

ISSN: 2594-0937

Debates sobre Innovación

Número 1, Volumen 8
Ene-Mar de 2022



Memorias 4to Coloquio de estudiantes de posgrado sobre
Gestión y Políticas de CTI

Comité editorial

Gabriela Dutrénit
José Miguel Natera
Arturo Torres
José Luis Sampedro
Diana Suárez
Marcelo Mattos
Carlos Bianchi
Jeffrey Orozco
João M. Hausmann
Matías F. Milia

REVISTA ELECTRÓNICA
TRIMESTRAL



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
METROPOLITANA
Unidad Xochimilco



MEGI
MAESTRÍA EN ECONOMÍA, GESTIÓN
Y POLÍTICAS DE INNOVACIÓN



LALICS

LATIN AMERICAN NETWORK FOR ECONOMICS FOR LEARNING,
INNOVATION AND COMPETENCE BUILDING SYSTEMS

DEBATES SOBRE INNOVACIÓN. Volumen. 8 Número. 1. Enero - Marzo 2022. Es una publicación trimestral de la Universidad Autónoma Metropolitana a través de la Unidad Xochimilco, División de Ciencias Sociales y Humanidades, Departamento de Producción Económica. Prolongación Canal de Miramontes 3855, colonia Ex-Hacienda San Juan de Dios, Alcaldía Tlalpan, C.P. 14387, México, Ciudad de México y Calzada del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04960, Ciudad de México. Teléfonos 5554837200, ext.7279. Página electrónica de la revista <http://economiaeinovacionuamx.org/secciones/debates-sobre-innovacion> y dirección electrónica: megct@correo.xoc.uam.mx Editor Responsable: Dra. Gabriela Dutrénit Bielous, Profesora-Investigadora del Departamento de Producción Económica. Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo de Título No. 04-2017-121412220100-203, ISSN 2594-0937, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Gabriela Dutrénit Bielous, Departamento de Producción Económica, División de Ciencias Sociales y Humanidades, Unidad Xochimilco. Calzada del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, Alc. Coyoacán, C.P. 04960, Ciudad de México. Fecha de última modificación: 15 de mayo de 2022. Tamaño del archivo: 13.6 MB.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad Autónoma Metropolitana.

“Biorrefinería sostenible”, concepto integral para la transición sociotécnica hacia la bioeconomía. Caso de estudio: Proceso productivo de café en Chiapas

Pérez-Montoya Luz Mariana

Programa Transdisciplinario en Desarrollo Científico y Tecnológico para la Sociedad. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional., México.

lperez@cinvestav.mx

Bañuelos Cecilia

Programa Transdisciplinario en Desarrollo Científico y Tecnológico para la Sociedad. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

cebanuelos@cinvestav.mx

Resumen

Se entiende por “biorrefinería sostenible”, toda instalación que, a través del procesamiento en varias etapas, no solo convierta biomasa en energía y productos comercializables, sino que, además, asegure que esta transformación tendrá un beneficio ambiental, económico y social. Por su parte, la bioeconomía es una alternativa viable para lograr la sostenibilidad de este tipo de procesamientos. Por ello, en los últimos años se ha buscado integrar este concepto en las políticas públicas y programas para contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 desde México; tal es el caso de la Ley sobre el Aprovechamiento de Fuentes Renovables de Energía en 2005 y la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos en 2008, en donde se promueve el uso de residuos agroindustriales para su transformación en biocombustibles. En este tenor, se prevé factible la transformación de residuos agroindustriales en productos de interés comercial, dado que México es un país fuerte en actividad agrícola y agropecuaria y que, por tanto, genera una gran cantidad de residuos que no están siendo aprovechados, como los residuos derivados del proceso de producción de café. En México, el café es un cultivo estratégico, que lo ubica en el onceavo lugar como productor a nivel mundial, siendo Chiapas la entidad que mayor producción aporta, gracias a las contribuciones de cooperativas y familias indígenas. En su procesamiento, se utiliza aproximadamente el 10% del peso total del fruto y el 90% son subproductos que se vierten en los ecosistemas. Aprovechar estos residuos bajo el concepto de bioeconomía implicaría el uso de herramientas de intensificación de procesos para prever la factibilidad de co-generación de otros productos de valor agregado, y se haría necesaria la vinculación con otros sectores, dando espacio al trabajo académico, la colaboración gubernamental y la visión del sector privado. Así entonces, en este trabajo se presentaron los primeros resultados de co-generación de productos a partir de residuos del proceso y consumo de café, mostrando que el mucílago de café es el residuo que posee mayores rendimientos teóricos en cuanto a producción de bioetanol. Así también, se muestra una primera aproximación a un modelo que destaca el papel de actores determinantes para el desarrollo de esta propuesta.

1. Introducción

Uno de los desafíos más apremiantes de este siglo es mitigar el calentamiento global mientras se satisface la creciente demanda de energía de la humanidad. Las energías renovables (por ejemplo, la solar, la eólica y los biocombustibles) parecen ser las alternativas más prometedoras para abordar este desafío (IEA, 2021).

La producción de biocombustibles de primera generación podría tener desventajas en México, ya que algunas materias primas provienen de cultivos alimentarios como el maíz y la caña de azúcar, lo que provocaría inestabilidad en los precios y escasez de mercado. Los biocombustibles de segunda generación podrían ser una solución adecuada para disponer de combustibles menos contaminantes de forma sostenible [Cisneros-Lopez *et al.*, 2020], incluso en comparación con los biocombustibles de tercera generación, que suelen tener procesos menos económicos al hacer uso de técnicas de biología molecular. En ese sentido, diseñar, evaluar y optimizar biorrefinerías para la producción eficiente y sostenible de bioproductos como los biocombustibles, son aspectos significativos para sustituir el uso de combustibles fósiles y adicionar valor agregado al uso de la biomasa y los residuos [Santangeli *et al.*, 2016]. La transformación de una economía basada en la petroquímica a una economía de base biológica requiere la explotación novedosa de materiales naturales rentables para el desarrollo de una biorrefinería y de una gama de productos de interés con valor agregado, considerando además que la biotransformación de flujos de residuos y subproductos tiene un gran potencial y perspectivas significativas para aplicaciones industriales y biotecnológicas más amplias [Aleman-Nava *et al.*, 2018].

