterior. Posterior se realiza la cristalización o batido donde el tiempo y volumen a tomar en cuenta se lo hará por el grano o textura relacionado con los °Brix y la pureza de la miel. Finalmente, cuando la panela se ha enfriado pasa a ser moldeada y almacenada para ser dirigidas a un mercado local (Mosquera et al., 2007).

5.1.3. Coproductos y residuos

Existen varios tipos de residuos en la producción de panela, Quezada Moreno et al. (2021), menciona que estos se agrupan por el estado, solidos líquidos o gaseosos. Entre los más comunes se tiene el bagazo, cachaza, bagacillos, cenizas entre otros (García Ramos et al., 2022). Sin embargo, estos subproductos pueden ser reutilizados por ser materias orgánicas lo que facilita su biodegrabilidad. En el caso del bagazo, residuo fibroso que se obtiene en la etapa de molienda, este puede ser usado para la obtención de energía en forma ecológica como menciona Ruiz Mostacilla and Sandino (2013).

También se encuentra la cachaza, residuo de gran interés por ser materia orgánica que contiene hierro, fósforo, zinc, sílice, manganeso y bajo en cobre, donde podría ser usado como biofertilizante remplazando los inorgánicos (Ruiz Mostacilla & Sandino, 2013).

5.2. Rutas tecnológicas.

La caña de azúcar es imprescindible para la producción de edulcorantes mediante una evaporación y cristalización del jugo extraído. No obstante, existe una alta negatividad en el consumo del azúcar debido a que tiene relación con enfermedades como la obesidad, por lo cual se han llevado a cabo la elaboración de distintos productos sin refinación o naturales por medio de la caña, por ejemplo la azúcar no centrifugada de caña (Eggleston et al., 2021).

Según Jaffé (2015); Velasquez et al. (2019) mencionan que hay compuestos bioactivos con valores nutricionales óptimos para la salud de las personas, entre estos flavonoides y fenoles en el jugo de caña. Por este motivo, Flórez Martínez et al. (2021), elaboró un panorama de manera general sobre futuras investigaciones acerca de la azúcar de caña no centrifugada. Todo el estudio permitió generar dos principales líneas de investigación, una centrada en los alimentos funcionales y nutracéuticos, mientras que la segunda la azúcar de caña no centrifugada se basa como compuestos saludables para productos farmacéuticos y cosméticos.

Una ruta tecnológica planteada por Flórez Martínez et al. (2022) basada en la búsqueda de información sobre el azúcar de caña no centrifugada, menciona que hay cuatro principales tendencias de investigación. Estas tendencias son; el uso como alimentos funcionales y nutracéutico, compuesto saludable para productos farmacéuticos, optimización de procesos de producción y productos que promueven la diversificación del jugo de caña y azúcar no centrifugada, por el cual, cada una se respaldan los avances científicos sobre el azúcar de caña no centrifugada. Dentro de este mismo contexto, las tendencias de investigación mejoran la comprensión sobre las situaciones actuales de infraestructura y tecnologías basadas en la azúcar no centrifugada de caña permitiendo un diseño tecnológico.

5.2.1 Metodología para conformar la ruta tecnológica

El planteamiento de una metodología consiste en aplicar procedimientos ordenados o diferentes técnicas para tener datos en los procesos analizados, los cuales el investigador seleccionará dependiendo de la necesidad o el desarrollo de la investigación. En el área

agroindustrial se presentan algunas metodologías como:

La metodología de Julián Ricardo et al. (2018) se centra en un proceso de simulación, el que se divide en dos secciones, la primera denominada como entrada de datos para la simulación y la segunda como proceso de simulación. En el cual, la primera se desarrolla a través de la implementación del: modo de operación, registro de materiales, construcción del diagrama de flujo y el procedimiento operacional. Por otro lado, la segunda abarca los diferentes análisis, ya sea económico como medioambiental.

