

Propuesta de biorrefinería para la producción de biodiesel a partir de residuos sólidos de café, gastado: diseño y viabilidad

Ricardo Rivera-Dimas ^a, Brenda Lázaro-Molina ^b, Teresa López-Arenas ^{c,*}

^a Licenciatura en Ingeniería Biológica, Universidad Autónoma Metropolitana - Cuajimalpa, Av. Vasco de Quiroga 4871, Santa Fe Cuajimalpa, Ciudad de México, C.P. 05348

^b Posgrado en Ciencias Naturales e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana - Cuajimalpa, Av. Vasco de Quiroga 4871, Santa Fe Cuajimalpa, Ciudad de México, C.P. 05348

^c Departamento de Procesos y Tecnología, Universidad Autónoma Metropolitana - Cuajimalpa, Av. Vasco de Quiroga 4871, Santa Fe Cuajimalpa, Ciudad de México, C.P. 05348

Fecha de recepción: 20 de octubre de 2024 - Fecha de aceptación: 4 de junio de 2025

Resumen

Las biorrefinerías basadas en el uso de biomasa residual de procesos industriales o consumo doméstico para la producción de biocombustibles son importantes en el contexto actual en materia energética. En particular, el biodiésel es biocombustible clave en la transición hacia una economía energética más sustentable, menos dependiente de los combustibles fósiles y más respetuosa con el medio ambiente. Por lo cual, en este trabajo se propone el diseño conceptual de una biorrefinería y su evaluación técnico-económica para la transformación de los residuos sólidos de café gastado en biodiesel. El estudio se realiza mediante modelado y simulación de procesos industriales, proponiendo una ruta de procesamiento para la producción de biodiesel, en la cual se obtienen glicerol y fertilizante (como subproductos con valor agregado). Se evalúan varios escenarios con diferentes cantidades de alimentación de residuos de café gastado, y se calculan los indicadores técnico-económicos. La factibilidad técnica se comprueba con los rendimientos de productos obtenidos: 0.108 kg biodiesel, 0.016 kg glicerol y 0.847 kg fertilizante por kg de residuo seco. Mientras que la rentabilidad se comprueba con dos indicadores económicos, el tiempo y la tasa de retorno sobre la inversión. Los resultados muestran una rentabilidad competente de la biorrefinería en un rango entre 30-65 t/h de alimentación de residuos de café gastado.

Palabras claves: Simulación, residuos de café, biorrefinería, evaluación técnico-económica, economía circular.

Biorefinery proposal for the production of biodiesel from spent coffee solid waste: design and feasibility

Abstract

*mtlopez@cua.uam.mx

Nota: Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 29, No. 2, 2025, ISSN: 2448-8364

Biorefineries based on the use of residual biomass from industrial processes or domestic consumption for the production of biofuels are important in the current energy context. In particular, biodiesel is a key biofuel in the transition towards a more sustainable energy economy, less dependent on fossil fuels and more respectful of the environment. Therefore, in this work, the conceptual design of a biorefinery and its technical-economic evaluation are proposed for the transformation of solid waste from spent coffee into biodiesel. The study is carried out through modeling and simulation of industrial processes, proposing a processing route for the production of biodiesel, in which glycerol and fertilizer are obtained (as by-products with added value). Several scenarios with different amounts of spent coffee waste feed are evaluated, and the technical-economic indicators are calculated. The technical feasibility is verified by the product yields obtained: 0.108 kg biodiesel, 0.016 kg glycerol and 0.847 kg fertilizer per kg of dry residue. While the profitability is verified by two economic indicators, time and rate of return on investment. The results show a competent profitability of the biorefinery in a range between 30-65 t/h of coffee waste feed consumption.

Keywords: Simulation, coffee waste, biorefinery, technical-economic evaluation, circular economy.

1. Introducción

La producción de cultivos de semillas oleaginosas y granos para percolado van acompañados de la generación de una enorme cantidad de residuos de cultivos, los cuales, al no competir con los suministros de alimentos o piensos, pueden utilizarse como materia prima sostenible para producir biocombustibles. En particular, los residuos de cultivos se clasifican en (a) residuos primarios o residuos del campo, que corresponden a los desechos que quedan en el campo después de las cosechas, como tallos, pedúnculos y hojas; y (b) residuos secundarios o residuos de proceso, que son los desechos generados durante el procesamiento de los cultivos, por ejemplo, racimos vacíos de frutos de palma aceitera y las cáscaras de semillas (Yong & Wu, 2022). En este trabajo se propone el uso de residuos secundarios de los granos de café, que son las semillas de la fruta del cafeto, pero la metodología podría aplicarse a otras semillas oleaginosas o granos para percolado. El consumo de café es una actividad cotidiana adoptada en todo el mundo, con un consumo mundial de aproximadamente 10.6 millones de toneladas anuales. En México, el café se consume anualmente alrededor de 174,000