El desarrollo de las biorrefinerías depende de varios aspectos, desde la materia prima que entra al proceso, el consorcio microbiano que transforma la materia prima e incluso las características del producto que se desea obtener. En este contexto, en los últimos años se han desarrollado diversas propuestas de biorrefinerías sostenibles. Por ejemplo, se ha encontrado que, a partir de material lignocelulósico como la paja de trigo y el rastrojo de maíz, es posible producir etanol e hidrógeno utilizando organismos genéticamente modificados [López-Hidalgo *et al.*, 2021], mostrando que los esquemas de co-producción podrían ser una alternativa para las biorrefinerías de etanol lignocelulósico. Por otro lado, investigaciones recientes mencionan que co-cultivos y consorcios microbianos permiten el desarrollo de biorrefinerías para la producción de biocombustibles y compuestos de alto valor a través de la transformación de biomasa [Romero-Cortes *et al.*, 2018]. Muestra de esto son los nuevos consorcios termófilos de alto rendimiento empleados en la etapa de fermentación de una biorrefinería, que pueden conducir a una producción competitiva de bioproductos a escala comercial utilizando biomasa lignocelulósica como materia prima [Rosero-Chasoy *et al.*, 2021]. En cuanto al proceso de transformación, se han usado los principios de la química verde, desarrollando metodologías novedosas para el diseño de procesos sostenibles. Por ejemplo, para la síntesis de compuestos en biorrefinerías se han desarrollado algoritmos de optimización utilizando la métrica de rendimiento ponderado de la inversión en sostenibilidad (SWROIM) [Meramo-Hurtado *et al.*, 2020]. En el marco de la optimización multiobjetivo, para analizar la distribución conveniente del producto en una biorrefinería lignocelulósica, se han considerado índices económicos, ambientales y de seguridad que parten de datos cinéticos y de rendimiento a nivel laboratorio para los procesos correspondientes [Larragoiti-Kuri *et al.*, 2017]. El diseño de las biorrefinerías posee un punto de comparación importante en términos de productividad e incluso inversión asociados con los esquemas convencionales, sin embargo, los bajos costos totales de producción relacionados con la inversión y la tasa de productividad de tales esquemas, no son suficientes para compensar, en términos monetarios, sus severos impactos ambientales (principalmente el uso de agua y la contaminación), en comparación con las opciones de biorrefinación [Sánchez *et al.*, 2020].

La conversión de biomasa en biocombustibles y otros productos mediante métodos de procesamiento renovables, representa una forma estratégica de reducir el uso de materias primas fósiles, contribuyendo al cambio hacia una industria más sostenible. El uso de residuos

agroindustriales no resta recursos destinados al consumo alimentario. Además, la utilización de residuos daría lugar a una reducción de su acumulación, con la consecuente disminución del impacto ambiental y de las pérdidas financieras debidos a la disposición final [de Bitonto *et al.*, 2020].

Molina-Guerrero y col. (2020) realizaron un estudio en torno a los residuos agrícolas más importantes generados en México durante los últimos años (2008-2017). Por un lado, se caracterizaron los cuatro cultivos más importantes de México, denominados residuos convencionales (CR), como maíz, trigo, sorgo y cebada, y también se hicieron estimaciones para cultivos de importancia regional, identificados como residuos no convencionales (NCR), como café, caña de azúcar y frijol. Para tales residuos, se calcularon los potenciales energéticos totales y sostenibles (TEP y SEP) bajo un esquema de biorrefinería. La disponibilidad calculada de residuos de cultivos fue de 59,059,666 T/año, el TEP estimado fue de 1,787,241,249 PJ/año y el SEP fue de 78,724,689 PJ/año, mostrando así que México podría tener un gran potencial para la producción de bioenergía [Molina-Guerrero *et al.*, 2020]. En este contexto, una amplia variedad de recursos agrícolas explotables se podría utilizar para apoyar este crecimiento sostenible. Sin embargo, la caracterización representa el primer paso hacia una explotación dirigida y competitiva del potencial químico y energético de una biomasa residual.

En otros trabajos, además, se han investigado otros residuos agroindustriales originarios de México, como los residuos del pimiento (variedad amarilla y roja húngara), cáscaras de coco (*Cocos nucifera*), vainas flamígeras (*Delonix regia*), semillas de aguacate (*Persea americana*), palma (*Palma de coroco*), nance (*Byrsonima crassifolia*), mucílago de café (*Coffea arabica*), mucílago de cacao (*Theobroma cacao*), residuos del proceso de tequila (*Agave tequilana*), mazorca de maíz (*Zea mays*) y poda de olivo (*Olea europaea*), de los que se realizó una caracterización química y se evaluaron las aplicaciones potenciales relevantes para la síntesis de biocombustibles y química fina [de Bitonto *et al.*, 2020; Perez-Sarinana *et al.*, 2019; Romero-Cortes *et al.*, 2018; Aleman-Nava *et al.*, 2018; Larragoiti-Kuri *et al.*, 2017; Sánchez *et al.*, 2017].

En un estudio realizado por Cisneros-Lopez y col. (2020) se evaluó la factibilidad económica de una biorrefinería que produciría bioetanol a partir de residuos de la caña de azúcar, en una ubicación junto a la mayor azucarera del estado de Veracruz. Se estimó una capacidad anual de producción de 143 millones de litros de bioetanol y una inversión total para el proyecto de 308 millones de dólares, determinándose que el precio del bioetanol es la variable que más afecta la rentabilidad [Cisneros-Lopez *et al.*, 2020]. A pesar de que la producción de azúcar de caña es una de las principales agroindustrias de México, transmite numerosos impactos socioeconómicos positivos y presenta oportunidades para la diversificación productiva y una mayor rentabilidad y competitividad, se estima que enfrenta desafíos de sostenibilidad debido a la gestión de recursos naturales como el suelo, el agua, los combustibles fósiles y los agroquímicos, así como los impactos de sus emisiones de gases de efecto invernadero.

Sin embargo, a este momento no se ha logrado una evaluación objetiva del grado de sostenibilidad del proceso completo, debido a la falta de marcos metodológicos para integrar indicadores sociales, económicos y ambientales [García-Bustamante *et al.*, 2018].

La prioridad nacional e internacional de abrir el abanico de posibilidades para producir energía y combustibles mediante tecnologías sustentables, limpias y eficientes puede lograrse hoy con las biorrefinerías. A nivel internacional operan más de 20 biorrefinerías, algunas de ellas enfocadas en la producción de bioenergéticos y otras más en la elaboración de bioproductos [Báez, 2017]. Tan solo en abril de 2014, entraron en funcionamiento 25 biorrefinerías en Estados Unidos que trabajan en diferentes escalas, cuatro de ellas están en la fase final, cuatro en demostración y el resto como plantas piloto; la mayoría utiliza maíz como materia prima. Además, en Malasia, se

desarrolla el proyecto de biorrefinería más grande del continente asiático, que ocupará un área de 1,000 hectáreas, en el *Kertih Biopolymer Park*. Este proyecto es una colaboración del gobierno con corporaciones biotecnológicas como *BiotechCorp*, con el fin de atraer a importantes industriales del sector biotecnológico, especialmente de Europa, los Estados Unidos, Corea y Japón [Gómez-Millán, 2015]. En México, en junio de 2017 comenzó a operar en Sinaloa la primera biorrefinería, que usa como materia prima cáscara de camarón y arbusto silvestre, conocido como piñón o jatrofa (*Jatropha curcas*), que ha sido objeto de estudio para la obtención de biocombustibles como el bioetanol y la bioturbosina [Campos, 2017]. Así también, se han propuesto varios proyectos como, por ejemplo, una biorrefinería en el Bordo Poniente para generar biohidrógeno y metano y aprovechar las ocho mil toneladas de basura orgánica que se recolectan en un solo día en la Ciudad de México [Gómez-Millán, 2015].