Otra metodología planteada por Gutiérrez (2010) se enfoca en la innovación rural participativa, comprendida por una secuencia de pasos ordenados que tiene la finalidad de llevar a cabo una intervención social. Esta metodología busca la participación social y sostenibilidad, en que los pequeños productores sean actores directos del crecimiento en el área local, para así aumentar su autoestima, potenciar sus capacidades y reforzar sus competencias productivas. Por otro lado, para que se promueva este modelo es importante que exista una organización de fomento. De esta forma se busca un mejoramiento tecnológico, incluyendo la identificación de actores locales, lugares de intervención, creación de grupos participativos, investigaciones agrícolas, formulación participativa, empoderamiento, desarrollo empresarial y expansión a nuevas comunidades.

Es preferente conocer sobre el estado tecnológico de las industrias con la finalidad de efectuar proyectos de investigación para mejorar los procesos productivos de un territorio. Dentro de este mismo contexto se busca aprovechar el fortalecimiento de cada proceso por parte de los gobiernos locales, así mismo, las políticas de fortalecimiento de ciencia, tecnología e innovación. Por este motivo Ruge Ruge and Pérez Holguín (2017) plantean la metodología de diagnóstico tecnológico basado en el aumento de información por medio de: publicaciones y desarrollo tecnológico, inventario tecnológico, identificación de activos tecnológicos al igual de grupos de investigación y los análisis de incorporación tecnológica.

Como señala Benítez Odio et al. (2020) en su metodología de investigación no experimental transeccional descriptiva mediante la gestión de conocimiento, plantea un diseño de estrategia para el Sistema de Innovación Agropecuario Local. Esta metodología se desarrolla en cuatro etapas que son: diagnóstico de proceso de gestión de conocimiento en el Sistema Agropecuario de Innovación Agropecuario Local, Matriz FODA, Estructuración de la Estrategia y Validación por el método Delphi. Estas etapas se toman en cuenta mediante la gestión de conocimiento que plantea retos como el de adquirir, desarrollar, compartir, identificar, utilizar y retener el conocimiento destacado para el crecimiento de una región.

Dar preferencia a los productos es parte de la metodología multicriterio que sirve de apoyo en la toma de decisiones en los procesos, de esta forma se implementan planes de desarrollo en el sector agrario. Esta metodología propuesta por Tovar Perilla et al. (2018) se desarrolla en cuatro etapas: selección de zonas, evaluación de productos, análisis

cuantitativos como cualitativos y priorización de productos. Para un análisis más fidedigno en el proceso de toma de decisiones la metodología necesita de la opinión de expertos del sector, así como los índices agropecuarios considerados en la etapa dos y tres.

5.3. Economía circular

La economía circular es un concepto muy discutido en los últimos tiempos, por los diferentes científicos, economistas y ambientalistas. Su definición elemental se centra en el uso y renovación de recursos desechables, logrando que las materias primas no se puedan convertir en desperdicios (Ghisellini et al., 2016).

Sin embargo, algunos autores se enfocan en la economía circular para la generación de empleo, también al planteamiento en modelos económicos de forma circular en un negocio, o simplemente aspiran que esta economía abarque al aspecto de sostenibilidad con una trayectoria más vasta. Por otro lado, distintos se apoyan a la definición elemental de aprovechamiento esencial de los residuos generados en la industria (Geissdoerfer et al., 2018).

Además, los que están a favor de esta economía la definen como un método reconstructivo en que el ingreso de materia prima y sus desperdicios, emanación o alguna fuga de energía se disminuye al corregir mediante la elaboración de algún diseño, mantenimiento, y restauración. Generando un círculo estable en el que se disminuya importes, se logre incrementar los ingresos, se pueda administrar posibles riesgos y crear oportunidades en el área económica para aportar en la transformación por la sostenibilidad (Vargas Hernandes & Morales Medrano, 2019).

El criterio por un método circular se menciona desde mucho tiempo atrás. Empezando por Boulding que nos indica en uno de sus libros titulado The Economics of the Coming Spaceship Earth, que los procedimientos económicos, enfocado a lo circular, dentro del aspecto global son necesarios para que la vida humana permanezca estable en la Tierra durante un largo tiempo a futuro. También, recalca que la economía que se maneja tradicionalmente de manera lineal sin algún método de reciclaje, no puede llegar hacer sostenible durante el tiempo, llegando a determinar que un método circular es una mejor alternativa.