toneladas principalmente en dos presentaciones, café soluble y café tostado/molido. De este consumo anual, 69,600 toneladas llegan al consumidor final en forma de café de grano y 104,400 toneladas son procesadas por la industria para la producción de café soluble (USDA FAS, 2023). De la misma manera que muchas otras industrias, la industria del café genera residuos en las diferentes etapas de procesamiento. Entre los residuos secundarios generados de los granos de café, existen tres principales: (a) la cáscara de café que se obtiene del procesamiento en seco de los granos de café luego de su cosecha, (b) la pulpa plateada obtenida durante el tostado del grano verde, la cual es una forma delgada del recubrimiento del grano, y (c) los residuos de café gastado (RCG) obtenidos tanto de la extracción del café tostado/molido y la extracción por liofilización para la obtención de café soluble (Bomfim et al., 2022). En este trabajo se considera únicamente a los RCG provenientes de residuos domésticos del café de grano y de la industria del café soluble. Al consumirse 1 kg de café molido se producen aproximadamente 0.9 kg de RCG seco (Tun et al., 2020). Sin embargo, los RCG son una

biomasa que, debido a su origen, guarda un alto porcentaje de humedad, ya que el agua es fundamental en los procesos de extracción para la preparación de bebidas. La humedad promedio que se almacena en el RCG es de 65% (p/p) (Tun et al., 2020), este aspecto de la biomasa es de vital importancia para la gestión y almacenamiento, ya que puede propiciar el crecimiento de hongos. Por lo cual para su procesamiento se recomienda eliminar la humedad hasta un 6%.

Entre las aplicaciones propuestas para los RCG se encuentran abonos mixtos, fertilizantes, mejoradores del suelo, y sustratos empleados en la producción de hongos. Pero estas aplicaciones no son el único enfoque que existe, también se ha valorizado como una fuente de energía debido a su capacidad calorífica reportada en 5000 kcal/kg, transformando los RCG en biomasa para combustión, adicionalmente, es posible su uso para la obtención de moléculas de interés a partir de la extracción de los lípidos presentes (Arya et al., 2022). El potencial valor de los RCG es debido a su composición (Battista et al., 2020) conformada principalmente por: hemicelulosa (33%), lignina (25%), lípidos (15%), proteínas (14%), celulosa (11%) y cenizas (2%). Donde las cenizas se consideran todas las moléculas no volatilizadas en la preparación de la bebida café, incluyendo la cafeína remanente. En particular es de gran interés la extracción de los lípidos para su posterior transformación. Los lípidos presentes en los aceites del RCG se agrupan en cinco categorías por su naturaleza química: triglicéridos (TG, 75%), ésteres de diterpenos (ED, 20%), ácidos grasos (AG, 3.6%), fosfolípidos (0.4%) y tocoferoles (1%). Respecto a los triglicéridos, son la mayor fracción, principalmente se trata de ácido linoleico y ácido palmítico, mientras que los fosfolípidos corresponden principalmente alecitina (Pazmiño Arteaga, 2020).

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es establecer una ruta tecnológica para la

extracción de aceite y su conversión en biodiesel y glicerol, así como su evaluación técnico-económica, usando herramientas de modelado y simulación de procesos.

2. Metodología

Durante el diseño de productos y procesos a partir de biomasa y/o residuos, se presentan diversos desafíos como: (1) determinar la composición de las materias primas, (2) crear diagramas de flujo para la síntesis del proceso, (3) seleccionar las condiciones de operación para producir los productos deseados con alto rendimiento, alta productividad, pocos desechos y bajo costo de operación, y (4) crear procesos industriales y productos de consumo determinado. La síntesis y el diseño de procesos implica enfoques innovadores que conduzcan a productos y procesos más rentables, operativamente seguros y de bajo impacto ambiental.

De acuerdo con Seider et al. (2009), los pasos principales en el diseño de productos y procesos empleando modelado y simulación de procesos son: comenzar con una oportunidad potencial de materias primas y productos deseados (en base a su consumo o mercado), luego establecer una ruta crítica del proceso mediante diagramas de flujo de proceso, para lograr los productos con los rendimientos deseados. Posteriormente se debe establecer y evaluar un diseño de caso base, tal que la ganancia bruta del proceso sea favorable. Cuando el proceso sea prometedor y/o cuando se debe diseñar un producto industrial, se continúa con el diseño del proceso detallado, incluyendo el equipamiento, el dimensionamiento, la operación, el control y la optimización.