Mientras que a nivel mundial existe un gran esfuerzo por consolidar los proyectos de biorrefinería, en México, los proyectos existentes no han podido escalar y tampoco son capaces de producir biocombustibles de forma ecológica y sostenible. Faltan propuestas de biorrefinerías que hagan uso de residuos generados a partir de los procesos agrícolas de mayor importancia en el país y que ofrezcan un beneficio socioeconómico real.

Así también se carece de políticas públicas y proyectos gubernamentales que inviertan para la construcción de biorrefinerías mexicanas. Una causa de ello es la falta de información que justifique su pertinencia en el país. Con base en esto, en este trabajo de investigación se tomarán como caso de estudio los residuos generados del proceso semitecnificado de café llevado en la zona suroeste de México, específicamente llevado a cabo por comunidades chiapanecas, para la producción de bioetanol como producto principal.

El café es uno de los cultivos tropicales más importantes a nivel mundial. En México es una especie que se introdujo hace aproximadamente 200 años (finales del siglo XVIII), y desde entonces, se ha convertido en uno de los productos agroforestales más importantes para el sustento de miles de familias [Escamilla *et al.*, 2015]. El café, cuyo nombre científico es *Coffea arabica*, es un arbusto perenne que se desarrolla idealmente en los estratos inferiores de los bosques mesófilos de montaña y las selvas tropicales [Barrera *et al.*, 2000]. En la década pasada, el café generó uno de los ingresos más altos para las economías locales en más de cincuenta países tropicales, precedido solo en algunos casos por el petróleo y el turismo.

Para México, el café es un cultivo estratégico porque lo ubica entre los primeros lugares a nivel mundial como exportador de café orgánico, donde los principales estados productores son: Chiapas (con el 41% del volumen nacional), Guerrero, Oaxaca y Puebla [SADER, 2018]. En estas entidades existe un número significativo de pequeños productores, que a su vez corresponde a grupos indígenas [Santacruz-De León, 2010].

Chiapas constituye uno de los estados en el que mayor cantidad de café es producido por manos indígenas en superficies menores a dos hectáreas [Barrera *et al.*, 2000]. Las comunidades chiapanecas dedicadas a la producción agrícola de este cultivo para consumo humano lo hacen por medio del procesamiento semitecnificado que incluye cinco etapas: cultivo, cosecha, beneficio húmedo, beneficio seco, tostado y molido (Figura 1).

Figura 1. Procesamiento del café desarrollado por la Cooperativa “Productores Orgánicos del Tacaná” en Chiapas



Fuente: Elaboración propia.

En la agroindustria del café solamente se utiliza el 9.5% del peso total del fruto en la preparación de bebidas y el 90.5% son subproductos vertidos en los cuerpos de aguas, contaminándolas y disminuyendo la posibilidad de vida de los ecosistemas. También, se realiza un almacenamiento de residuos en la época de recolección, lo cual propicia la contaminación del suelo. Se calcula que aproximadamente son vertidas en campo abierto dos millones de toneladas de pulpa y 420,000 toneladas de mucílagos del café, que bien podrían incrementar la cadena de valor en los sistemas productivos, mitigando las afectaciones al ambiente [Suarez-Agudelo, 2012]; los mucílagos son una fuente importante de carbohidratos, principalmente galactosa y glucosa, con los cuales se ha podido generar biogás y bioetanol de manera eficiente [Perez-Sarinana et al., 2019].

No obstante, además de considerar el potencial energético con el que cuentan los residuos provenientes del proceso y consumo de café, resulta importante desarrollar modelos que involucren actores, que además de los académicos diseñen estrategias que promuevan el escalamiento y la aplicación de estos procesos. En México, se han implementado modelos de innovación en el ámbito técnico-productivo, incentivados por la incidencia de enfermedades y plagas y la necesidad de incrementar la producción. Las innovaciones se transmiten mediante la capacitación y asistencia técnica hacia los productores.

En este andar, existe un intercambio y transmisión de conocimientos tradicionales, propiciando que los modelos de comercialización también sean tradicionales; por tanto, resulta necesario innovar en función de las necesidades de los consumidores a fin de desarrollar nuevos nichos de mercado de mayor valor [Barrera-Rodríguez *et al.*, 2021].

Pregunta de investigación:

¿Qué tan factible es diseñar un modelo de “biorrefinería sostenible” que permita la transición sociotécnica de la bioeconomía en el proceso productivo de café en la zona sur de Chiapas?

Hipótesis:

El diseño de una “biorrefinería sostenible” que use como materia prima residuos del proceso y consumo de café llevado en comunidades indígenas de la zona sur de Chiapas permitirá la transición sociotécnica hacia modelos de bioeconomía y de innovación que mejoren la calidad de vida de las comunidades cafetaleras.

Justificación:

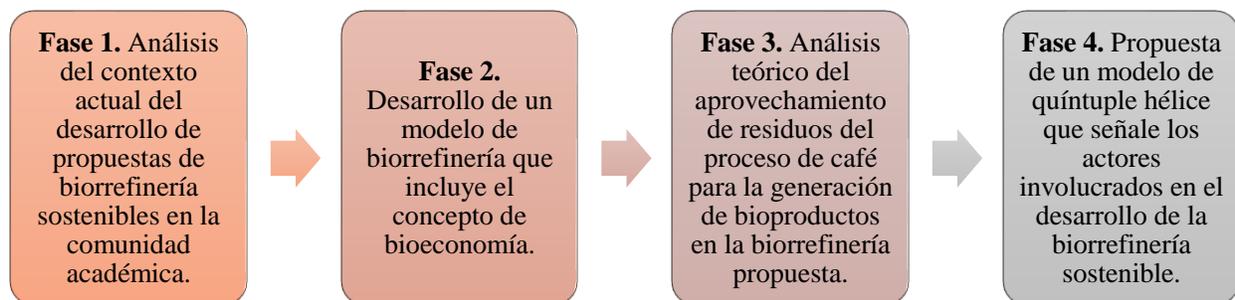
Actualmente, el procesamiento del café desarrollado por comunidades cafetaleras de la zona sur del estado de Chiapas genera una gran cantidad de residuos que no son aprovechados. Se prevé que el aprovechamiento de estos residuos en un esquema de biorrefinería sostenible para la generación de bioproductos podría aportar un mejor escenario al actual, ya que proporcionaría a las comunidades y al estado beneficios socioeconómicos y mitigaría los impactos ambientales ocasionados por su inadecuada disposición.

Objetivo general:

Diseñar un modelo de biorrefinería sostenible para el aprovechamiento de los residuos generados en el proceso y consumo de café llevado a cabo por comunidades indígenas de la zona sur del estado de Chiapas.