5.4. Tecnologías para la obtención de energía y biofertilizante

Uno de los requerimientos más sustanciales en la agricultura es la fertilidad del suelo y su mantenimiento. Habitualmente, la falta de nutrientes en los cultivos, en particular en nitrógeno, es regulado con el uso de los fertilizantes (Duxbury, 1994). En la agricultura existen varias dosificaciones con fertilizantes, dependiendo de la capacidad económica que se disponga, en la mayoría de los casos se aplican sin un rigor técnico haciendo que los productores usen cantidades desmedidas del fertilizante. Dentro de este mismo contexto, se presentan alternativas de utilizar tecnologías que impulsen las investigaciones para desarrollar nuevos insumos para favorecer el crecimiento de las plantas (Grageda Cabrera et al., 2012).

5.4.1. Energía

El estudio potencial y energético de la biomasa como un posible reemplazo para los combustibles fósiles se extiende cada vez más a nivel mundial. Esto permite avanzar con el mejoramiento de procesos y estudio de las propiedades químicas y termo físicas de prototipos de combustibles a partir de biomasa (Quintero González & Quintero González, 2015).

Como expresa Cerdá (2012) la biomasa es una fracción biodegradable compuesta de distintos coproductos, como residuos o desechos de la agricultura que incluyen vegetales u otras sustancias. Este mismo autor manifiesta que la biomasa puede clasificarse en cuatro tipos: biomasa sólida; donde su aprovechamiento se basa en la energía mediante la materia orgánica de origen vegetal o animal, biocarburantes; combustibles líquidos de origen biológico, fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos; utilización de los desechos sólidos y biogás; obtenido por medio de la fermentación anaeróbica de materia orgánica efectuada por bacterias en ausencia de oxígeno.

De acuerdo con Karaj et al. (2010) existen tres tipos de fuente de energía que incluyen, los residuos forestales, cultivos bioenergéticos y residuos agrícolas. Para la producción de energía por medio de la biomasa es necesario diferenciar el proceso termoquímico que incluye una combustión, pirólisis, gasificación y el proceso bioquímico donde está la fermentación y digestión anaerobia.

En la combustión de la biomasa se encuentran presentes el carbono y el hidrogeno que están en los combustibles, estos reaccionan con ausencia de oxígeno obteniendo CO_2, liberación de calor y agua. Por otro lado, hay una descomposición de biomasa por oxidación incompleta en ausencia de oxígeno, denominada pirolisis. Este proceso permite la obtención de sólidos significativos como el carbón vegetal, así mismo como compuestos líquidos y gaseosos para usos como combustibles. Del mismo modo, existe una oxidación parcial de la biomasa por medio de calor para obtener combustibles gaseosos ricos en hidrógeno y CO_2 dados por la gasificación (Quintero González & Quintero González, 2015).

Por otra parte, en los procesos de obtención de energía por medio de procesos bioquímicos está la digestión anaerobia donde se obtiene biogás por la descomposición de la materia orgánica, ya sea estiércol, residuos agrícolas, residuos de industrias alimentarias, entre otros, por la presencia de microorganismos que actúan o reaccionan en ausencia de oxígeno. Desde el punto de vista de Hall and Scrase (1998) hay muchas organizaciones y entidades que toman en consideración la biomasa como una fuente de energía muy importante, siendo una sostenibilidad para el futuro ya que son amigables con el medio ambiente.

5.4.2. Biofertilizante

Los preparados compuestos de microorganismos aplicados en los suelos o plantas son denominado biofertilizante. Este producto es usado con la finalidad de sustituir parcial o

totalmente los fertilizantes sintéticos, de esta forma se logran disminuir las contaminaciones generadas por los agroquímicos (Armenta Bojórquez et al., 2010). Por otro lado, los microorganismos son capaces de sintetizar sustancias que promueven el crecimiento de las plantas, por lo tanto, al incorporarlos en los biofertilizantes se pueden llegar a obtener resultados óptimos. Estos biofertilizantes con microorganismos se pueden clasificar en dos grupos: El primer grupo que se basa en la síntesis de compuestos fijando en la planta nitrógeno atmosférico, solubilizando hierro y fósforo inorgánico. También ayuda al mejoramiento de la tolerancia al stress de la planta por sequía, salinidad, metales tóxicos y exceso de pesticidas. El segundo grupo, corresponde a los microorganismos que son capaces de disminuir o prevenir el efecto de deterioro por parte de otros microorganismos patógenos (Bashan, 1998).

