

La economía circular

como instrumento transformador
para una sociedad más justa,
inclusiva y pacífica

Kelly Joel Gurubel Tun
Alberto Coronado Mendoza

Coordinadores



La economía circular

como instrumento transformador
para una sociedad más justa,
inclusiva y pacífica



La economía circular

**como instrumento transformador
para una sociedad más justa,
inclusiva y pacífica**

Kelly Joel Gurubel Tun
Alberto Coronado Mendoza
Coordinadores



La economía circular como instrumento transformador para una sociedad más justa, inclusiva y pacífica. Coordinadores: Kelly Joel Gurubel Tun y Alberto Coronado Mendoza — *Guadalajara, México. 2025.*

Publicación electrónica digital: descarga y online; detalle de formato: EPUB.

Primera edición.

D. R. © copyright 2025. Kelly Joel Gurubel Tun y Alberto Coronado Mendoza.

ISBN: **979-13-87837-60-0**

DOI: <https://doi.org/10.61728/AE20251598>



La presente obra fue dictaminada bajo el sistema de doble ciego y cuenta con el aval de los dictámenes de pares académicos.

Edición y corrección: **Astra ediciones**



Todos los contenidos de esta obra se comparten bajo la licencia Creative Commons Atribución/Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (**CC BY-NC-SA 4.0**). Esto implica que no está autorizado el uso comercial de la obra original ni de las eventuales obras derivadas, las cuales deberán distribuirse bajo la misma licencia que rige la obra original. No obstante, se permite a terceros compartir el contenido siempre y cuando se reconozca debidamente la autoría y la publicación original en esta editorial.

HECHO EN MÉXICO | MADE IN MEXICO

Contenido

Presentación	9
--------------------	---

Capítulo 1

Desafíos para la adopción de tecnologías de cocción limpia en las zonas rurales de Perú	13
<i>Fanny Mabel Carhuancho León</i>	
<i>Judith Ramírez - Candia</i>	

Capítulo 2

Economía circular del bagazo de café: emprendimiento-caso práctico	37
<i>Fernando Espinola-Portilla</i>	
<i>Déborah L. Villaseñor-Basulto</i>	

Capítulo 3

Economía circular de residuos electrónicos en México: Alianzas y regulaciones para la sostenibilidad ambiental.....	57
<i>Hermes Ulises Ramírez Sánchez</i>	
<i>Aida Lucia Fajardo Montiel</i>	
<i>Samuel Horacio Cantú Munguía</i>	

Capítulo 4

Economía circular y la gestión del agua en México	73
<i>Lourdes Graciela Cabrera Chavarría</i>	
<i>Aída Lucía Fajardo Montiel</i>	
<i>Samuel Horacio Cantú Munguía</i>	

Capítulo 5

Transformación sostenible de alimentos: El secado solar como estrategia para una economía circular.....	85
<i>Roxana Berenice Recio Colmenares</i>	
<i>Carolina Livier Recio Colmenares</i>	
<i>César Alejandro García García</i>	

Capítulo 6

La economía circular del agua en la zona metropolitana de Guadalajara	113
<i>Hermes Ulises Ramirez Sanchez</i>	
<i>Aída Lucía Fajardo Montiel</i>	
<i>Samuel Horacio Cantú Munguía</i>	

Capítulo 7

Monitoreo y control de un reactor batch para la producción de biogás mediante la fermentación anaerobia de sustratos orgánicos de segunda generación, una perspectiva a la economía circular..	133
<i>Luis Abraham Díaz Alcalá</i>	
<i>Kelly Joel Gurubel Tun</i>	

Capítulo 8

Sistemas productivos sostenibles a nivel territorial mediante la contribución local. Estudio de caso: Unidad productiva Bio Vida	155
<i>Zulay Maribel Cueva Jiménez</i>	
<i>Patricia Marlene Aguirre Mejía</i>	
<i>Belkis Sulbarán Rangel</i>	

Capítulo 9

Uso de las microalgas <i>Scenedesmus</i> para la producción de biodiesel bajo un enfoque de economía circular	171
<i>Tania Yamel Navarro Díaz</i>	
<i>Belén Esmeralda Vázquez González</i>	
<i>Jesús Barrera Rojas</i>	
<i>Belkis Sulbarán Rangel</i>	
Sobre los autores	197

Presentación

En las últimas décadas, el mundo se enfrenta a desafíos ambientales, sociales y económicos que ponen en evidencia la urgencia de replantear nuestros modelos de producción, consumo y desarrollo. El agotamiento de los recursos naturales, la contaminación del agua, la generación excesiva de residuos y las desigualdades en el acceso a la energía y al bienestar social son señales claras de que el modelo lineal ha llegado a su límite.

En este contexto, la economía circular emerge como un instrumento transformador, una alternativa que busca cerrar los ciclos de los materiales, aprovechar los recursos de manera eficiente y regenerar los sistemas naturales. Pero más allá de su dimensión técnica, la economía circular también representa una oportunidad para construir una sociedad más justa, inclusiva y pacífica, donde el bienestar colectivo, la equidad social y el respeto al medioambiente sean ejes centrales del desarrollo.

El libro *La economía circular como instrumento transformador para una sociedad más justa, inclusiva y pacífica* es el resultado del trabajo colaborativo de investigadores e investigadoras interdisciplinarios que participaron en el Seminario Anual de Agua, Energía y Medio Ambiente por Cultura de Paz 2024, organizado por el Instituto de Energías Renovables del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. A través de experiencias, estudios de caso y reflexiones aplicadas, esta obra busca difundir el conocimiento científico y tecnológico y promover la conciencia social sobre la sostenibilidad, el aprovechamiento responsable de los recursos naturales, la innovación energética y la gestión integral del agua.

Los capítulos que integran esta publicación abordan la economía circular desde múltiples perspectivas y sectores estratégicos. En ellos se presentan casos sobre la adopción de tecnologías limpias en zonas rurales del Perú, el emprendimiento circular en torno al bagazo de café, las alianzas para el manejo sostenible de residuos electrónicos en México y los retos en el uso y gestión circular del agua en diferentes contex-

tos. Asimismo, se exploran estrategias de transformación sostenible de alimentos, el monitoreo de bioprocesos para la generación de energía a partir de residuos orgánicos, la producción de biodiésel con microalgas y la creación de sistemas productivos locales sostenibles.

En las últimas décadas, el mundo se enfrenta a desafíos ambientales, sociales y económicos que ponen en evidencia la urgencia de replantear nuestros modelos de producción, consumo y desarrollo. El agotamiento de los recursos naturales, la contaminación del agua, la generación excesiva de residuos y las desigualdades en el acceso a la energía y al bienestar social son señales claras de que el modelo lineal ha llegado a su límite.

En este contexto, la economía circular emerge como un instrumento transformador, una alternativa que busca cerrar los ciclos de los materiales, aprovechar los recursos de manera eficiente y regenerar los sistemas naturales. Pero más allá de su dimensión técnica, la economía circular también representa una oportunidad para construir una sociedad más justa, inclusiva y pacífica, donde el bienestar colectivo, la equidad social y el respeto al medioambiente sean ejes centrales del desarrollo.

El libro *“La economía circular como instrumento transformador para una sociedad más justa, inclusiva y pacífica”* es el resultado del trabajo colaborativo de investigadores e investigadoras interdisciplinarios que participaron en el Seminario Anual de Agua, Energía y Medio Ambiente por Cultura de Paz 2024, organizado por el Instituto de Energías Renovables del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. A través de experiencias, estudios de caso y reflexiones aplicadas, esta obra busca difundir el conocimiento científico y tecnológico y promover la conciencia social sobre la sostenibilidad, el aprovechamiento responsable de los recursos naturales, la innovación energética y la gestión integral del agua.

Los capítulos que integran esta publicación abordan la economía circular desde múltiples perspectivas y sectores estratégicos. En ellos se presentan casos sobre la adopción de tecnologías limpias en zonas rurales del Perú, el emprendimiento circular en torno al bagazo de café, las alianzas para el manejo sostenible de residuos electrónicos en México y los retos en el uso y gestión circular del agua en diferentes contextos. Asimismo, se exploran estrategias de transformación sostenible de

alimentos, el monitoreo de bioprocesos para la generación de energía a partir de residuos orgánicos, la producción de biodiésel con microalgas y la creación de sistemas productivos locales sostenibles.

Cada uno de estos aportes demuestra que la economía circular no solo es una política ambiental o una herramienta económica, sino una visión integradora del futuro, en la que la ciencia, la tecnología y la participación ciudadana convergen para transformar los territorios y fortalecer la cultura de paz.

Este libro invita a la sociedad civil, los tomadores de decisiones, las empresas, las comunidades rurales y urbanas y las instituciones educativas a repensar el papel que desempeñan en la transición hacia un modelo de desarrollo sostenible. Porque solo a través de la colaboración, la innovación y el compromiso ético con nuestro entorno podremos construir un futuro más equitativo, resiliente y sostenible para todos.

Capítulo 1

Desafíos para la adopción de tecnologías de cocción limpia en las zonas rurales de Perú

Fanny Mabel Carhuancha León¹

Judith Ramírez - Candia²

<https://doi.org/10.61728/AE20251614>



¹ Doctora en Tecnología Agroambiental para una Agricultura Sostenibles. E.T.S. de Ingeniería agronómica, alimentaria y de Biosistemas. Universidad Politécnica de Madrid, España. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4910-1745>

² Doctora en Tecnología Agroambiental para una Agricultura Sostenibles. E.T.S. de Ingeniería agronómica, alimentaria y de Biosistemas. Universidad Politécnica de Madrid, España. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1521-164X>

Resumen

En las zonas rurales del Perú, la adopción de tecnologías de cocción presenta múltiples desafíos. Diversos emprendimientos se han llevado a cabo en el país para promover una transición a formas más limpias de energía para cocinar. Estos emprendimientos incluyen la promoción de cocinas mejoradas de biomasa, el uso de combustible como el gas licuado de petróleo y gas natural. Estas alternativas ofrecen ventajas significativas sobre la gestión de los recursos naturales, una mejor y eficiente forma de cocción, reducen los contaminantes intradomiciliarios y minimizan efectos adversos en la salud de las comunidades. Sin embargo, la adopción de estas nuevas formas tecnológicas se ve obstaculizada por una serie de factores socioculturales que han sido pasados por alto en los proyectos nacionales. Estos factores incluyen una amplia oferta de combustibles y tecnologías para cocción, cuya distribución y disponibilidad es heterogénea en el país, una limitada infraestructura y complicaciones en la distribución de los combustibles, precios diferenciados debido a dificultades logísticas, baja disponibilidad económica de las comunidades rurales para acceder a cocinas más eficientes y de alta calidad, el limitado conocimiento y recursos para llevar a cabo procesos de investigación y desarrollo de nuevas tecnologías por parte de las pequeñas y medianas empresas, limitado conocimiento de aspectos socioculturales y hábitos de la población, entre otros. En este documento, exploraremos los principales desafíos que enfrentan las comunidades rurales del Perú para adoptar estas tecnologías y discutiremos posibles soluciones y estrategias para superarlos.