Estrategia metodológica:

Figura 2. Diagrama del desarrollo metodológico de la propuesta.



Fuente: Elaboración propia.

Detalle de la Fase 1. Análisis del contexto actual del desarrollo de propuestas de biorrefinería sostenibles en la comunidad Académica. Se realizó un análisis bibliométrico utilizando la base de datos científica de la *Web of Science* y los *softwares* Microsoft Access® y Datawrapper® como herramientas de apoyo. Como descriptores se utilizaron: TS = (biorefinery) AND TS = (coffee waste) AND TS = (sustainability OR sustainable).

Detalle de la Fase 2. Desarrollo de un modelo de biorrefinería que incluye el concepto de bioeconomía. Con el soporte bibliográfico encontrado en la literatura sobre la composición química de los residuos identificados en el proceso del café se propone un modelo de biorrefinería que contempla opciones unitarias para un procesamiento *upstream* (*operaciones de tratamiento de residuos*), un procesamiento *downstream* (*operaciones de purificación del compuesto*) y un sistema de reacción. En la mayoría de los casos se sugiere la transformación de los residuos en biocombustibles o bien su tratamiento para ser incorporados nuevamente en el proceso.

Detalle de la Fase 3. Análisis teórico del aprovechamiento de residuos del proceso de café para la generación de bioproductos en la biorrefinería propuesta. Para esta primera aproximación se propuso el aprovechamiento de los residuos de mucílago, pulpa, cascarilla y borra de café para su transformación a bioetanol. Se propuso el uso de herramientas de modelado y simulación de procesos. Las simulaciones para la predicción de bioetanol se realizaron en una PC equipada con un procesador Intel® Core® i5-2410M y 4 GB de RAM en el *software* MATLAB® R2013b, utilizando el comando *ode23s* de la biblioteca ODE Solver para resolver el conjunto de ecuaciones diferenciales del sistema. Se propuso un modelo matemático basado en el modelo de hidrólisis

enzimática [Kadam *et al.*, 2004] y en el modelo de fermentación alcohólica por *Saccharomyces cerevisiae* bajo los efectos metabólicos de Pasteur [Pérez, 2016]. A continuación, se muestran las ecuaciones que conforman tales modelos, siendo las ecuaciones 1, 2, 3, 4 y 5 las correspondientes a la transformación de celulosa y hemicelulosa en celobiosa, glucosa y xilosa, respectivamente. En tanto, las ecuaciones 7, 8 y 9 señalan lo correspondiente a la generación de biomasa, consumo de sustrato y producción de etanol, respectivamente.

Modelo de hidrólisis enzimática:

$$\frac{dS}{dt} = D_H(Sa - S) - r_1 - r_2 \quad (1)$$

$$\frac{dg_2}{dt} = D_H(0 - g_2) + 1.056r_1 - r_3 \quad (2)$$

$$\frac{dg}{dt} = D_H(0 - g) + 1.111r_2 + 1.053r_3 \quad (3)$$

$$\frac{dh}{dt} = D_H(ha - h) - r_4 \quad (4)$$

$$\frac{dxi}{dt} = D_H(0 - xi) + 1.136r_4 \quad (5)$$

Donde S es celulosa (gL^{-1}), D_H es la tasa de dilución del reactor de hidrólisis (h^{-1}), Sa es la celulosa alimentada al reactor (gL^{-1}), g_2 es la celobiosa (gL^{-1}), g es la glucosa (gL^{-1}), h es la hemicelulosa (gL^{-1}), ha es la hemicelulosa alimentada (gL^{-1}), xi es la xilosa (gL^{-1}) y la r_1 , r_2 , r_3 , y r_4 son las velocidades de reacción bajo el esquema de isoterma de Langmuir ($\text{gL}^{-1}\text{h}^{-1}$).

Modelo de fermentación alcohólica:

$$\frac{dx}{dt} = D_F(0 - X) + \mu_x \quad (6)$$

$$\frac{dgl}{dt} = D_F(g - gl) - r_g \quad (7)$$

$$\frac{de}{dt} = D_F(0 - e) + r_e \quad (8)$$

Donde x es biomasa (gL^{-1}), D_F es la tasa de dilución del reactor de fermentación (h^{-1}), μ_x es la velocidad de reacción de biomasa ($\text{gL}^{-1}\text{h}^{-1}$), g es glucosa que proveniente del reactor de hidrólisis (gL^{-1}), gl es la glucosa residual del reactor de fermentación (gL^{-1}), r_g es la velocidad de reacción de glucosa ($\text{gL}^{-1}\text{h}^{-1}$), e es el etanol (gL^{-1}), y r_e es la velocidad de reacción de etanol ($\text{gL}^{-1}\text{h}^{-1}$).

La identificación paramétrica de aquellos parámetros no disponibles en la literatura se realizó mediante el algoritmo Marquardt en el *software* ModelMaker® 3.0.3. Los datos de alimentación de dicho modelo se tomaron de lo reportado en la Tabla 1. Posterior al desarrollo y programación del modelo, se estimaron los valores de producción de etanol en 24 horas y para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en la producción de bioetanol con tales residuos agroindustriales, se desarrolló una prueba estadística de ANOVA en el *software* R Studio®.

Tabla 1. Contenido de celulosa y azúcares en los diferentes residuos provenientes del proceso de café.

Contenido por cada kilogramo [kg]		
Tipo de residuo [Rodríguez et al., 2010 & Arias et al., 2016]	Celulosa	Azúcares totales
Pulpa de café	0	0.35
Mucilago de café	0	0.48
Cascarilla de café	0.36	0.24
Borra de café	0.34	0.22

Fuente: Elaboración propia.

Detalle de la Fase 4. Propuesta de un modelo de quintuple hélice que señale los actores involucrados en el desarrollo de la biorrefinería sostenible. El modelo de quintuple hélice se puede definir como un modelo teórico de innovación, basado en cinco subsistemas que intercambian conocimiento con el fin de generar y promover un desarrollo sostenible para la sociedad [Carayannis *et al.*, 2012].