Por otro lado, la digestión anaerobia es un proceso, desde el punto de vista microbiológico, muy complejo, ya que están relacionados con el ciclo anaerobio del carbono en ausencia de oxígeno. Este proceso permite transformar las sustancias orgánicas en biomasa y otros compuestos volátiles como el CO_2, NH_3, H_2S, N_2 y CH_4. Naturalmente la digestión anaerobia es llevada a cabo en el tracto digestivo de animales o en aguas estancadas o pantanos. No obstante, pueden realizarse en digestores, depósitos que son cerrados herméticamente, ya que al estar en un ambiente sin aire y oscuro, favorece al crecimiento de bacterias anaeróbicas (Soria Fregoso et al., 2001).

La digestión anaeróbica es un proceso degenerativo con presencia de materia orgánica como sustrato siendo estos, residuos de animales o vegetales que son transformados por una serie de reacciones en biogás compuesto de gas metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). La degradación anaerobia de los distintos residuos agroindustriales, incluyendo los de caña de azúcar, son presentados como una tecnología óptima para la generación de biofertilizantes (Otero Guerrero, 2017).

Tabla 11. Tabla completa sobre las composiciones del bagazo, estiércol y cachaza.

		Caña de Azúcar (%)	Bagazo (%)	Cachaza (%)	Estiércol de Cerdo (%)
Carbohidratos	Celulosa	6,15	26,61	4,379	-
	Hemicelulosa	3,75	20,2	1,181	-
	Lignina	3,1	16	0,59	-
Proteínas	Cisteína	0,064	0,2	-	-
	Metionina	0,052	0,6	0,06	-
	Lisina	0,042	0,9	0,27	-
	Leucina	0,014	0,2	0,46	-
	Fenilalanina	0,019	0,1	0,17	-
	Ac. Aspártico	0,098	-	0,56	-
	Treonina	0,022	-	0,33	-
	Ac. Glutámico	0,096	-	0,47	-
	Isoleucina	0,042	-	0,27	-
	Alanina	0,062	-	0,72	-

	Valina	0,024	-	0,45	-
	Tirosina	0,011	-	0,08	-
	Triptófano	0,032	-	0,15	-
	Histidina	0,01	-	0,28	-
	Arginina	0,012	-	0,12	-
	A. palmítico	0,037	0,0612	0,385	-
	A. esteárico	0,036	0,0088	0,082	-
	A. Oleico	0,032	0,559	0,084	-
	A. Linoleico	0,042	0,25	0,025	-
	A. Linolénico	0,032	0,621	0,04	-
	Ac. Mirístico	0,035	-	0,013	-
	Ac. Araquidónico	0,032	-	0,004	-
	n-Tetracosanoico	0,011	-	0,013	-
Lípidos	n-Hexacosanoico	0,011	-	0,006	-
	n-Octacosanoico	0,012	-	0,488	-
	n-Nonacosanoico	0,014	-	0,023	-
	n-Triacontanoico	0,011	-	0,286	-
	n-Dotriacontanoico	0,0113	-	0,158	-
	n-Tetratriacontanoico	0,0143	-	0,212	-
	Estigmasterol	0,011	-	0,524	-
	Campesterol	0,0124	-	0,572	-
	b-Sitosterol	0,011	-	0,595	-
	Óxido de Silicio	0,06	0,304	0,189	-
	Pentóxido de Difósforo	0,01	1,08	-	2,87
	Óxido de Magnesio	0,2	0,217	0,49	0,49
	Óxido de Calcio	0,17	0,298	-	2,32
	Óxido de Potasio	0,4	0,236	-	2,45
Cenizas	Óxido de Hierro	0,06	0,237	1,404	-
	Óxido de Aluminio	0,01	0,23	0,35	-
	Óxido de Sodio	0,03	0,213	-	0,47
	Óxido de Zinc	0,2	-	0,357	0,03
	Óxido de Cobre	0,02	-	0,028	0,01
	Óxido de Manganeso	0,11	-	0,112	0,01
	Óxido de Azufre	-	-	-	0,53
Azúcares	Sacarosa	14	3	3,52	-
	n-Tetracosanol	0,011	-	0,712	-
	n-Hexacosanol	0,01	-	0,558	-
	n-Heptacosanol	0,019	-	0,294	-
Alcoholes	n-Octacosanol	0,135	-	5,543	-
	n-Nonacosanol	0,01	-	0,294	-
	n-Triacontanol	0,013	-	0,872	-
	n-Dotriacontanol	0,011	-	0,172	-
	n-Tetratricontanol	0,016	-	0,335	-
Agua		70,54	27,875	70,72	90.8
Total		**100**	**100**	**100**	**100**