La metodología general adoptada en este trabajo se resume en la Figura 1, en la cual se presenta a grandes rasgos los pasos de síntesis, evaluación y análisis. En la etapa de síntesis, se propone un diseño conceptual considerando las operaciones unitarias requeridas para cada etapa del proceso. Mientras que para el diseño

básico y evaluación técnica de la biorrefinería, se toman en cuenta los balances de materia y energía, propiedades fisicoquímicas de los componentes, cinética de reacción, y condiciones de operación de los equipos de proceso. Para la evaluación económica, se

calculan dos parámetros: el retorno sobre la inversión y el tiempo de retorno de la inversión. Por último, el análisis de los resultados técnicos y económicos determinan si la biorrefinería es o no es rentable.

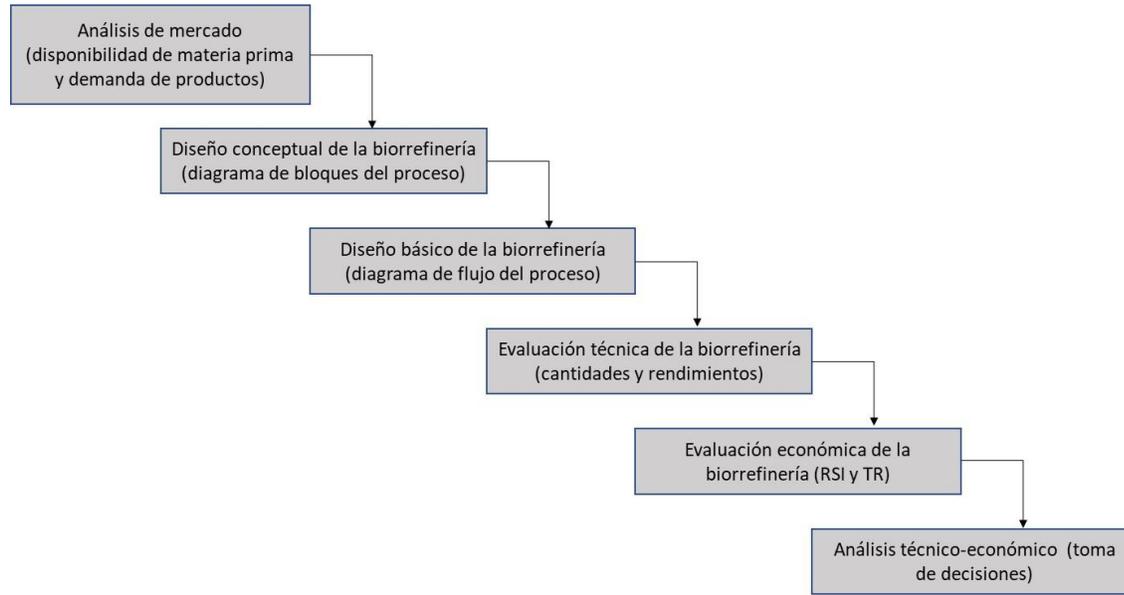


Figura 1. Metodología general para el desarrollo y evaluación de una biorrefinería a partir de RCG.

2.1 Metodología de modelado y simulación de Procesos

El uso de los modelos matemáticos como una representación de fenómenos naturales es una herramienta de gran utilidad para la predicción de comportamiento de sistemas dinámicos, tal que la incorporación de esta capacidad al software de simulación de procesos, permiten la estimación de resultados, que acompañados de criterios de selección, pueden determinar la viabilidad de una planta conceptual.

Específicamente los modelos de los procesos químicos y biológicos están basados en los balances de materia, energía y momento. Mientras que los programas especializados de simulación de procesos utilizan diagramas de flujo de proceso a los cuales se asignan modelos que representan las operaciones unitarias, teniendo en cuenta una serie de

parámetros, que se pueden adaptar incluso para operaciones unitarias no convencionales, pero siempre utilizando las ecuaciones correspondientes a sus balances.

Existen diferentes enfoques para la solución de las ecuaciones que representan los simuladores de procesos, ya sea utilizando módulos y resolver secuencialmente las ecuaciones contenedoras para avanzar a resolver el siguiente módulo, pero también está el enfoque de plantear las ecuaciones para ser resueltas de manera simultánea, lo que puede llevar a la solución del sistema con mayor eficiencia (Towler & Sinnott, 2022). Para un software de simulación de procesos existe un algoritmo general sobre su funcionamiento, la primera tarea consiste en ejecutar un subprograma que da seguimiento y controla los cálculos a realizar sobre el diagrama de flujo. La segunda

consiste en conectar a subprograma de biblioteca que contiene los módulos de las operaciones unitarias a ejecutar, éstos toman como base los valores asignados a los parámetros. El tercer subprograma contiene una extensa base de datos de propiedades físicas, y el cuarto subprograma asigna las propiedades termodinámicas de cada componente, así como equilibrios de fase, de reacción y las entalpías de las corrientes. Finalmente se ejecuta toda una subrutina para la asignación de costos de los equipos, acorde a su capacidad, requerimientos energéticos, tiempo de operación, etc. (Towler & Sinnott, 2022). En particular, en este trabajo se emplea

SuperPro Designer que es un simulador de procesos modular, el cual dispone de herramientas de modelado (para la evaluación de balances de materia y energía) y de simulación de procesos (como métodos numéricos para sistemas de ecuaciones algebraico-diferenciales); así como bases de datos de propiedades de componentes puros, modelos termodinámicos, entre otros.