1. Introducción

En el Perú, cerca de 1 800 000 familias (20.3 % de la población) dependen de la biomasa tradicional (leña, carbón, bosta, estiércol o residuos agrícolas) para cocinar sus alimentos a fuego abierto dentro de su vivienda

(Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2019). En su mayor parte, se trata de familias que viven en comunidades de ingresos medianos y bajos. Se observa una gran desigualdad en el acceso de combustibles menos contaminantes y tecnologías ineficientes para cocinar entre las zonas urbanas y rurales. En 2017, solo el 7.1 % de la población que vive en zonas urbanas cocinaba con combustibles contaminantes, mientras que el 70.8 % corresponde a la población rural (INEI, 2019).

El uso de biomasa como combustible en cocinas tradicionales afecta negativamente su salud debido a que la combustión de la biomasa emite monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (NO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), material particulado (PM), hidrocarburos policíclicos aromáticos (HAPs) y contaminantes orgánicos volátiles (COV) (International Energy Agency [IEA] et al., 2023). Las partículas en suspensión y otros contaminantes de la combustión de la biomasa inflaman las vías respiratorias y los pulmones; además, dificultan la respuesta inmunitaria y disminuyen la capacidad de oxigenación de la sangre (World Health Organization [WHO], 2022). Mientras que algunos estudios señalan que el consumo de este tipo de combustibles puede tener un impacto adverso para el medio ambiente por la deforestación, la erosión, la modificación de cuencas hidrográficas y pérdidas de biomasa que regeneran el suelo por la extracción indiscriminada de árboles para consumir leña.

Además, existen aspectos sociales como la inversión del tiempo empleado por mujeres y niños en recolectar combustibles y preparar los alimentos en cocinas poco eficientes y contaminantes, que limita la posibilidad de realizar actividades productivas, de estudio y de entretenimiento, todas ellas fundamentales para la salud y el desarrollo (WHO, 2022). En el país, existe una amplia evidencia que vincula el consumo de combustibles de biomasa con efectos en la salud y la calidad de vida. Sin embargo, aún no se han establecido de manera definitiva los alcances del impacto ambiental del uso de estos combustibles. Esta realidad resalta la necesidad indispensable de llevar a cabo estudios más exhaustivos y profundos para llenar este y otros vacíos de conocimiento relacionados con la cocción limpia.

Hasta la fecha, la implementación de soluciones encaminadas a lograr el acceso universal a combustibles y tecnologías limpias para la cocción

ha priorizado la dimensión tecnológica y el análisis de sus atributos técnicos, dejando en segundo plano aspectos de índole social como las costumbres y hábitos de los usuarios (Energy Sector Management Assistance Program, 2020). Por lo tanto, es esencial generar una base sólida de evidencia que abarque datos profundos y métricas referentes a estos aspectos, así como un análisis del contexto general de la cocina limpia. Este enfoque cobra particular importancia en países en desarrollo, ya que puede servir como fundamento para la formulación de políticas y programas públicos (CCA, 2020; Health and Energy Platform of Action (HEPA), s. f.). En realidad, sin un entendimiento integral del entorno local de la cocina, la adopción y el uso sostenible de tecnologías de estufas y soluciones modernas de combustible seguirán siendo restringidos.

Desde los años ochenta, diversos programas gubernamentales y no gubernamentales han tomado medidas para hacer frente a la problemática del acceso a la cocción limpia. Inicialmente, estos proyectos surgieron como respuesta a la necesidad de mitigar los efectos de la deforestación causada por el uso de biomasa primaria para cocinar y calentar. Con el tiempo, el enfoque se amplió para abordar la contaminación del aire en espacios interiores, mejorar las condiciones de vida de la población y, más recientemente, acelerar la transición hacia tecnologías y combustibles modernos para la cocción, en línea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible número 7 y como parte de las medidas para mitigar los efectos del cambio climático de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC) del Perú. Para lograr estos objetivos, se han implementado estrategias como la distribución masiva de kits de cocinas metálicas, vales para la adquisición de cilindros de gas licuado de petróleo (GLP), subsidios para conectar viviendas urbanas a la red de gas natural (GN) y la entrega de cocinas mejoradas en áreas rurales con difícil acceso a mercados de GLP. Sin embargo, estos emprendimientos no han sido suficientes para cerrar la brecha de acceso existente y tampoco para lograr una migración efectiva a tecnologías y combustibles para la cocción limpia, especialmente en las áreas rurales.

En este contexto, el objetivo del estudio es analizar los factores que influyen en los desafíos de adopción de tecnologías de cocción de limpia en las comunidades rurales de Perú. Este capítulo se basa en una

amplia investigación y análisis de los resultados y cuellos de botella de los diferentes programas, proyectos y políticas sobre el desarrollo e implementación de tecnologías renovables para una cocción más limpia en las zonas rurales de Perú. Se estructura en capítulos temáticos que abarcarán la situación actual del acceso a energía para cocinar, las fuentes y tecnologías para cocción en zonas rurales, identificación de las barreras socioculturales que dificultan la adopción de tecnologías renovables en zonas rurales, estudio de caso sobre la experiencia de adopción de tecnologías renovables. A partir de este análisis se busca contribuir al conocimiento existente sobre los desafíos de adopción de tecnologías en zonas rurales para promover iniciativas y mejoras que garanticen la inclusión e interacción de las tecnologías renovables y aspectos socioculturales y económicos de las zonas rurales a los responsables de la toma de decisiones, a los investigadores y a los actores del desarrollo.

2. Contexto energético en las zonas rurales del Perú

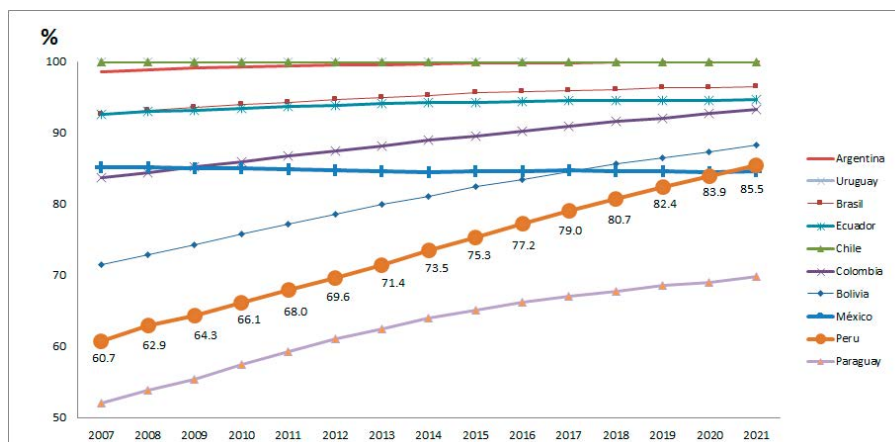
Perú posee una extensión de 1.285 millones km², delimitados en 3 regiones naturales: costa, sierra y selva. Además, está distribuido políticamente en 24 departamentos, en donde residen cerca de 33.7 millones de personas en el 2022, con una proyección de crecimiento de 39 millones al 2050. Del total de habitantes, el 59 % vive en departamentos de la costa, mientras que el 26.8 % y el 14.2 % en la sierra y selva, respectivamente. Esta población posee patrones propios de asentamiento y dispersión. Considerando que en el Perú se denomina área rural a aquellos poblados con menos de 2000 habitantes y con viviendas dispersas, el último dato censal del año 2017, señala que el 79.3 % de la población peruana habitaba en centros poblados urbanos y el 20.7 % restante en centros poblados rurales (INEI, 2018).

Las áreas rurales del Perú poseen un paisaje diverso, que va desde la costa hasta la selva amazónica y la zona andina. Como en la mayoría de los países de Latinoamérica (LA), la vida en las zonas rurales está ligada a la tierra y la naturaleza; albergan una gran diversidad natural, tradiciones y costumbres. En estos lugares, las actividades agropecuarias ofrecen el sustento a la población. Además, poseen recursos naturales útiles para

la industria extractiva. Sin embargo, las zonas rurales también enfrentan desafíos significativos, como el acceso limitado a servicios básicos, la falta de infraestructura, la pobreza y la inequidad social.

Desde el aspecto energético, aunque el país cuenta con una amplia diversidad de recursos naturales, la disponibilidad y acceso a energía eléctrica y combustibles para cocción modernos es limitado. Por ejemplo, la cobertura actual de energía eléctrica es cercana al 95.9 %, sostenida principalmente en una matriz de generación hídrica y térmica a GN. Sin embargo, este porcentaje es bajo con respecto a sus pares latinoamericanos, en donde la mayoría de los países ha logrado el total de la cobertura al 2017. Respecto al acceso a combustibles y tecnologías modernas para cocinar, en la Figura 1 se muestra la evolución del porcentaje de población con acceso en el periodo 2007-2021. A lo largo de este periodo se aprecia un crecimiento sostenido en la mayoría de los países de LA. El crecimiento promedio anual para Perú fue de 1.7 %, pasando de 60.7 a 85.5 % en el último año de registro. En este periodo, solo 2 de los 10 países mostrados alcanzaron el acceso total a combustibles limpios. Sin embargo, al igual que el acceso a energía eléctrica, este crecimiento está por debajo de la mayoría de los países de LA, con excepción de Paraguay y, en los últimos años, de México.

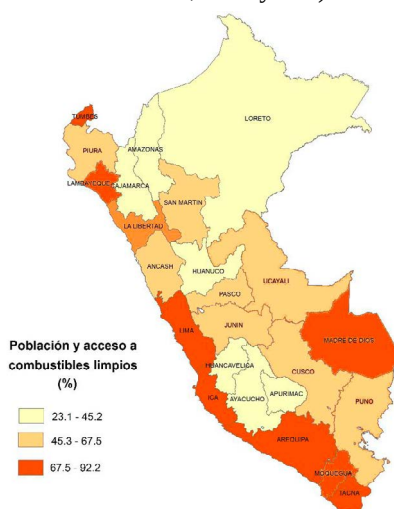
Figura 1. Evolución del porcentaje de la población con acceso a combustibles y tecnologías modernas para cocinar en el Perú y en países de América Latina, durante el periodo 2007-2021 (% de población).



Fuente: Elaborado a partir de World Bank (2023)

Por otro lado, también existe disparidad en el acceso a los combustibles en los departamentos que conforman el país. En la Figura 2 se muestra el porcentaje de la población con acceso a combustibles y tecnologías de cocinas limpias para el año 2021. Se puede observar que 16 de los 24 departamentos del país están por debajo de la media nacional de acceso de 72.1 %.