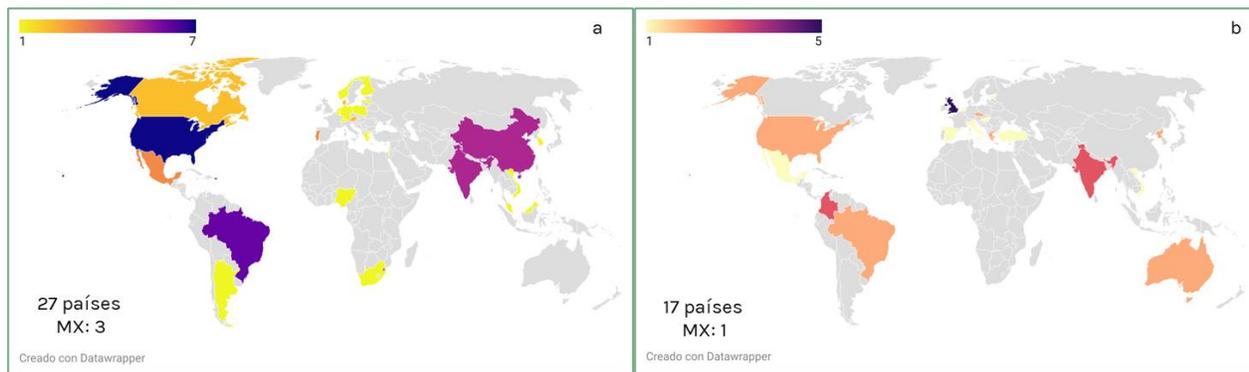
En este modelo se señala que son cinco los actores que se involucran en el desarrollo de una propuesta de investigación: academia, gobierno, empresa, sociedad y medio ambiente. El diseño del modelo de quintuple hélice para este proyecto se desarrollo a partir de una serie de intercambio de saberes entre estos actores, generando con ello alianzas para el fortalecimiento y puesta en marcha del proyecto.

2. Desarrollo del estudio

2.1.Fase 1. Análisis del contexto actual del desarrollo de propuestas de biorrefinería sostenibles en la comunidad académica.

Del 2009 a la fecha, la comunidad académica internacional y nacional ha mostrado interés por el desarrollo de conocimiento aplicado para el diseño de propuestas de biorrefinería. Esto se puede visualizar en las figuras 3, 4 y 5. Por un lado, se observa que existe un total de 27 países, en su mayoría países del continente americano, con 57 registros en la búsqueda bibliométrica para el término de “biorrefinería sostenible”, de los cuales, tres registros corresponden a México. Además, en su mayoría, son producciones científicas de artículos vinculados con temas del área de ciencias exactas que promueven el aprovechamiento de residuos sólidos urbanos y agroindustriales.

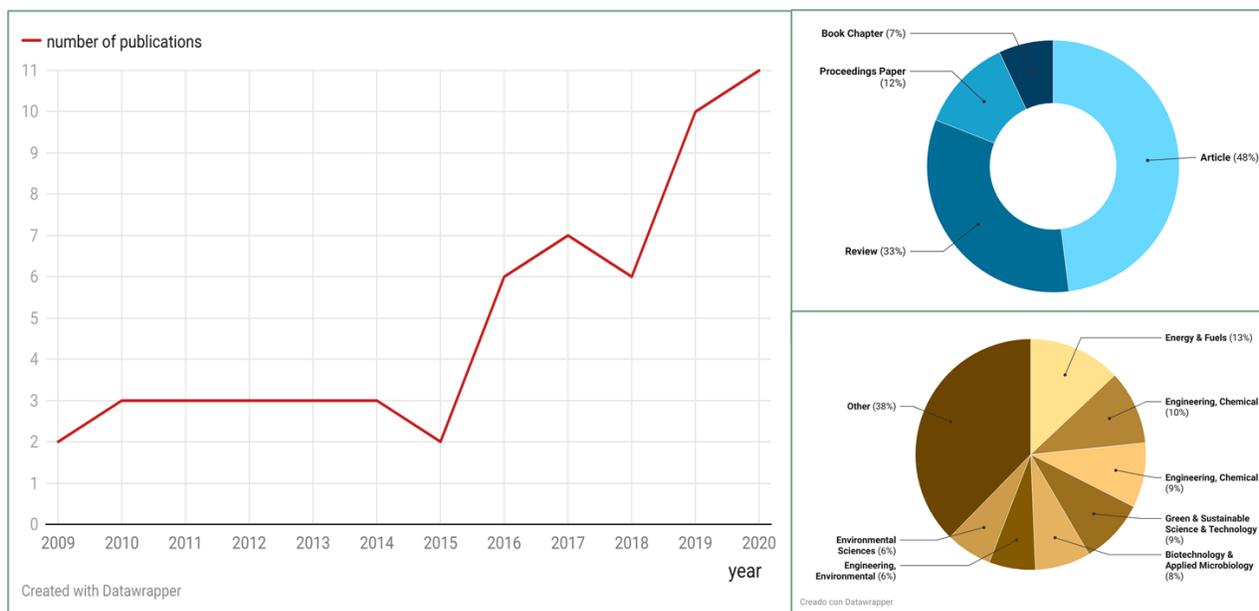
Figura 3. Publicaciones relacionadas con el término a) “biorrefinería sostenible” y b) “biorrefinería sostenible + residuos de café”



Fuente: Elaboración propia usando el software Datawrapper®

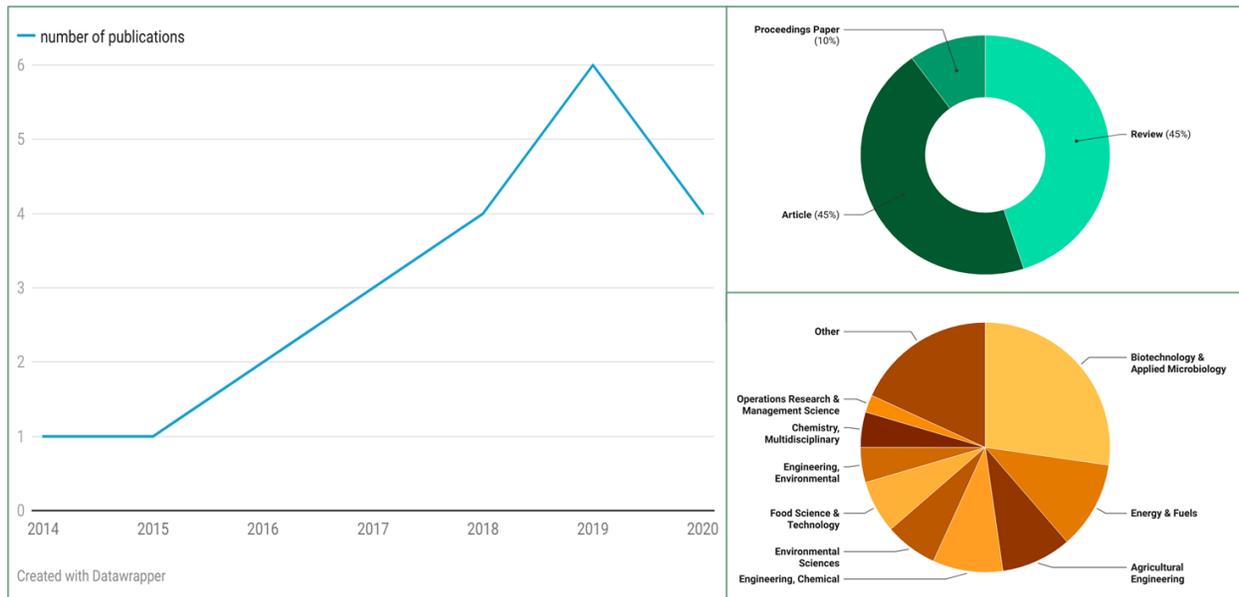
Por otro lado, se observa que existe un total de 17 países, en su mayoría países del continente americano, con 20 registros en la búsqueda bibliométrica para el término de “biorrefinería sostenible a partir de residuos de café”, de los cuales un registro corresponde a México. Además, en su mayoría, son producciones científicas de artículos vinculados con temas del área de ciencias exactas que también promueven el aprovechamiento de residuos a través de propuestas biotecnológicas.