2.2 Descripción de la biorrefinería

La Figura 2 presenta el diagrama de flujo de la biorrefinería implementado en el simulador de procesos (*SuperPro Designer*). Y enseguida se describe cada sección del proceso industrial.

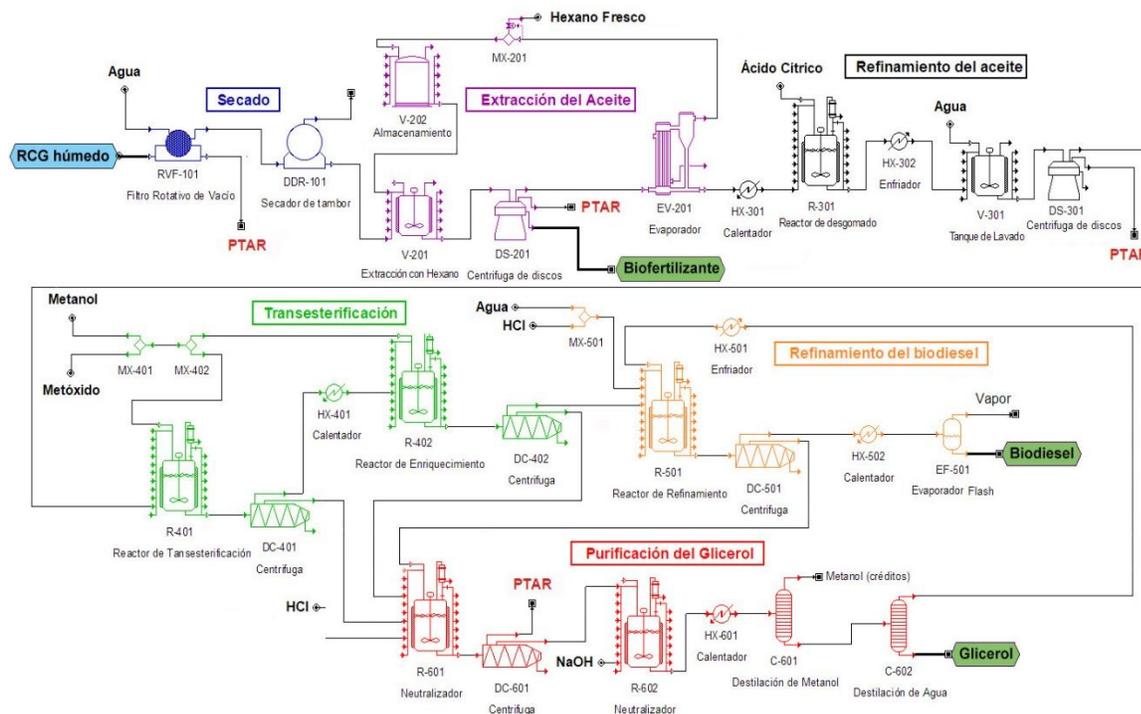


Figura 2. Diagrama de Flujo de Proceso en para la producción de biodiesel, glicerol y fertilizante a partir de RCG.

La biorrefinería comienza con una etapa de reducción del contenido de humedad del RCG. Posteriormente se realiza la extracción del aceite mediante el empleo de un solvente, el cual se seleccionó como hexano debido a su afinidad con la fracción de lípidos y por su costo y disponibilidad. De esta etapa, la fase

sólida es secada para comercializarla como un fertilizante libre de metales pesados. Mientras que la fase líquida (aceite de café) sigue un proceso de refinamiento del aceite, empleando vapor y ácido cítrico para el desgomado. Seguido de su conversión a biodiesel mediante una reacción de transesterificación, utilizando

metanol como reactivo y metóxido de sodio como catalizador. Después de esta etapa, los productos de la reacción (biodiesel y glicerol) son separados. Y para garantizar las especificaciones de cada producto se propone el uso de dos trenes de purificación.

Dado que este diseño conceptual es una primera propuesta, solo se indica en el diagrama de flujo que las aguas residuales deben ser tratadas y recicladas mediante una PTAR (planta de tratamiento de aguas residuales), pero no se considera en la evaluación técnica-económica.