Figura 2. Distribución del acceso a combustibles y tecnologías modernas para cocinar en el Perú (Incluye cocción a Electricidad, GLP y GN).



Fuente: Elaborado a partir de INEI (2023b)

El menor acceso lo tienen los departamentos situados en el centro, sur y norte, zona sierra del país. Una situación similar ocurre en la parte oeste, zona selva país. Tanto la sierra como la selva comparten características similares: de difícil geografía, limitada infraestructura vial, poblaciones asentadas de forma dispersa, restringido acceso a servicios básicos y niveles más bajos de ingresos. Esto contrasta con los departamentos situados al este, zona costera y más desarrollada del país, en donde la mayoría de los departamentos superan la media nacional de acceso. Además de la distribución desigual del acceso a combustibles a nivel departamental, también existe una distribución diferenciada entre las áreas urbanas y rurales. Por ejemplo, en el periodo 2007-2021, aunque existe un incre-

mento en el acceso, hay una diferencia sustancial entre el área urbana, que pasó de 76.2 a 85.7 %, en contraste con la rural, que pasó de 6.5 a 18.9 % de cobertura (INEI, 2023b). De forma global, el incremento en ambas áreas se debe a los programas de masificación de GN, promoción de GLP y la implementación de cocinas mejoradas, llevadas a cabo por proyectos de cooperación internacional y el Estado en el periodo 2004-2014 (Ramírez-Candia et al., 2022).

3. Fuentes y tipos de combustibles tradicionales y modernos

Actualmente, los registros oficiales en el Perú diferencian los combustibles para cocinar de la siguiente forma:

- a) Combustibles y tecnología moderna, que incluye el uso de la electricidad, GLP y el GN.
- b) Combustibles de biomasa tradicional sólida, que incluye el uso de leña, carbón vegetal, torta de estiércol (bosta), especies vegetales propias de cada ecosistema y otras biomásas (residuos agrícolas, ramas secas, hojas y corazón de maíz, etc.).

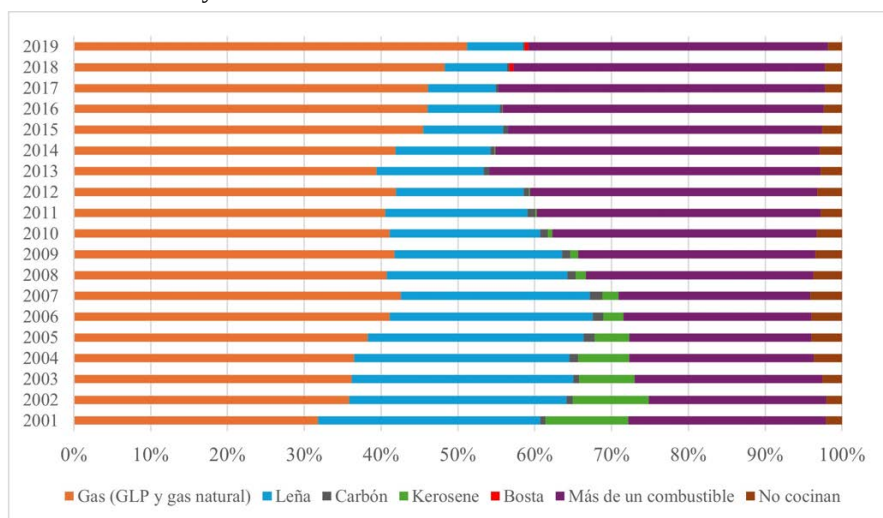
Además de estos combustibles, las estadísticas oficiales monitorean el uso combinado de estos combustibles y aquellos hogares que no cocinan (INEI, 2023a).

La amplia variedad de combustibles empleados en el país ha dado origen a una diversidad de dispositivos para cocinar. Esta heterogeneidad surge en parte a la implementación de diversos emprendimientos gubernamentales y privados de promoción y subsidio de cocinas. De esta forma, tanto en zonas rurales como urbanas es común encontrar cocinas a gas (GLP o GN) de dos y cuatro hornillos, mientras que el uso de cocinas eléctricas y de inducción es limitado. Además, en las zonas rurales, es común encontrar una mayor diversidad de dispositivos, que en algunos casos pueden tener un nivel tecnológico menos avanzado. Ramírez-Candia et al. (2022) enumera más de 79 modelos, entre las que se encuentran las cocinas tradicionales de barro, piedra o arcilla, cocinas mejoradas fijas y portátiles y otros modelos como las solares y a biogás.

La elección de los diferentes tipos de cocinas y combustibles está determinada por varios factores como las condiciones climáticas, accesibilidad del combustible, el tipo de comida y la cantidad de comida que se prepara (Rhodes et al., 2014). Las diferencias son especialmente notables entre las regiones costeras más prósperas y las áreas andinas y amazónicas que tienen los niveles de pobreza más altos del país (Ramírez-Candia et al., 2022).

La evolución del consumo de combustible en el Perú, para el período 2001 a 2019, se muestra en la Figura 3. En este periodo se puede observar una disminución del consumo de combustibles de biomasa (leña, bosta y carbón vegetal) y un crecimiento del consumo de GN y GLP. Esta modificación de la estructura de consumo de energía en los hogares se explica por el crecimiento económico del país (desde la década de 1990), el inicio de proyectos masivos de gas (GN y GLP) desde el año de 2004 y el inicio de programas de cocinas mejoradas a partir del 2008 (Ramírez-Candia et al., 2020; Plataforma Nacional por un Perú sin humo, 2011). Además, se dieron cambios respecto al monitoreo de combustibles, quedando excluido el kerosene e incluida la bosta.

Figura 3. Evolución porcentual de consumo de combustibles para cocinar en los hogares de Perú entre 2001 y 2019.

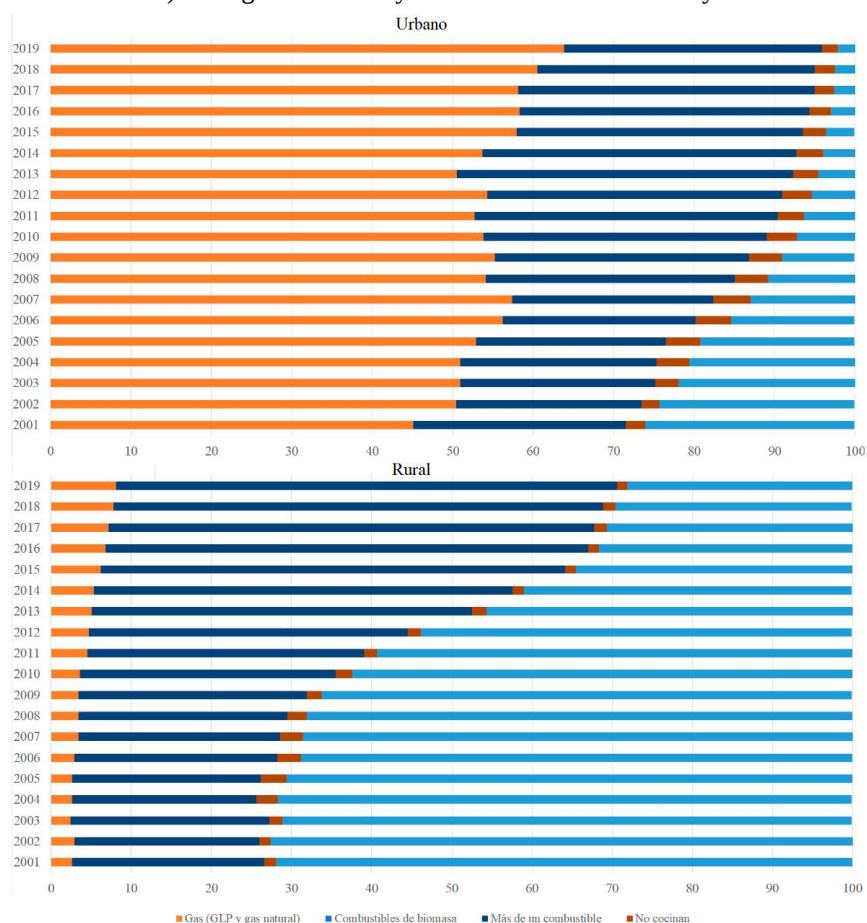


Fuente: Elaboración propia con base en datos de ENAHO-INEI 2001–2010, 2007–2017 y 2009–2019 (INEI, 2023a)

Como se puede apreciar en la Figura 4, existe una disparidad en el consumo de energía entre los hogares del Perú según su área de residencia. Durante el período estudiado, tanto las zonas urbanas como las rurales redujeron el consumo de biomasa sólida y aumentaron el consumo de GN y GLP. No obstante, es importante destacar que existen diferencias porcentuales significativas en cuanto a los combustibles utilizados por zonas. De esta forma, en las zonas urbanas la participación del gas es importante, mientras que el consumo de biomasa sólida lo es en zonas rurales. Las cifras muestran que al 2019, alrededor del 47 % de los hogares en todo el país y el 90 % en las zonas rurales utilizan algún tipo de combustible tradicional para cocinar en sus hogares. Por lo tanto, no ha habido una migración real hacia los combustibles modernos como estaba previsto en los planes y proyectos nacionales.

En la Figura 4 también se observa un aumento en el consumo de múltiples combustibles. Este fenómeno se conoce como “apilamiento de combustible” y es común en comunidades rurales en todo el mundo (Shankar et al., 2020; Heltberg, 2004). A pesar de los esfuerzos de programas públicos o privados que buscan la transición a fuentes de energía modernas, su uso constante, exclusivo y a largo plazo rara vez se logra. En el caso de Perú, esta situación ha sido evidenciada a través de estudios que analizan el uso de cocinas mejoradas y de GLP, así como el consumo de diversos tipos de combustibles (Williams et al., 2020; Hollada et al., 2017; Pollard et al., 2018; Wolf et al., 2017).

Figura 4. . Distribución porcentual del consumo de combustibles (Gas, biomasa sólida y combinaciones) en hogares urbanos y rurales de Perú entre 2001 y 2019.



Fuente: Elaboración propia con base en datos de ENAHO-INEI 2001–2010, 2007–2017 y 2009–2019 (INEI, 2023a)

Frente a estos patrones de consumo y la evidencia del uso concurrente de múltiples combustibles, resulta necesario reconsiderar las estrategias de transición energética que actualmente se están implementando en el país. Esto implica aceptar la posibilidad de que una sustitución completa de las opciones energéticas tradicionales sea poco factible en la realidad. Probablemente, considerar el “apilamiento limpio”, como señalan Medina et al. (2019), junto con una evaluación de sus consecuencias para la salud y el medio ambiente, sea una alternativa más realista.