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Reacciones químicas en el bagazo y cachaza.

Reacciones químicas	Bagazo	Cachaza

Polisacáridos			
Celulosa	$C_{240}H_{400}O_{200} + 40H_2O \rightarrow 120CH_4 + 120CO_2$	x	x
Hemicelulosa	$C_{421}H_{810}O_{405} + 16H_2O \rightarrow 210{,}5CH_4 + 210{,}5CO_2$	x	x
Oligosacáridos			
Sacarosa	$C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O \rightarrow 6CH_4 + 6CO_2$	x	x
Polímeros fenólicos o reticulares			
Lignina	$C_{9{,}94}H_{11{,}71}O_{0{,}417} + 4{,}93H_2O \rightarrow 5{,}39CH_4 + 4{,}55CO_2$	x	x
Aminoácidos			
Treonina	$C_4H_9O_3N + H_2O \rightarrow 2CH_4 + NH_3 + 2CO_2$		x
Ácido glutámico	$C_5H_9O_4N + 1{,}5H_2O \rightarrow 2{,}25CH_4 + NH_3 + 2{,}75CO_2$		x
Alanina	$C_3H_7O_2N + H_2O \rightarrow 1{,}5CH_4 + NH_3 + 1{,}5CO_2$		x
Valina	$C_5H_{11}O_2N + 2H_2O \rightarrow 3CH_4 + NH_3 + 2CO_2$		x
Metionina	$C_5H_{11}O_2NS + 2{,}5H_2O \rightarrow 2{,}75CH_4 + NH_3 + H_2S + 2{,}25CO_2$	x	x
Isoleucina	$C_6H_{13}O_2N + 2{,}5H_2O \rightarrow 3{,}75CH_4 + NH_3 + 2{,}25CO_2$		x
Leucina	$C_6H_{13}O_2N + 2{,}5H_2O \rightarrow 3{,}75CH_4 + NH_3 + 2{,}25CO_2$	x	x
Tirosina	$C_9H_{11}O_3N + 5{,}5H_2O \rightarrow 4{,}75CH_4 + NH_3 + 4{,}25CO_2$		x
Fenilalanina	$C_9H_{11}O_2N + 6H_2O \rightarrow 5CH_4 + NH_3 + 4CO_2$	x	x
Histidina	$C_6H_9O_2N_3 + 5H_2O \rightarrow 2{,}5CH_4 + 3NH_3 + 3{,}5CO_2$		x
Lisina	$C_6H_{14}O_2N_2 + 3H_2O \rightarrow 3{,}5CH_4 + 2NH_3 + 2{,}5CO_2$	x	x
Arginina	$C_6H_{14}O_2N_4 + 4{,}5H_2O \rightarrow 2{,}75CH_4 + 4NH_3 + 3{,}25CO_2$		x
Triptofano	$C_{11}H_{12}O_2N_2 + 8{,}5H_2O \rightarrow 5{,}75CH_4 + 2NH_3 + 5{,}25CO_2$		x
Ácido aspártico	$C_4H_7O_4N + H_2O \rightarrow 1{,}5CH_4 + NH_3 + 2{,}5CO_2$		x
Cisteína	$C_3H_7NO_2S + 1{,}5H_2O \rightarrow 1{,}25CH_4 + NH_3 + H_2S + 1{,}75CO_2$	x	x
Ácidos Grasos			
Ácido oleico	$C_{18}H_{34}O_2 + 8{,}5H_2O \rightarrow 12{,}75CH_4 + 5{,}25CO_2$	x	x
Ácido linolénico	$C_{18}H_{30}O_2 + 9{,}5H_2O \rightarrow 12{,}25CH_4 + 5{,}75CO_2$	x	x
Ácido linoleico	$C_{18}H_{32}O_2 + 9H_2O \rightarrow 12{,}5CH_4 + 5{,}5CO_2$	x	x
Ácido esteárico	$C_{18}H_{36}O_2 + 8H_2O \rightarrow 13CH_4 + 5CO_2$	x	x
Ácido palmítico	$C_{16}H_{32}O_2 + 7H_2O \rightarrow 11{,}5CH_4 + 4{,}5CO_2$	x	x
Ácido mirístico	$C_{14}H_{28}O_2 + 6H_2O \rightarrow 10CH_4 + 4CO_2$		x
Ácido araquidónico	$C_{20}H_{32}O_2 + 11H_2O \rightarrow 13{,}5CH_4 + 6{,}5CO_2$		x
Á. n-tetracosanoico	$C_{24}H_{48}O_2 + 11H_2O \rightarrow 17{,}5CH_4 + 7{,}5CO_2$		x