2.3 Parámetros para la evaluación técnica

La máxima disponibilidad nacional anual de RCG húmedo en 452,400 toneladas. Las reacciones que ocurren en el proceso no son de naturaleza biológica, por lo que el régimen de operación es continuo, considerando un tiempo efectivo de operación de 330 días. De esta manera se establece que el flujo másico máximo que se puede alimentar en una planta industrial en México es de 57.12 t/h, por lo cual como parte del análisis se realizan simulaciones del proceso considerando un rango para la alimentación de RCG entre 30-65 t/h. Los balances de materia y energía se resuelven en estado estacionario utilizando métodos numéricos

Para determinar la eficiencia de conversión de los RGC a los productos seleccionados (biodiesel, glicerol y fertilizante), se calcularán los rendimientos de producto en términos de kg producto/kg materia prima; de manera que sea posible especificar con cuál producto hay mayor recuperación de los componentes de los RCG.

2.4 Parámetros para la evaluación económica

Cuando se realiza un diseño básico de una planta, es importante considerar los costos operativos y de capital, el propósito de una planta productiva incluye generar valor que asegure retornos sostenibles para los inversores, por ello es necesario evaluar la

viabilidad económica del proyecto utilizando indicadores a los que se la aplica una serie de criterios, para confirmar o negar la viabilidad (Towler & Sinnott, 2022). El primer indicador que se emplea para la evaluación de la viabilidad económica es la tasa de retorno sobre la inversión (RSI), el cual representa el beneficio neto del proyecto de inversión. El valor recomendable para el RSI es que sea mayor al 15% (Solid, 2020). El segundo indicador seleccionado es el tiempo de retorno de la inversión (TRI), que se considera como el tiempo requerido para obtener de vuelta el valor de la inversión inicial (instalaciones, equipos, capacitación del personal etc.) a partir de la comercialización del producto o productos de una planta. Un criterio de rentabilidad aceptable para evaluar un proyecto es que el tiempo de recuperación sea menor a 4 años.

En particular, la biorrefinería industrial se implementó en modo de operación continuo, y las suposiciones para la evaluación económica fueron: todos los costos están en dólares estadounidenses (\$), impuesto sobre la renta del 30%, período de depreciación de los equipos de 10 años, y precios de venta del biodiesel, glicerol y fertilizante de 0.7 \$/kg, 0.3 \$/kg y 0.05 \$/kg, respectivamente. El precio de adquisición de RCG se fijó en 0.01 \$/kg, aunque es importante señalar que su precio puede variar dependiendo de la región, su disponibilidad, recolección y transportación (Banu et al., 2021).

3. Resultados

3.1 Evaluación técnica

En la Tabla 1 se muestran los valores obtenidos de las simulaciones del proceso variando la cantidad de RCG húmedo alimentado. El primer renglón indica la cantidad alimentada a la biorrefinería (en base húmeda, bh), el segundo renglón es la cantidad equivalente anual en base seca (bs); mientras que el resto son cantidades de producción anual y los rendimientos que fueron definidos como

indicadores técnicos. En particular, se evaluó un caso con una alimentación de 57.12 t/h de RCG húmedo, ya que correspondería al caso

técnicamente viable en México por la disponibilidad de RCG generados.

Tabla 1. Resultados del análisis de sensibilidad variando la cantidad de alimentación de RCG.

Concepto	Cantidades			
	30	45	57.12	65
Alimentación de RCG bh (t/h)	30	45	57.12	65
Alimentación de RCG bs (t/año)	83,160	124,740	158,340	180,180
Producción de fertilizante (t/año)	70,439	105,659	134,121	152,619
Producción de biodiesel (t/año)	8,989	13,483	17,110	19,476
Producción de glicerol (t/año)	1,322	1,983	2,510	2,864
Rendimiento de fertilizante (kg/kg RCG bs)	0.847	0.847	0.847	0.847
Rendimiento de biodiesel (kg/kg RCG bs)	0.108	0.108	0.108	0.108
Rendimiento de glicerol (kg/kg RCG bs)	0.016	0.016	0.016	0.016

El análisis de sensibilidad, presentado en la Tabla 1, muestra que las cantidades de productos aumentan de manera proporcional al incrementar el flujo de alimentación a la biorrefinería. Mientras que, como es esperado, los rendimientos de productos (kg de producto / kg de RCG bs) son independientes de la cantidad del flujo de alimentación de materia prima, debido a que la evaluación técnica del proceso considera reacciones estequiométricas y eficiencias de los equipos fijas (constantes), de manera que la relación de aumento del flujo de alimentación y flujo de productos generados se mantiene constante. Adicionalmente estos rendimientos reflejan el grado de aprovechamiento de la materia prima, ya que indican que 10.8% de RCG se convierten a biodiesel, 1.6% a glicerol, y 84.7% a biofertilizante; y el restante (2.9%) no se logra convertir, recuperar o se pierde a lo largo del proceso.