4. Políticas y programas gubernamentales

En el Perú, diversos emprendimientos públicos y privados se han llevado a cabo para mejorar el acceso a combustibles limpios. En la revisión realizada por Ramírez-Candia et al. (2022) para el período 1993-2018 sobre instrumentos políticos (leyes, normas y objetivos de política), económicos (documentos e informes de impuestos y subsidios) y voluntarios (educación, información, cooperación para el desarrollo e investigación) para el GN, GLP y cocinas mejoradas, se evidencia cerca de 31 iniciativas realizadas. De este grupo, 18 corresponden a cambios normativos, 2 a subsidios económicos y el resto a iniciativas gubernamentales y privadas de alcance nacional.

La mayor parte de los instrumentos nacionales se enfocan en normativas generales y declarativas para promover el GN y el consumo de GLP, mientras que en menor medida se encuentran instrumentos económicos y voluntarios para promover la migración a nuevas formas de combustible. De este grupo, las iniciativas más importantes son los programas estatales para promover el GLP, como “Cocina Perú” (entrega de kits de cocinas metálicas y vales de consumo de GLP) y el Fondo de Inclusión Social Energético-FISE (vales de consumo de GLP) y el programa para la masificación de GN. Entre los planes destaca el Plan de Acceso Universal a la Energía. No obstante, la mayoría de los emprendimientos, planes y proyecciones fueron formulados entre el 2010 y el 2014 y no han tenido actualización.

Una revisión detallada de los 11 instrumentos voluntarios (Ramírez-Candia et al., 2022) identificó cerca de 181 proyectos llevados a cabo por el gobierno y la cooperación internacional referidos a la ejecución de cocinas mejoradas de barro y entrega de cocinas metálicas para GLP a nivel departamental. Con estos proyectos se habrían diseminado cerca de 0.6 millones de cocinas mejoradas a barro y 0.9 millones de cocinas metálicas, especialmente en las zonas pobres del país. No obstante, también se evidencian discrepancias en el recuento de cocinas registradas en diversos planes e informes de instituciones públicas y privadas, a lo que se suma la existencia de proyectos concurrentes entre estas entidades.

5. Desafíos para la adopción: barreras técnicas, socioculturales y percepción de la población que afecta la adopción de nuevas tecnologías

Los tipos de combustibles usados en el país tienen una distribución y disponibilidad heterogénea en los 24 departamentos del país. En general, esta variación se debe a diferencias en la accesibilidad geográfica, la capacidad económica, la presencia de mercados y las costumbres y usos de la población. Además, la ausencia de políticas y programas de apoyo actualizadas por parte del gobierno para promover la adopción de tecnologías de cocción limpia puede obstaculizar su implementación.

Dentro de los combustibles catalogados como modernos, el GLP es el más utilizado en el país. En promedio, se estima un consumo de 1.01 cilindros de gas por mes/familia. Al año 2023, el precio promedio de un cilindro de GLP en el Perú con subsidio es cercano a los 6.6 USD, y sin subsidio a 13.3 USD, que representan valores medios con respecto a otros precios en LA. A pesar de la existencia de acciones de promoción del GLP por parte del Estado, aún no ha sido posible cerrar la brecha de acceso en las zonas urbanas y rurales del país (Nuño Martínez et al., 2020). Las causas principales de esta situación son diversas, incluyendo la ausencia de una red de conexión eficiente, el tamaño variable del mercado, las complicaciones en la distribución y la influencia de la ubicación geográfica respecto a los proveedores, lo que conlleva importantes diferencias en el precio del cilindro de GLP debido a la logística del traslado. El mercado del GLP se encuentra ante un desafío considerable, siendo fundamental comprender tanto la cadena de suministro como el alcance del mercado (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería [OSINERGMIN], 2020).

Asimismo, existen diferencias en los métodos empleados para cocinar los alimentos, la tradición y cultura, las diferencias en los sabores y gustos de los alimentos, los ingresos monetarios, la existencia de un sustituto energético fiable y económico, entre otros, que limitan la preferencia por el GLP (Hollada et al., 2017; Nuño Martínez et al., 2020; OSINERGMIN, 2020; Williams et al., 2020).

Otras fuentes energía para cocinar utilizadas en los hogares peruanos son el GN y la electricidad. Respecto al GN, a pesar del programa de

masificación, su consumo se concentró solo en tres departamentos costeros del país: Lima, Ica y Arequipa. El resto de los departamentos no tiene acceso a este combustible debido a la limitada infraestructura de suministro de combustible. Mientras que, para la electricidad, su uso se relaciona directamente con la disponibilidad y calidad de energía eléctrica en los hogares. No obstante, para que se convierta en una opción viable, es fundamental establecer un mercado de cocinas eficientes y accesibles. Además, es necesario superar las limitaciones en la calidad de la energía y cerrar la brecha nacional de acceso a la electricidad, que actualmente es del 4.9 % (INEI, 2023b).

Respecto a las cocinas mejoradas, se han identificado tanto desafíos técnicos como sociales que han sido abordados en varios estudios. A continuación, enumeramos los más frecuentes: (1) dificultad en la obtención de materiales para la construcción de las cocinas, (2) costo inicial elevado, en torno a 400 USD, (3) incompatibilidades entre el diseño propuesto por las instituciones y las prácticas culinarias (tamaño de utensilios diversos para uso diario o particular como fiestas o celebraciones), (4) disponibilidad de combustibles acorde al modelo de cocina (variedades de leña, estiércol y tamaño apropiado para el uso), (5) inquietudes en torno a la seguridad al usar cocinas, (6) problemas derivados de defectos en la construcción, (7) incertidumbre sobre la durabilidad y eficacia, (8) falta de conciencia y comprensión de los riesgos para la salud a largo plazo, (9) hábitos de cocción y usos diferenciados de los combustibles (GLP para cocciones rápidas y leña para largas), (10) consideraciones de sabores ajustados a las preferencias locales y (11) arraigadas tradiciones culinarias (Agurto Adrianzén, 2014; GIZ, 2012, 2013; Hollada et al., 2017; Keese et al., 2017; MIDIS, 2016, 2017; Rhodes et al., 2014).

Otro punto de importancia en las cocinas mejoradas radica en la gestión, el financiamiento y la generación de un mercado de tecnologías de cocción más eficientes. Por un lado, se presenta un acceso limitado a créditos o financiamiento destinados a fomentar tecnologías con un mayor rendimiento y eficiencia. Además, las pequeñas y medianas empresas enfrentan obstáculos en términos de conocimiento y recursos para llevar a cabo procesos de investigación y desarrollo de nuevas tecnologías. Asimismo, los altos costos inherentes a este proceso dificultan la inversión

necesaria para introducir un nuevo modelo de cocina mejorada en los mercados rurales. Desde el punto de vista del usuario, los altos costos de inversión por la adquisición de la cocina, la inclusión o cambio de combustible en su matriz de consumo, la ausencia de un mercado establecido para piezas de repuesto y personal capacitado para el mantenimiento limita la migración a cocinas más limpias. Esta problemática no resuelta ha limitado la sostenibilidad de numerosas iniciativas de cocinas mejoradas (Escobar y Carhuanchó, 2017; GIZ, 2012, 2013; Gould et al., 2018; Ministerio de Desarrollo e Inclusión Social [MIDIS], 2016)

En las zonas rurales y periurbanas existe una gran demanda de cocinas mejoradas; sin embargo, la oferta es insuficiente y tiene limitadas capacidades de producción. Esta situación afecta negativamente la sostenibilidad del acceso a tecnologías eficientes para cocinar, lo que lleva a que muchas familias regresen al uso de las tradicionales cocinas de tres piedras o fogones (Escobar y Carhuanchó, 2017).

Por otro lado, la existencia de acciones desarticuladas entre el gobierno y las instituciones privadas motiva que proyectos de cocción limpia en zonas rurales promuevan que la población acumule las tecnologías y no las adopte en su totalidad. Estudios previos sugieren que esto se debe a que las alternativas propuestas no satisfacen completamente las necesidades de la población y que se combinan por razones económicas y culturales (Calzada y Sanz, 2018; Díaz-Vásquez et al., 2020; Nuño Martínez et al., 2020; Pollard et al., 2018). Tal como señalan Nuño Martínez et al. (2020); Rhodes et al. (2014); Thacker et al. (2017); Urmee y Gyamfi (2014); Wolf et al. (2017), esta situación podría superarse si se incorpora una fuerte visión de la dimensión sociocultural y se adaptan las tecnologías a las preferencias locales de combustible, y se entrega información suficiente sobre las ventajas y el funcionamiento de las tecnologías. Algo evidente pero aparentemente pasado por alto en los proyectos realizados en el Perú.

6. Estudio de caso: Experiencia de adopción de tecnologías de cocción limpia en zonas rurales (ejemplo FIDECOP)

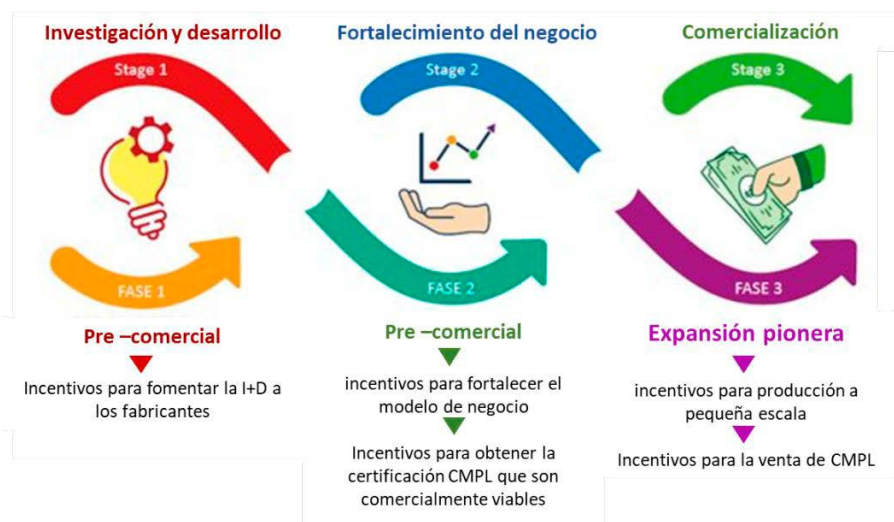
A partir de la promoción y distribución de cocinas mejoradas estimuladas por los programas sociales nacionales, se generó un mercado libre de la venta de diferentes diseños de cocinas mejoradas. Sin embargo, este mercado no era competitivo debido a que presentaban limitaciones en la distribución y comercialización a gran escala para satisfacer la creciente demanda de estas cocinas en zonas rurales y periurbanas. Uno de los proyectos innovadores que afrontó los desafíos de innovación y eficiencia de nuevos modelos de cocinas mejoradas y su inserción en un mercado competitivo fue el Fondo de Innovación y Desarrollo de Cocinas Portátiles a Leña (FIDECOP). Este proyecto fue financiado por el Departamento de Cooperación Internacional del Reino Unido (DFID) en conjunto con el proyecto EnDev Perú e implementado por Soluciones Prácticas en Perú.