Á. n-hexacosanoico	$C_{26}H_{52}O_2 + 12H_2O \rightarrow 19CH_4 + 7CO_2$	x
Á. n-octacosanoico	$C_{28}H_{56}O_2 + 13H_2O \rightarrow 20{,}5CH_4 + 7{,}5CO_2$	x
Á. n-nonacosanoico	$C_{29}H_{58}O_2 + 13{,}5H_2O \rightarrow 21{,}25CH_4 + 7{,}75CO_2$	x
Á. n-triacontanoico	$C_{30}H_{60}O_2 + 14H_2O \rightarrow 22CH_4 + 8CO_2$	x
Á. n-dotriacontanoico	$C_{32}H_{64}O_2 + 15H_2O \rightarrow 23{,}5CH_4 + 8{,}5CO_2$	x
Á. n-tetratriacontanoico	$C_{34}H_{68}O_2 + 16H_2O \rightarrow 25CH_4 + 9CO_2$	x
Fitoesteroles o esteroles de origen vegetal		
Estigmasterol	$C_{29}H_{48}O + 16{,}5H_2O \rightarrow 20{,}5CH_4 + 8{,}75CO_2$	x
Campesterol	$C_{28}H_{48}O_2 + 15H_2O \rightarrow 19{,}5CH_4 + 8{,}5CO_2$	x
β-sitosterol	$C_{29}H_{50}O + 16H_2O \rightarrow 20{,}5CH_4 + 8{,}5CO_2$	x
Alcoholes alifáticos primarios superiores		
N-tetracosanol	$C_{24}H_{50}O + 11H_2O \rightarrow 18CH_4 + 6CO_2$	x
N-hexacosanol	$C_{26}H_{54}O + 12H_2O \rightarrow 19{,}5CH_4 + 6{,}5CO_2$	x
N-heptacosanol	$C_{27}H_{56}O + 12{,}5H_2O \rightarrow 20{,}25CH_4 + 6{,}75CO_2$	x
N-octacosanol	$C_{28}H_{58}O + 13H_2O \rightarrow 21CH_4 + 7CO_2$	x
N-nonacosanol	$C_{29}H_{60}O + 13{,}5H_2O \rightarrow 21{,}75CH_4 + 7{,}25CO_2$	x
N-triacontanol	$C_{30}H_{62}O + 14H_2O \rightarrow 22{,}5CH_4 + 7{,}5CO_2$	x
N-dotriacontanol	$C_{32}H_{66}O + 15H_2O \rightarrow 24CH_4 + 8CO_2$	x
N-tetratricontanol	$C_{34}H_{70}O + 16H_2O \rightarrow 25{,}5CH_4 + 8{,}5CO_2$	x

Fuente: Elaboración propia