Otro aspecto importante en la operación de la biorrefinería es el consumo energético, en términos de vapor y electricidad. La energía requerida por la biorrefinería difiere entre secciones, ya que algunas secciones requieren de agentes de calentamiento como vapor, o bien requieren de energía eléctrica para el funcionamiento de los equipos. Los porcentajes de consumo se presentan en la Figura 3, donde se puede observar la distribución de energía. El área de secado es la que mayor cantidad de vapor demanda debido a la cantidad de materia procesada en esta etapa, así como de la cantidad de agua que se remueve en este proceso (eliminando humedad desde un 65% del peso del RCG húmedo hasta un 6%). Con respecto a la electricidad requerida, el equipo con mayor demanda para su funcionamiento es la centrifuga de discos DS-201 en el área de extracción del aceite, con un 82%.

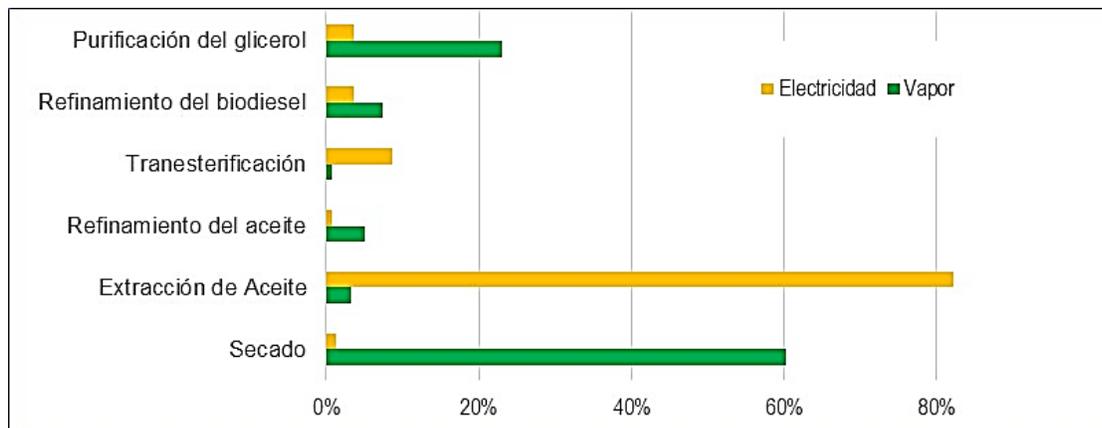


Figura 3. Distribución del consumo de energía eléctrica y vapor por sección de la biorrefinería.

3.2 Evaluación Económica

Para realizar la evaluación económica, se consideran los flujos de entrada y salida de cada operación unitaria (obtenidos de los balances de materia y energía), así como los costos de materia prima, de venta de productos, de servicios (agua, vapor, electricidad), mano de obra, y de adquisición y depreciación de los

equipos, de acuerdo con el flujo de alimentación de RCG. Los reportes económicos de cada caso de estudio permiten la evaluación de proyectos de inversión y la determinación de su rentabilidad. Los resultados de los indicadores económicos se muestran en la Figura 4 en función de la alimentación de RCG.

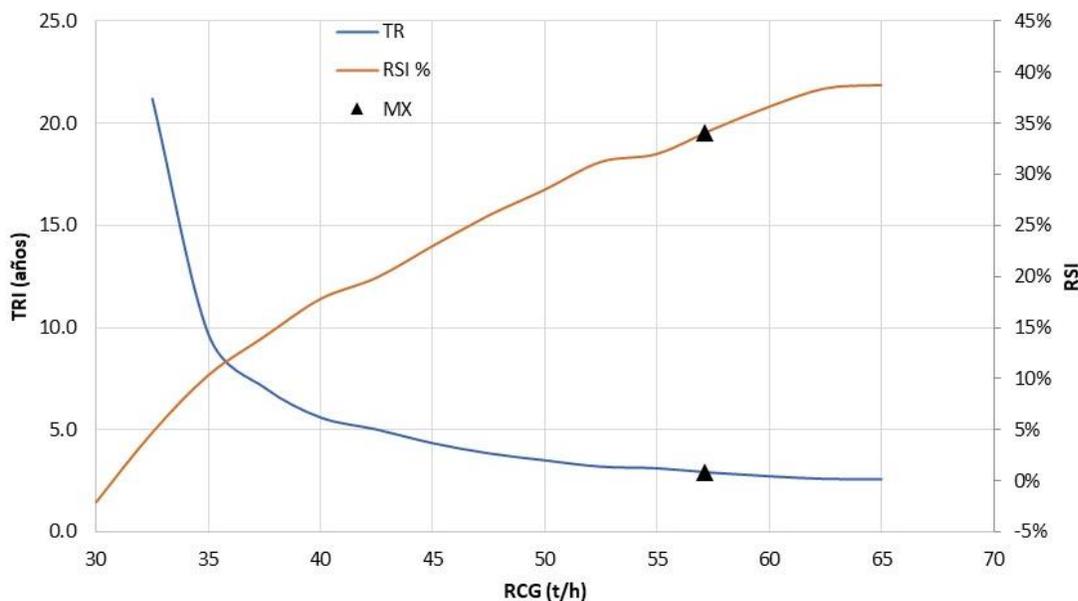


Figura 4. Indicadores económicos en función de la cantidad alimentada de RCG.