El proyecto FIDECOP impulsó la investigación y desarrollo de nuevos modelos de cocinas mejoradas portátiles a leña (CMPL) bajo el enfoque de financiamiento basado en resultados (RBF, siglas en inglés). Las CMPL son nuevos modelos de cocinas mejoradas cuyo tiempo promedio de ebullición fue 24 minutos por cada 5 litros de agua y energía requerida de 3 MJ por litro. Estos modelos son más eficientes gracias al diseño de la cámara de combustión y materiales más resistentes, así como su facilidad para el traslado, dado que no pesan más de 45 kilos, y su sencillez en la instalación y mantenimiento.

Los RBF consisten en incentivos financieros que se otorgan a las pequeñas y medianas empresas después de cumplir con los objetivos previamente acordados y verificados (Endev GIZ y Practical Action, 2019), con la finalidad de motivar la inversión en la innovación y el desarrollo de CMPL, de manera que satisfagan las necesidades de los mercados rurales y periurbanos, adaptando su producción a diferentes escalas y a precios competitivos. En este sentido, ocho fabricantes y siete empresas de distribución fueron beneficiados por el proyecto FIDECOP. Estas empresas cumplieron con tres etapas de implementación, como

se observa en la Figura 5: i) investigación y desarrollo de un prototipo de CMPL; ii) elaboración de planes de negocio, planes de marketing y pasantías internacionales, así como la certificación del modelo de cocina ante el Servicio Nacional de Capacitación de la Industria de la Construcción (SENCICO); y iii) fabricación y comercialización de las cocinas en zonas rurales y periurbanas (Escobar y Carhuacho, 2017).

Figura 5. Etapas de implementación del proyecto FIDECOP.



Fuente: (Endev GIZ y Practical Action, 2019)

Durante la etapa precomercial del proyecto FIDECOP, se detectó una limitación entre los pequeños y medianos empresarios en cuanto al diseño e implementación de sus planes de negocio y marketing. El análisis financiero desarrollado por los empresarios no era realista, lo que incrementaba la incertidumbre de lanzar un nuevo producto al mercado. Es crucial en esta fase realizar un análisis exhaustivo de cada empresa para reducir los riesgos inherentes al ingresar a un mercado de nicho, lo cual implica una investigación detallada sobre los activos, capacidad de endeudamiento, rentabilidad y fortalezas y debilidades financieras de la empresa.

Asimismo, la principal barrera durante la etapa de comercialización de las CMPL fue el alto precio del producto en comparación con los precios

del mercado existente. Dependiendo del modelo, el precio podría variar entre 80.00 y 220.00 USD, lo cual se debió a los incrementos de los costos de transacción, lo que ocasionó que las ventas del producto fueran lentas y las ganancias fueran bajas. Según Sweeney (2017), desarrollar productos de alto rendimiento, calidad, asequibles y que satisfagan las preferencias de los usuarios es un desafío persistente, debido al costo asociado a mejoras de diseño y la inversión en investigación y desarrollo por parte de las empresas. Además, la baja disponibilidad económica por parte de las familias de zonas rurales limita el acceso a estas nuevas tecnologías. Para enfrentar este desafío, los fabricantes expandieron la red de ventas a través de alianzas con mayoristas y minoristas locales especializados en tecnologías de acceso básico a la energía, de esta manera redujeron los costos de transacción, incrementaron las ventas y facilitaron la obtención de microfinanciamiento para sus clientes de zonas rurales y periurbanas (Endev GIZ y Practical Action, 2019).

El enfoque de innovación y desarrollo del proyecto FIDECOP ayudó a actualizar los estándares técnicos para la certificación de nuevos modelos de cocinas mejoradas. Anteriormente la norma técnica para cocinas mejoradas solo se aplicaba para cocinas mejoradas fijas instaladas y a incorporar nuevos modelos certificados al mercado, de esta manera amplió la oferta de tecnologías limpias que cocinan con biomasa. Las empresas beneficiarias vendieron 4425 CMPL a familias rurales y periurbanas y beneficiaron a más de 22 000 personas, además las actividades del proyecto alentaron la utilización de estas cocinas en entornos institucionales, resultando en la instalación de 11 448 CMPL en escuelas como parte de un programa nacional de alimentación escolar (Endev GIZ y Practical Action, 2019).

El proyecto demostró que el enfoque de mercado de una nueva tecnología limpia para cocción permite insertar a pequeñas y medianas empresas de manera más eficaz en el mercado debido a la generación y adaptación de una cadena comercial que vincule todas las partes interesadas, como importadores, fabricantes mayoristas y minoristas e intermediarios, para satisfacer la demanda. Sin embargo, el desarrollo de mercado de nuevos modelos de tecnologías limpias en zonas rurales necesita un tiempo más largo para asegurar el establecimiento sostenible del producto en este mercado sin la necesidad de un proyecto o programa de incentivo.

7. Conclusiones y recomendaciones

En general, en el país se han emprendido un gran número de iniciativas para lograr el acceso a combustibles y tecnologías modernas para cocinar, especialmente en las zonas pobres del país. Sin embargo, a pesar de todos los esfuerzos realizados, como muestran las estadísticas más recientes, el cambio en el acceso de la población a los combustibles en el Perú ha sido modesto. Esto sugiere que el desarrollo de un mayor número de iniciativas no necesariamente resulta en una fuerte disminución de la brecha de acceso. Un aspecto importante en ello es que el acceso a combustibles modernos carece de un marco institucional claro, no cuenta con planes actualizados y está ausente dentro de la planificación energética nacional. Esto plantea serias dudas sobre la capacidad nacional para lograr una migración real a fuentes y tecnologías limpias para cocinar. Esto es especialmente cierto si se mantiene el enfoque desordenado de implementación de iniciativas y si las instituciones o los hacedores de políticas continúan promoviendo respuestas tecnológicas únicas para un territorio y una población tan diversa como el Perú. Por lo tanto, parece recomendable actuar sobre el marco de políticas actual, formular políticas más inclusivas y promover una visión unificada.

La experiencia FIDECOP muestra que además de resolver aspectos claves sobre portabilidad, mayor rendimiento y eficiencia en cocinas mejoradas, es importante atender las preferencias de los usuarios como ejes para lograr la adopción de cocinas. Este proyecto también demostró que es necesario promover un nuevo enfoque de negocio para la disseminación de la tecnología que involucre a los productores y a los usuarios. Además, demuestra que acciones múltiples integradas como (1) considerar la reducción los costos para hacer tecnologías más asequibles y atractivas, (2) promover el acceso a financiamiento para las comunidades rurales como microcréditos, programas de subsidio o esquemas de financiamiento de bajo interés, (3) la promoción de políticas y regulaciones para la exención de impuestos y tarifas preferenciales para la producción de tecnologías limpias y (4) la capacitación técnica y asesoría a las comunidades rurales para el mantenimiento y operación adecuada de estas nuevas tecnologías, permitirán avanzar hacia una mayor democratización energética y adopción de tecnologías limpias en comunidades rurales.

Referencias bibliográficas

- Agurto Adrianzén, M. (2014). Social Capital and Improved Stoves Usage Decisions in the Northern Peruvian Andes. *World Development*, 54, 1–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2013.07.004>
- Calzada, J., & Sanz, A. (2018). Universal access to clean cookstoves: Evaluation of a public program in Peru. *Energy Policy*, 118, 559–572. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.03.066>
- CCA. (2020). Monitoring and Evaluation Framework.
- Díaz-Vásquez, M. A., Díaz-Manchay, R. J., León-Jiménez, F. E., Thompson, L. M., Troncoso, K., & Failoc-Rojas, V. E. (2020). Adoption and impact of improved cookstoves in Lambayeque, Peru, 2017. *Global Health Promotion*, 27(4), 123–130. <https://doi.org/10.1177/1757975920945248>
- Endev GIZ & Practical Action. (2019). *Systematisation of the Innovation and Development Fund for Portable Improved Cookstoves*. FIDECOP.
- Energy Sector Management Assistance Program. (2020). *The State of Access to Modern Energy Cooking Services*. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/937141600195758792/the-state-of-access-to-modern-energy-cooking-services>
- Escobar, R., & Carhuanchu, M. (2017). *Impulsando la oferta de cocinas mejoradas portátiles*. Amaray. Energía y Desarrollo Para Zonas Rurales. Endev-GIZ. https://energypedia.info/images/0/00/Amaray_Nº13_Dic2017_Espanol.pdf
- GIZ. (2012). *Evaluación de las cocinas instaladas por el Proyecto NINA Experiencias y percepciones en Ayacucho y Huancavelica*. https://energypedia.info/images/c/cb/Evaluacion_del_proyecto_NINA_-_Ayacucho_y_Huancavelica_2012.pdf
- GIZ. (2013). *Evaluación del nivel de información del buen uso y mantenimiento de Cocinas Mejoradas entre usuarias. Experiencias y percepciones en la Macro Región Sur*. https://energypedia.info/images/2/20/Evaluación_de_buen_uso_y_mantenimiento_-_Región_Sur_2013.pdf
- Gould, C. F., Jagoe, K., Moreno, A. I., Verastegui, A., Pilco, V., García, J., Fort, A., & Johnson, M. (2018). Prevalent degradation and patterns

- of use, maintenance, repair, and access to post-acquisition services for biomass stoves in Peru. *Energy for Sustainable Development*, 45, 79–87. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.05.004>
- Health and Energy Platform of Action (HEPA). (n.d.). Retrieved December 12, 2021, from <https://www.who.int/initiatives/health-and-energy-platform-of-action>
- Heltberg, R. (2004). Fuel switching: evidence from eight developing countries. *Energy Economics*, 26(5), 869–887. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2004.04.018>
- Hollada, J., Williams, K. N., Miele, C. H., Danz, D., Harvey, S. A., & Checkley, W. (2017). Perceptions of Improved Biomass and Liquefied Petroleum Gas Stoves in Puno, Peru: Implications for Promoting Sustained and Exclusive Adoption of Clean Cooking Technologies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/ijerph14020182>
- International Energy Agency (IEA), International Renewable Energy Agency (IRENA), United Nations Statistics Division (UNSD), World Bank & World Health Organization (WHO). (2023). Access to clean fuels and technologies for cooking. En *Tracking SDG 7: The Energy Progress Report 2023*. https://trackingsdg7.esmap.org/data/files/download-documents/sdg7-report2023-ch2._access_to_clean_cooking.pdf
- Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI]. (2018). *Perfil Sociodemográfico. Informe Nacional. Censos Nacionales 2017*. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1539/index.html
- INEI. (2019). *Hogares en los que cocinan con combustibles contaminantes. Población involucrada y distribución territorial*. www.inei.gob.pe
- INEI. (2023a). *Microdatos*. Base de Datos. <https://proyectos.inei.gob.pe/microdatos/>
- INEI. (2023b). *Perú: Sistema de Monitoreo y Seguimiento de los Indicadores de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <http://ods.inei.gob.pe/ods/objetivos-de-desarrollo-sostenible/energia-asequible-y-no-contaminante>
- Keese, J., Camacho, A., & Chavez, A. (2017). Follow-up study of improved cookstoves in the Cuzco region of Peru. *Development in Practice*,