Figura 4. Publicaciones relacionadas con el término “biorrefinería sostenible”.



Fuente: Elaboración propia usando el software Datawrapper®.

Figura 5. Publicaciones relacionadas con el término “biorrefinería sostenible + residuos de café”

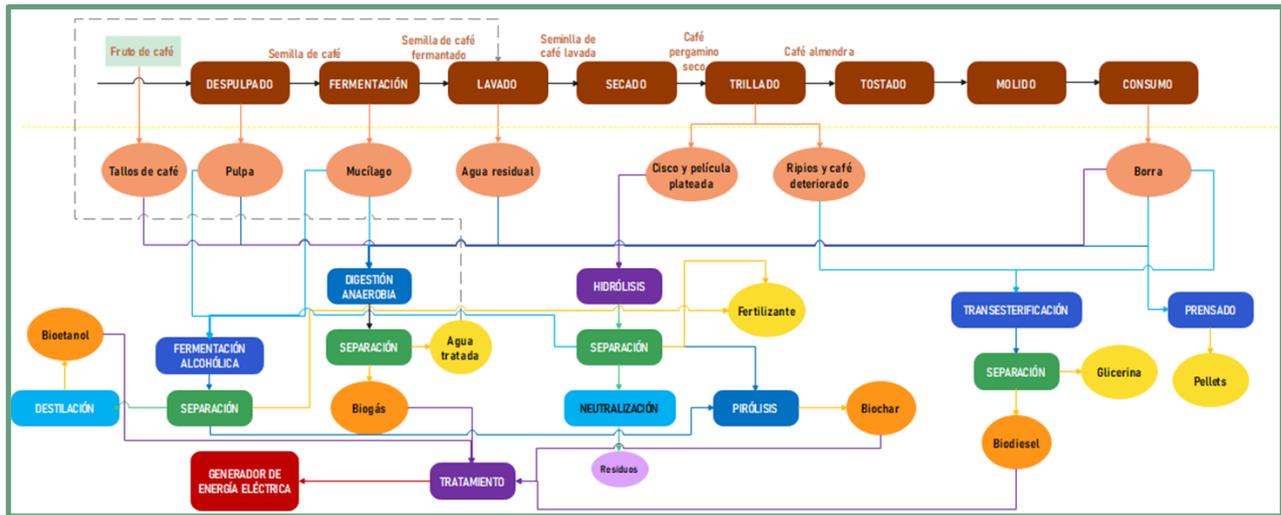


Fuente: Elaboración propia usando el software Datawrapper®.

2.2.Fase 2. Desarrollo de un modelo de biorrefinería que incluye el concepto de bioeconomía.

El modelo de biorrefinería propuesto se desarrolló con la información que se adquirió de la Cooperativa Cafetalera “Productores Orgánicos del Tacaná” así como con la información publicada que se identificó mediante el análisis bibliométrico de la fase 1. Este modelo se muestra en la siguiente figura (figura 6). Se identifican seis residuos provenientes del procesamiento y consumo de café que son: tallos de café, pulpa, mucílago, cisco (cascarilla), rípios y borra de café. Así también se identifica una corriente de agua residual. Según el concepto de bioeconomía y la composición química de estos residuos se prevé que es posible aprovecharlos como materia prima de procesos convencionales para la obtención de biocombustibles como el bioetanol, biodiesel, biogás y biochar. Adicional a estos compuestos de valor energético sería posible la obtención de otros productos como fertilizantes, *pellets*, sustratos para la industria alimentaria y agua tratada que puede ser reutilizable en el proceso.

Figura 6. Diagrama de bloques de una biorrefinería a partir de residuos provenientes del proceso de café.



Fuente: Elaboración propia usando el software EdrawMax®.

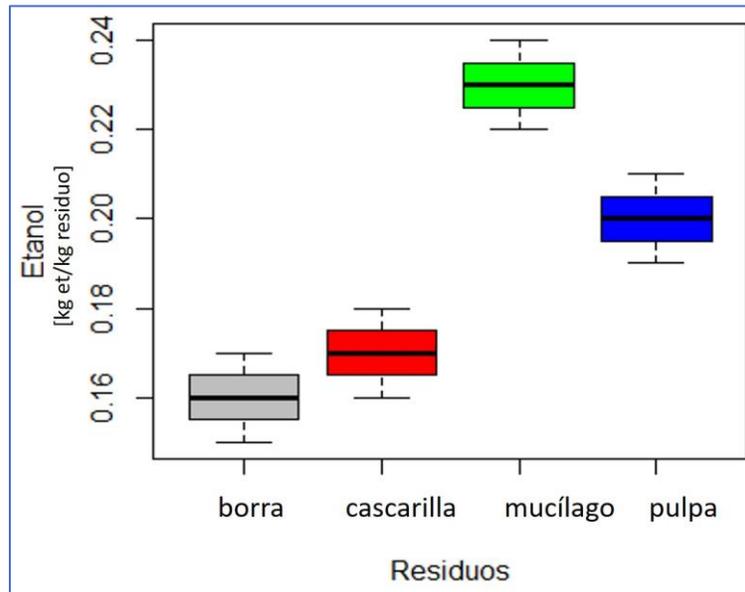
De este modelo de biorrefinería propuesto, hasta el momento se han desarrollado estrategias teóricas para la transformación de pulpa, mucílago, cascarilla y borra de café a bioetanol, utilizando herramientas de intensificación de procesos como el modelado matemático y la simulación, y cuyos resultados se muestran en la siguiente etapa.

2.3.Fase 3. Análisis teórico del aprovechamiento de residuos del proceso de café para la generación de bioproductos en la biorrefinería propuesta.

En la siguiente figura (figura 7), se muestra la primera aproximación de resultados teóricos obtenidos a partir de la integración del modelo matemático de hidrólisis enzimática con el modelo de fermentación alcohólica por *Saccharomyces cerevisiae*, detallados en la Fase 3 de la estrategia metodológica. Se muestra que es posible transformar los residuos de borra, cascarilla, mucílago y pulpa de café en azúcares fermentables para obtener bioetanol.

Los rendimientos reportados en las simulaciones realizadas muestran que es posible producir 0.16, 0.17, 0.23 y 0.2 kg de bioetanol de segunda generación a partir de un kilogramo de residuos de borra, cascarilla, mucílago y pulpa de café, respectivamente, siendo el mucílago de café el residuo que mejor se aprovecha para su transformación en bioetanol.