Para el indicador RSI, se observa que la cantidad mínima de RCG para que no generen pérdidas como inversión se alcanza con 30 t/h alimentadas. Aunque el comportamiento es

proporcional entre la cantidad alimentada y el RSI, se estima que existe un punto máximo donde el RSI deja de incrementar (40%) con una alimentación mayor a 65 t/año. El

escenario particular para México, se indica con un triángulo, en el cual el RSI es 34.03%.

Para el indicador TRI, se observa que es inversamente proporcional a la cantidad de RCG alimentado, particularmente tiene un comportamiento asintótico tanto horizontal como vertical. Lo que indica que la cantidad mínima para ser viable (i.e. TRI < 4 años) es 47.5 t/h, respecto al menor tiempo de recuperación alcanzado de 2.6 años para 65 t/año. Para el escenario en México se tendría un

valor de 2.94 años, por lo que es rentable dentro de los criterios de selección.

3.3 Algunos aspectos ambientales

Para analizar el impacto ambiental del proceso, se evaluaron: el consumo de agua (por su posible efecto en el estrés hídrico), el consumo de electricidad (por su impacto en el calentamiento global), así como las emisiones de CO₂ (por su contribución en los gases de efecto invernadero). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros ambientales de la biorrefinería

Concepto	Cantidad			
RCG húmedo (t/h)	30.00	45.00	57.12	65.00
Agua requerida (t/año)	9,809	14,713	18,676	21,252
CO ₂ generado (t/año)	0	0	0	0
Electricidad consumida (kWh/año)	2,223,396	3,564,252	4,438,763	5,251,657
Requerimiento de agua (kg/kg RCG bs)	0.12	0.12	0.12	0.12
Emisiones de CO ₂ (kg/kg RCG bs)	0.00	0.00	0.00	0.00
Requerimiento de electricidad (kWh/kg RCG bs)	26.7	28.6	28.0	29.2

Se puede observar que el requerimiento de agua es muy bajo, por lo que no afectaría a la disponibilidad de recurso hídrico en los alrededores de la biorrefinería. Por otra parte, no se registra CO₂ emitido, esto es porque estrictamente ninguna de las reacciones o separaciones que se llevan a cabo en el proceso genera CO₂. Y finalmente, en cuanto a la electricidad requerida, el promedio requerido (aprox. 28 kWh/kg RCG bs) es alto, por lo cual deberían buscarse alternativas de procesamiento para disminuir su consumo.

4. Discusión de resultados

En este trabajo se propuso que una forma para determinar la viabilidad técnica es mediante los indicadores técnicos que corresponden a los rendimientos de producto, como una medida del aprovechamiento de los RCG. Un resultado relevante fue que los rendimientos son constantes con respecto a la variación de la

cantidad alimentada de RCG (ver Tabla 1), comprobando que son propiedades intensivas del proceso. El rendimiento más alto fue para el fertilizante (no obstante, es el producto con precio de venta más bajo), seguido por el biodiesel (con el precio de venta más alto) y al final el glicerol. Por lo cual resulta importante realizar en conjunto el análisis técnico-económico para obtener conclusiones que puedan llevar a la toma de decisiones en el siguiente paso del diseño.

Respecto a la evaluación económica, la Figura 4 es destaca los límites de rentabilidad (considerando que el RSI sea mayor al 15% y el TRI sea menor de 4 años), lo cual es importante para determinar la capacidad instalada de la planta. De acuerdo con los resultados, la alimentación mínima deberá ser 30 t/h de RGC bh (equivalente a 237,600 t/año de RGC bh), y alcanzado un límite superior casi exponencial a partir de 65 t/h (equivalente a

514,800 t/año de RGC bh). En particular para el caso evaluado para México (correspondiente a 57.12 t/h de RCG bh) se alcanzó una rentabilidad satisfactoria con RSI = 34.03% y TRI = 2.94 años.