- 27(1), 26–36. <https://doi.org/10.1080/09614524.2017.1257565>
- Medina, P., Berrueta, V., Cinco, L., Ruiz-García, V., Edwards, R., Olaya, B., Schilman, A., & Masera, O. (2019). Understanding Household Energy Transitions: From Evaluating Single Cookstoves to “Clean Stacking” Alternatives. *Atmosphere*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/atmos10110693>
- Ministerio de Desarrollo e Inclusión Social [MIDIS]. (2016). Estudio de Sistematización de la experiencia de ejecución de proyectos “Haku Wiñay/Noa Jayatai”. Producto 3: Documento de Sistematización. <http://www.foncodes.gob.pe/haku/pdfFiles/Estudio.pdf>
- MIDIS. (2017). Haku Wiñay: *Dinámicas sociales y percepciones en torno a la gestión del programa* (Documento de Trabajo Elaborado Por Beatriz Urquía, Julio Mayca, Elmer Guerrero y Chaska Velarde). www.midis.gob.pe
- Nuño Martínez, N., Mäusezahl, D., & Hartinger, S. M. (2020). A cultural perspective on cooking patterns, energy transfer programmes and determinants of liquefied petroleum gas use in the Andean Peru. *Energy for Sustainable Development*, 57, 160–167. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.06.007>
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería [OSINERGMIN]. (2020). *Determinantes de los diferenciales de precios en el mercado de GLP envasado en el Perú* (Documento de trabajo N° 49; Gerencia de Políticas y Análisis Económico, Issue 511). http://www.osinergmin.gob.pe/PortaldelaGPAEhttp://www.osinergmin.gob.pe/seccion/institucional/acerca_osinergmin/estudios_economicos/ofi
- Plataforma Nacional por un Perú sin Humo. (2011). *Campaña Nacional Medio Millón de Cocinas Mejoradas*. <http://bvs.minsa.gob.pe/local/MINSA/2782.pdf>
- Pollard, S. L., Williams, K. N., O’Brien, C. J., Winiker, A., Puzzolo, E., Kephart, J. L., Fandiño-Del-Rio, M., Tarazona-Meza, C., Grigsby, M. R., Chiang, M., & Checkley, W. (2018). An evaluation of the Fondo de Inclusión Social Energético program to promote access to liquefied petroleum gas in Peru. *Energy for Sustainable Development*, 46, 82–93. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.06.001>
- Ramírez-Candia, J., Curt, M. D., & Dominguez Bravo, J. (2020). Cha-

- llenges for Access to Energy in Peru (In press). In Peru in the 21st Century: Progress, Trends and Challenges. Nova Science Publishers.
- Ramírez-Candia, J., Curt, M. D., & Domínguez, J. (2022). Understanding the Access to Fuels and Technologies for Cooking in Peru. *Energies*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/en15041456>
- Rhodes, E. L., Dreibelbis, R., Klasen, E. M., Naithani, N., Baliddawa, J., Menya, D., Khatry, S., Levy, S., Tielsch, J. M., Miranda, J. J., Kennedy, C., & Checkley, W. (2014). Behavioral attitudes and preferences in cooking practices with traditional open-fire stoves in Peru, Nepal, and Kenya: implications for improved cookstove interventions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(10), 10310–10326. <https://doi.org/10.3390/ijerph111010310>
- Shankar, A. V, Quinn, A. K., Dickinson, K. L., Williams, K. N., Mase-
ra, O., Charron, D., Jack, D., Hyman, J., Pillarisetti, A., Bailis, R.,
Kumar, P., Ruiz-Mercado, I., & Rosenthal, J. P. (2020). Everybody
stacks: Lessons from household energy case studies to inform design
principles for clean energy transitions. *Energy Policy*, 141, 111468.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111468>
- Sweeney, D. (2017). *Handbook for biomass cookstove research, design
and development, A practical guide to implementing recent advances*.
- Thacker, K. S., Barger, K. M., & Mattson, C. A. (2017). Balancing tech-
nical and user objectives in the redesign of a peruvian cookstove.
Development Engineering, 2, 12–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.deveng.2016.05.001>
- Urmee, T., & Gyamfi, S. (2014). A review of improved Cookstove tech-
nologies and programs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,
33, 625–635. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.019>
- Williams, K. N., Kephart, J. L., Fandiño-Del-Rio, M., Simkovich, S.
M., Koehler, K., Harvey, S. A., & Checkley, W. (2020). Exploring the
impact of a liquefied petroleum gas intervention on time use in rural
Peru: A mixed methods study on perceptions, use, and implications
of time savings. *Environment International*, 145, 105932. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105932>
- Wolf, J., Mäusezahl, D., Verastegui, H., & Hartinger, S. M. (2017). Adop-
tion of Clean Cookstoves after Improved Solid Fuel Stove Programme

Exposure : A Cross-Sectional Study in Three Peruvian Andean Regions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/ijerph14070745>

World Bank. (2023). Access to clean fuels and technologies for cooking (% of population) - Argentina, Brasil, Chile, Paraguay, Ecuador, Uruguay, Colombia, Peru, Bolivia, México Data. World Development Indicators. https://data.worldbank.org/indicator/EG.CFT.ACCS.ZS?locations=AR-BR-CL-PY-EC-UY-CO-PE-BO-MX&name_desc=false

World Health Organization [WHO]. (2022). *Household air pollution*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>

Capítulo 2

Economía circular del bagazo de café: emprendimiento-caso práctico

Fernando Espinola-Portilla¹
Déborah L. Villaseñor-Basulto²

<https://doi.org/10.61728/AE20251628>



¹ Doctor en ciencias químicas; Departamento de Ciencias Básicas, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara; México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6708-4915>

² Doctora en ciencias químicas; Departamento de Ciencias Básicas, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara; México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1410-249X>

Resumen

La ciencia es la clave para resolver muchos problemas, y la economía circular es esencial para mantener nuestro modelo económico actual. Sin embargo, aquellos que poseen el conocimiento para solucionar problemas medioambientales a menudo no pueden aplicarlo debido a las dificultades para emprender en su situación laboral. Al mismo tiempo, los emprendedores y empresarios a menudo no implementan las soluciones necesarias porque no ven beneficios inmediatos. La economía circular abarca desde la innovación científica y tecnológica hasta la venta de productos, integrando todo el ciclo de producción. En este capítulo, analizamos un caso práctico que va desde una idea y una innovación científica hasta el proceso de venta del producto, destacando los desafíos de un emprendimiento socioambiental. Nos centramos en cómo comercializar un emprendimiento basado en la reutilización de residuos, usando como ejemplo el “bagazo de café”.

Introducción

La economía circular es un modelo de producción que busca reducir y reutilizar los residuos para minimizar el impacto ambiental. Esto promueve un ciclo continuo de uso y regeneración de materiales (Rolewicz-Kalińska et al., 2020). La industria del café tiene grandes oportunidades; desde el cultivo hasta el consumo, generando una gran cantidad de residuos, como cáscaras, pulpas y bagazo (posos) de café.

En México, el creciente consumo de café impacta negativamente al ambiente. Con una población de aproximadamente 130 millones de mexicanos, donde el 85 % consume café (García, 2019) que resulta en un consumo anual de 176.8 mil toneladas de café. De cada tonelada de café consumido, se producen aproximadamente 650 kg de desecho (bagazo de café) (Battista et al., 2020), teniendo un total de 115 000 toneladas de

bagazo de café al año. Este residuo contribuye a la contaminación del suelo, el agua y el aire; resultando en acidificación del suelo, contaminación de agua por lixiviados y generación de gases de efecto invernadero (GEI) (Stylianou et al., 2018). Esto representa una oportunidad en la implementación de la economía circular.

Así, al cerrar el ciclo de vida de los productos, no solo se mitigan los impactos ambientales, sino que también se fomenta la innovación y la resiliencia en la industria. Por ello, este capítulo se centrará en un caso de estudio de un emprendimiento de economía circular que transforma el bagazo de café. Se hará énfasis en los procesos del emprendimiento socioambiental, con el objetivo de que el lector cuente con un mapa de ruta inicial para crear una economía circular.

Idea-Producto: ¿Cuál problema se va a resolver?

Para comenzar la tarea de cerrar el círculo de algún residuo-producto en la economía circular, es importante realizar un análisis del residuo que se desea transformar. Para ello, se responden los siguientes cuestionamientos: ¿Qué problema se intenta resolver con la transformación del residuo? ¿Cuáles son las causas y consecuencias de ese problema? Entre las causas, ¿cuáles se pueden resolver? ¿Qué soluciones potenciales tiene el problema? ¿Quiénes son los grupos de interés involucrados en la problemática y transformación del residuo?

Al abordar el caso de estudio las posibles respuestas serían las siguientes:

En México existen 3 sectores predominantes en el consumo de café: el sector retail (consumo personal o en el hogar: 65.7 % de volumen de café consumido), servicios alimenticios (cafeterías, restaurantes, barras, etc.: 21.7 %) y sector industrial (hoteles, catering, oficinas, hospitales, etc.: 12.6 %) (International y Agosto, 2017). La extracción de cafeína genera un residuo conocido como bagazo o poso de café, el cual tiene un tratamiento final en el relleno sanitario. Este proceso produce GEI debido al traslado del residuo de la ciudad al relleno sanitario, producción de su contenedor y su posterior descomposición. Aproximadamente 15 kg de bagazo de café producen 7 kg de CO₂eq de huella de carbono;

entonces, las 115 000 toneladas de bagazo de café anuales en México generan cerca de 55 000 toneladas de CO₂eq, similar a las emisiones de casi 7 millones de personas (8 kg de CO₂eq al día por persona). Además, en el relleno sanitario genera metano, además de que podría contaminar los mantos freáticos a través de los lixiviados generados. Las causas de la problemática radican en la falta de conocimiento de las consecuencias ambientales por parte de los sectores; una normativa no robusta en las instituciones gubernamentales; pocos impulsos gubernamentales al reúso o reciclado; poca responsabilidad de residuos en la industria; y la falta de métodos adecuados para su reutilización o transformación.

Encontrar un método de reutilización o transformación del bagazo de café es crucial. Algunas soluciones incluyen reutilizar el bagazo para crear productos como carbón activado, bioplásticos, fertilizantes orgánicos o bioenergía (Yusufoğlu et al., 2024). En el contexto mexicano, la transformación del bagazo de café en carbón activado es interesante, ya que actualmente este producto se importa principalmente de China o Estados Unidos (IndexBox Inc., 2023), aumentando su huella de carbono. El carbón activado absorbe contaminantes y es muy utilizado en la industria de tratamiento de agua, bebidas, cosmética, entre otras.