Figura 7. Producción de etanol a partir de diferentes residuos del proceso de café



Fuente: Elaboración propia usando el software RStudio®

En el análisis de ANOVA realizado en el *software* RStudio® se obtuvo un valor de p de $0.0001057 < F(30)$; por tanto, existe diferencia estadísticamente significativa en la producción de bioetanol según el tipo de residuo empleado.

Figura 8. Intercambio de saberes con la Cooperativa Cafetalera “Productores Orgánicos del Tacaná” en Chiapas.



Fuente: Elaboración propia

2.4.Fase 4. Propuesta de un modelo de quintuple hélice que señale los actores involucrados en el desarrollo de la biorrefinería sostenible.

Para el diseño de la primera propuesta al modelo de la quintuple hélice se realizó una visita a la zona sur de Chiapas con la Cooperativa cafetalera “Productores Orgánicos del Tacaná” (figura 8) en donde se realizó un intercambio de conocimiento y de saberes para comprender el proceso de café e identificar los residuos generados en el mismo. Se establecieron las primeras estrategias, cuyo fundamento en la bioeconomía permitirán no solo mejorar el proceso existente sino marcar la pauta para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Además de la Cooperativa productora se han incluido otros actores que permiten la conformación de la primera propuesta de vinculación bajo el modelo de la quintuple hélice, que se muestra en la figura 9. Se observa los cinco actores siguientes:

Gobierno: Gobierno del Estado de Chiapas y Gobierno del Estado de México

Empresa: Grupo Restaurantero Gigante: TOKS

Sociedad: Cooperativa Cafetalera “Productores Orgánicos del Tacaná”

Medio Ambiente: Incorporación de Acuerdos Internacionales entre países

Academia: Programa de Doctorado Transdisciplinario en Desarrollo Científico y Tecnológico para la Sociedad del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav) y Unidad de Estudios Superiores Tuxtlián de la Universidad Mexiquense del Bicentenario

Figura 8. Actores relacionados con el desarrollo de la propuesta de “biorrefinería sostenible a partir de residuos generados en el proceso y consumo de café” por comunidades indígenas de la zona sur de Chiapas.



Fuente: Elaboración propia usando Power Point®.

3. Conclusiones

El sector cafetalero es uno de los sectores con mayor importancia económica y social en México. Sin embargo, actualmente el proceso de obtención de café, que abarca desde el cultivo hasta la obtención del producto comercializable, carece de alternativas suficientes que permitan a las comunidades cafetaleras aprovechar las grandes cantidades de residuos que se generan, lo cual, de implementarse, implicaría no solo un beneficio ambiental, sino también económico y social.

Con base en los estudios encontrados en literatura, se prevé que esta transformación es factible a través de un esquema de biorrefinería sostenible, que no solo incluya estrategias asociadas directamente al concepto de bioeconomía, sino que además se fundamente en análisis experimentales y herramientas de intensificación de procesos (que incluye al modelado matemático y la simulación de procesos). Es así, como en el primer estudio realizado se encontró que es posible obtener bioetanol a partir de los residuos de pulpa, mucílago, cascarilla y borra del proceso del café, obteniendo mejores rendimientos en el aprovechamiento del mucílago para este caso y ampliando el campo de acción de los otros residuos en otros productos.

El estudio bibliométrico desarrollado ha permitido visualizar el panorama actual alrededor de esta propuesta entre la comunidad académica; la mayoría de la producción científica encontrada incluye estrategias de mejora desde el enfoque económico y ambiental. La deficiencia de modelos que contemplen estrategias que consideren el factor y perspectiva social, limita la transición sociotécnica hacia el desarrollo de tecnologías sostenibles que faculten la implementación de la bioeconomía en procesos que han sido de gran importancia nacional, como lo es el café.

Finalmente, se ha encontrado que el desarrollo de estas propuestas no puede dirigirse sobre un mismo eje, sino que requieren la participación de actores que se fundamenten en el intercambio de conocimiento y saberes para la mejora continua de estos procesos.

4. Agradecimientos

A Restaurantes Toks, a la Cooperativa cafetalera “Productores Orgánicos del Tacaná”, a la Universidad Mexiquense del Bicentenario y al Cinvestav por el apoyo otorgado para el desarrollo de esta investigación.

5. Referencias

- Alemán-Nava, G. S., Gatti, I. A., Parra-Saldivar, R., Dallemand, J.-F., Rittmann, B. E., & Iqbal, H. M. N. (2018). Biotechnological revalorization of Tequila waste and by-product streams for cleaner production – A review from bio-refinery perspective. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3713-3720. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.134>
- Arias, RA., Meneses, JD. (2016). Caracterización fisicoquímica de residuos agroindustriales como materia prima potencial para la obtención de bioetanol. Tesis de Licenciatura. UNAN-Managua.
- Báez, Carmen (2017). Retos y oportunidades de la biorrefinería en México. Consultado de <http://www.cienciamx.com/index.php/tecnologia/energia/15937-retos-oportunidades-biorrefineria-mexico>
- Barrera, J. F., y M., Parra. (2000). El café en Chiapas y la investigación en ECOSUR. Tapachula, Chiapas.
- Barrera-Rodríguez Ariadna; Ramírez-García Guillermo; Cuevas-Reyes Venancio; Espejel-García Anastasio (2021). Modelos de innovación en la producción de café en la Sierra Norte de Puebla-México. *Revista de Ciencias Sociales*. <https://doi.org/10.31876/rsc.v27i.36530>
- Byun, J., & Han, J. (2020). Sustainable development of biorefineries: integrated assessment method for co-production pathways. *Energy & Environmental Science*, 13(8), 2233-2242. <https://doi.org/10.1039/d0ee00812e>