En cuanto a los aspectos ambientales, aunque no fue un objetivo de este trabajo, se verificaron algunos indicadores de impacto al medio ambiente como son las emisiones de dióxido de carbono y consumo de agua y electricidad, ya que estos factores tienen influencia sobre el calentamiento global y el estrés hídrico. Aunque la biorrefinería propuesta no genera CO₂, es importante señalar que el consumo de electricidad implica el uso de combustibles fósiles que al generar la electricidad producirían CO₂. Pero, por otra parte, el CO₂ emitido podría ser fijado nuevamente por el crecimiento de las plantas de café (que es el origen de los RCG). Por lo cual el balance de CO₂ podría ser bajo o neutro. Por supuesto se requerirá de análisis más rigurosos como el análisis de ciclo de vida para medir el impacto ambiental de la biorrefinería propuesta.

5. Conclusiones

Los resultados de este trabajo demuestran que es posible valorizar los RCG, los cuales actualmente tienden a irse con los residuos orgánicos como composta o a rellenos sanitarios. Los resultados de este estudio indican que la biorrefinería propuesta a escala

industrial para la conversión de los RCG en biodiesel (como producto principal), glicerol y fertilizante (como subproductos) es una alternativa factible y rentable. Este estudio ha sido una primera etapa de investigación del diseño básico, por lo que los resultados favorables encaminan a que se debe continuar con una investigación dirigida a la ingeniería de detalle. Desde el punto de vista de su implementación industrial, existen algunos desafíos como son la disponibilidad y variabilidad de la composición de los RCG, los costos y la logística que involucra la recolección y transportación de los RCG, aspectos regulatorios, entre otros. Desde el punto de vista de simulación, como perspectivas de investigación, se requiere estudiar otras alternativas de rutas de procesamiento, incorporar el modelado riguroso de cada operación unitaria, la optimización de las condiciones de operación del proceso, la automatización del proceso, el empleo de modelos económicos más rigurosos (como el método de valor presente neto, VPN), entre otros. También es importante resaltar que la metodología propuesta puede ser extendida empleando otras materias primas similares como son los residuos de cultivos de semillas oleaginosas.

Reconocimientos

Este trabajo fue apoyado por el CONACYT en el año 2024 (Proyecto CBF2023-2024-3615).

Referencias

- Arya, S. S., Venkatram, R., More, P. R., & Vijayan, P. (2022). The wastes of coffee bean processing for utilization in food: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 59(2), 429–444. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05032-5>
- Banu, J.R., Kannah, R.Y., Kumar, M.D., Kavitha, S. Gunasekaran, M., Zhen, G., Awasthi, M.K., & Kumar, F. (2021). Spent coffee grounds based circular bioeconomy: Technoeconomic and commercialization aspects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111721, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111721>
- Battista, F., Barampouti, E. M., Mai, S., Bolzonella, D., Malamis, D., Moustakas, K., & Loizidou, M. (2020). Added-value molecules recovery and biofuels production from spent coffee

- grounds. “Renewable and Sustainable Energy Reviews”, 131, 110007. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110007>
- Bomfim, A. S. C. D., De Oliveira, D. M., Walling, E., Babin, A., Hersant, G., Vaneckhaute, C., Dumont, M.J., & Rodrigue, D. (2022). Spent Coffee Grounds Characterization and Reuse in Composting and Soil Amendment. *Waste*, 1(1), 2–20. <https://doi.org/10.3390/waste1010002>
- Pazmiño Arteaga, J. D. (2020). Aproximación lipidómica al estudio de las alteraciones de la calidad del café verde durante el almacenamiento. Tesis de doctorado, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/16032/2/Pazmi%c3%b1oJhonathan_2020_Caf%c3%a9Lipid%c3%b3micaEstabilidad.pdf
- Seider, D.W., Seader, J.D., Lewis, D.R., & Widagd, S. (2009) “Product and Process Design Principles: Synthesis Analysis and Design”, John Wiley & Sons, New York.
- Solid, C. A. (2020). “Return on investment for healthcare quality improvement”, 1st ed., Springer.
- Towler, G. P., & Sinnott, R. K. (2022). “Chemical engineering design: Principles, practice and economics of plant and process design”, Third edition, Butterworth-Heinemann.
- Tun, M. M., Raclavská, H., Juchelková, D., Růžicková, J., Šafář, M., Štrbová, K., & Gikas, P. (2020). Spent coffee ground as renewable energy source: Evaluation of the drying processes. *Journal of Environmental Management*, 275, 111204. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111204>
- USDA FAS - Foreign Agricultural Service (2023). Coffee Annual Mexico Report 2023 (Report Number: MX2023-0024). https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Coffee%20Annual_Mexico%20City_Mexico_MX2023-0024.pdf
- Yong, K.J., & Wu, T.Y. (2022). Second-generation bioenergy from oilseed crop residues: Recent technologies, techno-economic assessments and policies, *Energy Conversion and Management* 267, 115869. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115869>