Los insumos tradicionales para el carbón activado son la madera y cáscara de coco; sin embargo, la producción de coco en México es menor que la de café, además de que su traslado desde la costa a las fábricas en la zona metropolitana de Guadalajara o el Estado de México aumenta la huella de carbono. Así, transformar el bagazo de café en carbón activado presenta una solución.

Los grupos de interés involucrados en esta problemática incluyen los principales sectores consumidores de café, las industrias que utilizan carbón activado, las organizaciones no gubernamentales (ONG) y las instituciones gubernamentales.

Existen dos metodologías interesantes que pueden servir como herramientas para un análisis sobre el residuo y el diagnóstico de necesidades: El árbol del problema y el mapa de stakeholders. Con ello se puede tener el problema identificado y delineado con todos los actores presentes.

Teoría de cambio y Canvas: ¿Cómo resolver el problema?

¿Qué se tiene que hacer para obtener el cambio que quiero? Esta respuesta nos la da la teoría de cambio, modelo que nos ayuda para planificar, diseñar y evaluar intervenciones a llevar a cabo durante todo el proceso de transformación de algún residuo o cualquier cosa transformable. En general, ayuda a identificar y explicar las acciones necesarias para provocar un cambio a largo plazo en un entorno determinado (Mattos et al., 2022), en este caso, la transformación de un residuo y minimizar el impacto ambiental.

Para realizarla, hay que plantear una hipótesis a probar, es decir, si hago “esto” voy a obtener “aquello”, siempre siendo lo más cercano a la realidad. Teniendo esta hipótesis, es posible planificar, diseñar y evaluar las distintas dimensiones del proyecto. Esto incluye: ¿dónde o cómo se medirá el éxito del proyecto?; ¿qué acciones o actividades se llevarán a cabo?; ¿qué productos y resultados se obtienen de estas actividades?; ¿cuál es el impacto deseado o la situación final?; y ¿cuáles podrían ser los posibles riesgos?; entre otras cuestiones.

Por ejemplo, la hipótesis de partida sería: “Al implementar un servicio de recolección de bagazo de café en cafeterías y transformarlo en carbón activado, las cafeterías se responsabilizan de sus residuos y la industria obtiene un producto sustentable, beneficiando así al medio ambiente”. Las dimensiones que conforman esta hipótesis son que actualmente las cafeterías no se hacen responsables del impacto ambiental de sus residuos de café y que la industria adquiere un carbón activado con una mayor huella de carbono.

Para lograr esta hipótesis, se debe intervenir con actividades (Figura 1) que se traducen en los productos como un servicio de recolección de bagazo de café (Figura 1). El éxito del proyecto se medirá a través del resultado intermedio de los productos (Figura 1). Donde, a largo plazo, el impacto positivo de nuestro emprendimiento socioambiental de café lo podremos medir teniendo cafeterías más ecológicas, entre otras (Figura 1). También es importante definir los riesgos si se emprende (Figura 1); por ejemplo, si existe poco interés en el servicio de recolección, entonces se replantea todo. Cada elemento de la teoría del cambio debe contar con un indicador (incluidos los riesgos).

Posteriormente, será necesario establecer el modelo de negocios en un canvas de emprendimiento socioambiental (Figura 2). El modelo Canvas es una herramienta de gestión para analizar y crear modelos de negocio de forma simplificada y visual. Se toma en cuenta objetivo, impacto, problemática, soluciones y actividades clave, recursos, socios y actores clave, segmentos de clientes y beneficiarios, propuesta de valor social-cliente, ventajas diferenciales, canales de comunicación, costos, ingresos y el surplus (inversión de beneficios) (Daou et al., 2020). Como se muestra en la Figura 1, el haber realizado la teoría de cambio facilita la elaboración del canvas.

Figura 1. Representación esquemática de una teoría de cambio.

TEORÍA DE CAMBIO					
Hipótesis a "probar"	Al implementar un servicio de recolección de bagazo de café en cafeterías y transformarlo en carbón activado, las cafeterías se responsabilizan de sus residuos y la industria obtiene un producto más sustentable, beneficiando así al medio ambiente				
Fases	Necesidad	Intervención	Producto	Resultado intermedio	Impacto
Conceptos	Problema a abordar	Actividades	Consecuencias directas de las actividades	Cambios que resultan de los productos	El objetivo final de la intervención
Dimensión	Las cafeterías no se hacen responsable del impacto ambiental de sus residuos de café y la industria adquiere un carbón activado con mayor huella de carbono.	*Recolección de bagazo *Transformar bagazo en carbón activado *Vender Carbón Activado *Generar reportes ambientales *Ubilidad sobre impacto positivo de cafeterías.	*Servicio de recolección de bagazo de café *Carbón Activado sustentable *Reporte ambiental (huella de carbono para cafeterías *Post en RRSS y WEB sobre el impacto positivo ambiental *Constancia cafetería en pro del medio ambiente para cafeterías	*Cafeterías responsables de residuos de café *Disminución del impacto ambiental *Uso de CA sostenible en la industria *Satisfacción de cafeterías al impactar positivamente *Interés de clientes hacia un consumo responsable	*Cerrar el círculo del café *Cafeterías ecológicas *Reducción de GEI *Consumidores de café responsables con el ambiente. *Industria que utiliza CA se vuelve más sustentable
Supuestos	*Cafeterías no saben que acciones realizar para disminuir impacto ambiente *No hay materia prima sustentable para la industria *Interés de personas hacia lugares y empresas verdes	*Captación adecuada de residuos reduce la huella de carbono. *Se introducen los residuos a la economía circular produciendo un nuevo producto más sustentable *Post en RRSS y Web son de interés para los consumidores finales	*Se tiene un servicio de recolección que ayuda a las cafeterías a impactar positivamente *Se produce un CA sustentable *Post en RRSS y Web generan interés por consumo responsable	*Cafeterías felices al impactar positivamente y buscan maneras de ser + ecológicas *Más clientes consumidores *Consumidores felices de consumir responsablemente *La industria que usa el CA es más sustentable	* - contaminación en rellenos sanitarios * - cambio climático * + cafeterías se hacen ecológicas * + consumidores responsables *Carbón activado con ciclo de vida ecológico *Proceso de economía circular
Riesgos	*Poco interés de cafeterías por el medio ambiente *A los consumidores no les interesa el consumo responsable	*No hay recolección sustentable *No tener inversión para la transformación del bagazo *Los post y página web no son atractivos para los consumidores	*Cafeterías no contactan el servicio de recolección *Ya existe servicios de recolección *La producción de CA no es verde *No hay un engagement de los consumidores hacia el medioambiente	*Cafeterías no sienten que mejoran el ambiente *Los consumidores no aumentan por no interés de consumo responsable *Las industrias que usa CA no le interesa ser más verde	*Contaminación de suelo, agua y aire *Calentamiento global *Producción y consumo irresponsable

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Representación esquemática de un CANVAS de modelo de negocio socioambiental.



Fuente: Elaboración propia.

Plan de negocio: de la idea al negocio

Después de analizar el problema de un residuo y diseñar un modelo de negocios, es esencial trasladar este modelo a la realidad de una economía circular mediante la creación de un plan de negocios. Este plan actúa como una hoja de ruta, definiendo los objetivos, estrategias y recursos necesarios para convertir la idea en un negocio viable. También es crucial para atraer inversores y asegurar financiamiento. Debe incluir la descripción del modelo de negocio, un análisis de mercado detallado, una estrategia de marketing y ventas, proyecciones financieras y una matriz de riesgos (Fichter y Tiemann, 2020). A continuación, se explicarán las secciones de un plan de negocios.

1. Descripción de la empresa. Debe incluir datos básicos como nombre, ubicación, historia, estructura legal, misión, visión, equipo directivo e hitos destacados de la empresa. Además, se detallan los siguientes puntos cruciales:

- El producto o servicio: características, beneficios, ventajas competitivas.

- El mercado objetivo: nichos específicos y satisfacción de necesidades.
- La estrategia competitiva: calidad del producto, precio, innovación, servicio al cliente o excelencia operativa.
- Los desafíos y oportunidades: los factores externos que pueden afectar el éxito de la empresa y cómo se pueden superar esos desafíos.

Los puntos cruciales de la descripción de la empresa se ejemplifican en nuestro caso de estudio de bagazo de café (Figura 3).

Figura 3. Análisis de mercado en el startup de bagazo de café.

"La empresa destaca en la economía circular al transformar residuos de café en carbón activado, ofreciendo servicios de recolección a cafeterías y empresas. El carbón activado, se utiliza en suplementos alimenticios, tratamiento de agua y purificación de aire. Cuenta con precio competitivo, reduciendo la dependencia de fuentes tradicionales y mitigando el impacto ambiental. La empresa se diferencia al ofrecer soluciones sustentables de recolección, gestión de residuos de café y un producto de origen más sustentable. Se dirige a mercados objetivos de diversos segmentos. En el caso de recolección, a cafeterías de especialidad, franquicias, productores de extractos de café, y en el caso del carbón activado, a industrias de suplementos alimenticios, farmacéutica, tratamiento de agua, alimenticia y de bebidas, y purificación de aire. La estrategia competitiva se basa en producción sostenible y mitigación del impacto ambiental. Los desafíos incluyen competencia, regulaciones y educación ambiental del mercado, pero la empresa está bien posicionada para superarlos gracias al enfoque sostenible y las colaboraciones estratégicas, aprovechando el crecimiento de la conciencia ambiental"

Fuente: Elaboración propia

2. Análisis de mercado. Esta sección examina el tamaño, la competencia, las tendencias y las oportunidades del mercado. Se describen los siguientes puntos:

- Recopilación de datos demográficos de demanda.
- Tendencias y patrones de consumo: compra y crecimiento del mercado.
- Analizar la competencia para evaluar fortalezas: debilidades, precios, canales de distribución y estrategias de marketing.
- Investigación del mercado primario con ayuda de expertos.
- Evaluar la demanda del producto.
- Evaluar factores externos que pueden afectar el mercado y que presentan oportunidades o desafíos significativos.

El análisis del mercado se ejemplifica en nuestro caso de estudio de bagazo de café en la Figura 4.

Figura 4. Análisis de mercado en el startup de bagazo de café.