- Campos (2017). La primera biorrefinería en México. Consultado de <https://www.xataka.com.mx/investigacion/investigadores-de-sinaloa-podrian-montar-pronto-una-nueva-biorrefineria-en-mexico-con-el-apoyo-de-harvard>
- Carayannis, E. G., Thorsten, D. B., & Campbell, D. F. (2012). The Quintuple Helix innovation model: global warming as a challenge and driver for innovation. *Journal Innovation and Entrepreneurship*, 1(2).
- Cisneros-López, Miguel A., García-Salazar, José A., Mora-Flores, José S., Martínez-Damian, Miguel A. (2020). Economic evaluation with real options: second generation bioethanol biorefinery in Veracruz, Mexico. *Revista de agricultura, sociedad y desarrollo ASyD* 17: 397-413.
- de Jong, E., Jungmeier, G. (2015). Biorefinery Concepts in Comparison to Petrochemical Refineries. *Ind. Biorefineries White Biotechnol.* Elsevier. pp. 3–33. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63453-5.00001-X>
- di Bitonto, L., Reynel-Ávila, H. E., Mendoza-Castillo, D. I., Bonilla-Petriciolet, A., & Pastore, C. (2020). Residual Mexican biomasses for bioenergy and fine chemical production: correlation between composition and specific applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00616-1>
- Escamilla E., Ruiz R., O., Zamarripa C., A., y González H., V. A. (2015). Calidad en variedades de café orgánico en tres regiones de México. *Revista de Geografía Agrícola*, (55),45-55. Consulta 2 de noviembre de 2020. ISSN: 0186-4394. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=757/75749286004>
- García-Bustamante, C. A., Aguilar-Rivera, N., Zepeda-Pirrón, M., & Armendáriz-Arnez, C. (2018). Development of indicators for the sustainability of the sugar industry. *Environmental & Socio-economic Studies*, 6(4), 22-38. <https://doi.org/10.2478/environ-2018-0025>
- Gómez Millán, Gerardo. (2015). Desarrollo de biorrefinerías en el mundo (Biorefineries development: a worldwide review). *Ciencia y desarrollo*.
- IEA (2021). Reporte de la International Energy Agency. Consultado de: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
- Julio, R., Albet, J., Vialle, C., Vaca-Garcia, C., & Sablayrolles, C. (2017). Sustainable design of biorefinery processes: existing practices and new methodology. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 11(2), 373-395. <https://doi.org/10.1002/bbb.1749>
- Kumar, VS., Fenila F., Shastri Y. (2017) Sensitivity analysis and stochastic modelling of lignocellulosic feedstock pretreatment and hydrolysis. *Computers and Chemical Engineering*, 106:23–39
- Larragoiti-Kuri, J., Rivera-Toledo, M., Cocho-Roldán, J., Maldonado-Ruiz Esparza, K., Le Borgne, S., & Pedraza-Segura, L. (2017). Convenient Product Distribution for a Lignocellulosic Biorefinery: Optimization through Sustainable Indexes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56(40), 11388-11397. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b02101>
- Lopez-Hidalgo, A. M., Magaña, G., Rodriguez, F., De Leon-Rodriguez, A., & Sanchez, A. (2021). Co-production of ethanol-hydrogen by genetically engineered *Escherichia coli* in sustainable biorefineries for lignocellulosic ethanol production. *Chemical Engineering Journal*, 406, 126829. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126829>
- Meramo-Hurtado, S. I., Sanchez-Tuiran, E., Ponce-Ortega, J. M., El-Halwagi, M. M., & Ojeda-Delgado, K. A. (2020). Synthesis and Sustainability Evaluation of a Lignocellulosic Multifedstock Biorefinery Considering Technical Performance Indicators. *ACS Omega*, 5(16), 9259-9275. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00114>
- Molina-Guerrero, C. E., Sanchez, A., & Vázquez-Núñez, E. (2020). Energy potential of agricultural residues generated in Mexico and their use for butanol and electricity production under a biorefinery configuration. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(23), 28607-28622. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08430-y>
- Nájera-García, A., López-Hernández, R., Lucho-Constantino, C., & Vázquez-Rodríguez, G. (2018). Towards Drylands Biorefineries: Valorisation of Forage *Opuntia* for the Production of Edible Coatings. *Sustainability*, 10(6), 1878. <https://doi.org/10.3390/su10061878>
- Nawaz, M. Z., Bilal, M., Tariq, A., Iqbal, H. M. N., Alghamdi, H. A., & Cheng, H. (2020). Bio-purification of sugar industry wastewater and production of high-value industrial products with a zero-waste concept. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-18. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1802696>
- Pérez, L.M. (2016). Análisis teórico-experimental de la ruta metabólica fermentativa de *Saccharomyces cerevisiae* en la obtención de etanol. Tesis de Maestría, Departamento de Biotecnología, CINVESTAV.
- Pérez-Sariñana, B. Y., Díaz-González, A., León Rodríguez, A., Saldaña-Trinidad, S., Pérez-Luna, Y. C., Guerrero Fajardo, C. A., & Sebastián, P. J. (2019). Methane production from coffee crop residues. *Romanian Biotechnological Letters*, 24(4), 669-675. <https://doi.org/10.25083/rbl/24.4/669.675>

- Romero-Cortes, T., Cuervo-Parra, J. A., José Robles-Olvera, V., Rangel Cortes, E., & López Pérez, P. A. (2018). Experimental and Kinetic Production of Ethanol Using Mucilage Juice Residues from Cocoa Processing. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 16(11), 1-16. <https://doi.org/10.1515/ijcre-2017-0262>
- Rosero-Chasoy, G., Rodríguez-Jasso, R. M., Aguilar, C. N., Buitrón, G., Chairez, I., & Ruiz, H. A. (2021). Microbial co-culturing strategies for the production high value compounds, a reliable framework towards sustainable biorefinery implementation – an overview. *Bioresource Technology*, 321, 124458. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124458>
- Sacramento-Rivero, J. C.; Romero, G.; Cortés-Rodríguez, E.; Pech, E.; Blanco-Rosete, S. (2010). Diagnóstico del desarrollo de biorrefinerías en México. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 9, núm. 3, 2010, pp. 261-283
- Sacramento-Rivero, J. C., Navarro-Pineda, F., & Vilchiz-Bravo, L. E. (2016). Evaluating the sustainability of biorefineries at the conceptual design stage. *Chemical Engineering Research and Design*, 107, 167-180. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.10.017>
- SADER (2018). Producción de café en México. Consultado de <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/mexico-onceavo-productor-mundial-de-cafe>
- Sanchez, A., Acosta, GR (2017). Contribution to the sustainability of the cogeneration and compression stages of Co2 in lignocellulosic biorefineries for the production of bioethanol. 25a Conferencia Internacional Europea de Biomasa. Estocolmo, Suiza. 1226-1229
- Santacruz–De León, E., Pérez, D., y Palacio, H. (2010). Competitividad de las organizaciones de productores de café orgánico del Sonosuco, Chiapas; un análisis a través de las actitudes de sus dirigentes. *Observatorio Iberoamericano del Desarrollo Local y la Economía Social*, (9).
- Santangeli, A., Toivonen, T., Pouzols, F.M., Pogson, M., Hastings, A., Smith, P., Moilanen, A. (2016). Global change synergies and trade-offs between renewable energy and biodiversity. *GCB Bioenergy*. 8, 941–951, <https://doi.org/10.1111/gcbb.12299>
- Suarez-Agudelo, JM. (2012). Aprovechamiento de los residuos sólidos provenientes del Beneficio del café, en el municipio de Betania Antioquia: usos y aplicaciones. Tesis de especialización en gestión integral de residuos sólidos y peligrosos. Facultad de ingenierías. Colombia.
- Sanchez, A., Ayala, O. R., Hernandez-Sanchez, P., Valdez-Vazquez, I., & de León-Rodríguez, A. (2020). An environment-economic analysis of hydrogen production using advanced biorefineries and its comparison with conventional technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(51), 27994-28006. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.135>
- Rodríguez, N., Zambrano D. (2010). Los subproductos de café: fuente de energía renovable. *Cenicafé*, 393.