"México destaca una demanda significativa de carbón activado en sectores como el tratamiento de agua, purificación de aire, alimentos y bebidas, minería, y suplementos alimenticios. Existe competencia de comercializadores internacionales y productores locales, por lo que es crucial ofrecer productos de alta calidad certificados por instancias internacionales y nacionales. Se puede aprovechar como ventaja estratégica de marketing el resaltar la sostenibilidad. Hay desafíos, aunque el consumidor final valora cada vez más productos y prácticas sostenibles. En el servicio de recolección, las cafeterías y productores de extractos de café comprometidos con el medio ambiente son los principales clientes. La empresa se distingue por realizar la recolección de bagazo de café y necesita una logística de recolección eco-amigable. Para consolidarse en ambos mercados se debe diversificar en productos y servicios; priorizar la sostenibilidad; desarrollar una sólida estrategia de marketing; y ofrecer incentivos que resalten los beneficios ambientales y económicos"

Fuente: Elaboración propia

3. Estrategia de marketing y ventas. Se explica cómo se promocionarán y venderán los productos o servicios. Se describen los siguientes puntos:

- Objetivos de marketing y ventas: claros y específicos.
- Posicionamiento y propuesta de valor que define beneficios y diferencias clave.
- Establecimiento de estrategia de precios en función de costos, demanda del mercado, valor percibido por clientes y análisis de la competencia.
- Canales de marketing efectivos para llegar al público objetivo.
- Plan de comunicación y promoción.
- Canales de distribución y planificación: logística del servicio y productos.
- Metas, sistema de seguimiento y análisis donde se establecen métricas y herramientas para evaluar el desempeño de las estrategias.

La estrategia de marketing y ventas para el caso de estudio se puede resumir en la Figura 5.

Figura 5. Estrategia de marketing y ventas en el startup de bagazo de café.

"La estrategia de marketing y ventas de la empresa se enfoca en generar conciencia de marca, educar al mercado y establecer una reputación de calidad a través de la creación de contenido educativo, participación en eventos y alianzas estratégicas. La propuesta de valor para el servicio de recolección incluye soluciones personalizadas y atención al cliente excepcional, validando compromisos ambientales mediante reconocimientos y publicaciones en redes sociales. Para la venta de carbón activado, la empresa ofrece un producto ecológico que reduce residuos y huella de carbono. Los precios se fijan en 4.70 MXN por kilogramo de residuos recolectados y 330-130 MXN por kilogramo de carbón activado grado alimenticio-purificación de agua y aire. La estrategia de marketing utiliza canales como sitio web y redes sociales, mientras que la distribución se realizará mediante un enfoque B2B. Las metas incluyen la generación de leads cualificados y el reconocimiento de marca, con indicadores como el número de leads generados, tasa de conversión, alcance y frecuencia de publicaciones, e interacciones en redes"

Fuente: Elaboración propia

4. Proyección financiera. Provee estimación de resultados financieros futuros para evaluar la viabilidad financiera, identificar oportunidades y desafíos, y tomar decisiones. En secciones posteriores se describirá más a profundidad, pero se deben considerar los siguientes puntos:

- Ingresos proyectados: precios de venta, tamaño de base de clientes y estrategia de comercialización.
- Costos y gastos: adquisición de equipos y maquinaria, materia prima, mano de obra, gasto operativo y de marketing.
- Análisis de rentabilidad: margen de beneficio bruto-neto, el punto de equilibrio y el retorno de la inversión.
- Escenarios y sensibilidades: posibles cambios de ingreso, costos y gastos proyectados.

5. Matriz de riesgos. Esta sección analiza riesgos para anticiparse y gestionar su mitigación. Al enumerarlos, se distribuyen en una matriz en función de probabilidad de ocurrencia y nivel de severidad de impacto.

Ejemplos de identificación de riesgos en matriz para el caso de estudio podrían ser:

- Riesgo muy alto: Demanda de carbón activado insuficiente con una probabilidad de ocurrencia moderada y nivel de impacto catastrófico.
- Riesgo alto: Competencia intensa con una probabilidad de ocurrencia probable y nivel de impacto moderado.

- Riesgo medio: Mala reputación en redes sociales y opinión pública con una probabilidad de ocurrencia improbable y nivel de impacto moderado.
- Riesgo bajo: Dependencia de proveedores clave con una probabilidad de ocurrencia muy improbable y nivel de impacto menor.

Medición de impacto

Se debería tener en mente el impacto socioambiental positivo y negativo. Esto es necesario para promover transparencia y rendición de cuentas ante clientes, inversores y reguladores en informes de sostenibilidad; facilitar la mejora continua para minimizar impactos negativos; fortalecer la credibilidad y reputación; asegurar el cumplimiento con normativas ambientales y sociales, y atraer a inversores responsables.

En el caso de estudio presentado, se podrían identificar los siguientes impactos junto con sus indicadores correspondientes:

- Reducción de residuos: Cantidad de residuos recolectados y transformados (kg); Reducción en la cantidad de residuos enviados a vertederos (kg).
- Disminución de la huella de carbono: Reducción en las emisiones de CO₂.
- Concienciación ambiental: Número de cafeterías con servicio de recolección; Número de personas que participan y son alcanzadas en redes sociales.
- Mejora de la calidad del aire y agua: Cantidad de carbón activado vendido para purificación (kg); Número de instalaciones utilizando carbón activado.
- Consumo de agua y energía: Proporción de agua y energía usada y reutilizada en las operaciones.
- Producción de Desechos Industriales: Desechos industriales generados (kg).

Finanzas

Toda empresa necesita ser sostenible para ser exitosa y las empresas enfocadas en la economía circular no son la excepción. La idea es ven-

der el carbón activado, pero de esto salen muchas preguntas: ¿Cuánto cuesta mi materia prima?; ¿Quién lo vende?; ¿Quién lo compra?; ¿Qué especificaciones tiene?; ¿En dónde lo utilizan?

Para validar la viabilidad del proyecto, es crucial realizar un análisis de mercado de nuestro producto. Esto implica investigar los costos, los compradores potenciales y los usos del producto en el mercado real, además de consultar fuentes en línea. Estos datos nos permitirán diversificar nuestros productos y establecer un precio promedio por unidad. Además, al calcular el costo de producción, podemos determinar la ganancia bruta utilizando la fórmula correspondiente a la ecuación 1.

$$\% \text{ Ganancia bruta} = \frac{\text{Costo de producción}}{(\text{Precio de venta} \times 100)} \quad (1)$$

Con la ganancia bruta se establece el precio de venta correspondiente. Al compararlo con la investigación de campo y verificar nuestra competitividad en el mercado, se calcula el margen bruto con la ecuación 2.

$$\text{Margen bruto} = \text{ingresos de venta} - \text{Costo de producción} \quad (2)$$

Y con esto la utilidad de operación que incluye los gastos administrativos y de venta con la ecuación 3.

$$\text{Utilidad de operación} = \text{Margen bruto} - \text{Gastos administrativos y de venta} \quad (3)$$

Aquí viene algo más avanzado que no es esencial al inicio de los cálculos para un emprendimiento que está iniciando el estudio de mercado: la utilidad antes y después de impuestos con la ayuda de las ecuaciones 4, 5 y 6.

$$\text{Utilidad antes de impuestos} = \text{Utilidad de operación} - \text{depreciaciones} - \text{gastos financieros} + \text{Gastos financiero} \quad (4)$$

(5)

$$\text{Utilidad neta} = \text{Utilidad antes de impuestos} - \text{Impuestos (16 \%)}$$

(6)

$$\text{Utilidad neta} = \text{Utilidad antes de impuestos} - (\text{Utilidad antes de impuestos} * 0.16)$$

Si nuestra ganancia bruta, margen bruto y utilidad neta son positivos, ya tenemos una ventaja. Con esta información, podemos calcular el flujo de efectivo neto (ecuación 7) que se calcula para un período de 5 años (dependiendo de la inversión inicial y los planes de pago), donde en el primer año se resta toda la inversión inicial, y a partir del segundo año se consideran los ingresos por ventas, el costo de producción y los costos administrativos. Se incluyen impuestos y el pago de deudas, si las hay.

(7)

$$\text{Flujo de efectivo Neto} = \text{Ingresos} - \text{Costos} - \text{Gastos} - \text{Pago de deuda} - \text{Impuestos(16 \%)}$$

También se calculan el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y la rentabilidad sobre la inversión. Donde r es igual a 12 % para casos prácticos.

(8)

$$VAN = VNA(r, \text{año1: año5}) + \text{año0}$$

(9)

$$TIR = TIR(\text{año0: año5})$$

(10)

$$\text{Rentabilidad sobre la inversión (RI)} = \frac{VAN}{\text{Flujo de efectivo Neto año0}} \times (-1)$$

Si el VAN es mayor que 0, entonces la empresa es rentable; por lo contrario, si es negativo, entonces mejor ni empezamos a invertir ($VAN > 0$). Si nuestro TIR es mayor que r (12 %) entonces el proyecto es rentable ($TIR > r$) y esto es igual para la rentabilidad sobre la inversión ($RI > r$).

Es poco probable que obtengamos resultados positivos a la primera. Debemos ser realistas con nuestra inversión y considerar todos los gastos, incluso el café en la oficina. Si los resultados son negativos, debemos revisar costos, inversión inicial y producción. Si persisten los problemas, observamos a la competencia y consideramos diversificarnos, especialmente con la ayuda del área de marketing. No comencemos nada si los resultados son negativos, pues solo perderemos tiempo. En el caso de estudio, debemos aumentar la producción de carbón activado, lo que incrementaría los costos y crearía un círculo vicioso. A corto plazo, la diversificación es la solución para evitar aumentar la inversión inicial. Esto implica ofrecer capacitaciones, asesorías y vender el carbón activado al mejor postor, explorando áreas como el e-commerce. Luego, recalculamos con los ingresos esperados de estos productos diversificados hasta obtener resultados positivos.

Alianzas

Continuando, parece que nuestra situación financiera ya está clara, y hemos consultado a nuestro equipo de marketing, o en nuestro caso, a un amigo para que nos oriente un poco. Ahora necesitamos identificar quiénes pueden ayudarnos, y esto lo ubicamos en el canvas. Las alianzas estratégicas pueden ayudarnos a alcanzar nuestros objetivos y ser competitivos, además de hacer nuestro negocio más transparente y confiable. Estas alianzas pueden ser en áreas de relaciones públicas, comunicación, tecnología, industria o comercio. En nuestro caso, es evidente que buscaremos alianzas con cafeterías, farmacias, fabricantes de filtros, productores de productos de belleza y cualquier entidad relacionada con el consumo de carbón activado y la logística de su producción. Sin embargo, hay actores menos obvios, como el gobierno, otras empresas de economía circular y los mismos productores de carbón activado, donde encontramos oportunidades de diversificación. También están las incubadoras de negocios socioambientales, que pueden ser de gran ayuda en la capacitación y, lo más importante, en la búsqueda de alianzas estratégicas. La pregunta es, ¿cómo atraemos estas alianzas? Lo principal es utilizar un “pitch” o “Pecha Kucha”. Este debe abordarse según los siguientes puntos: inicio,

problema, solución, modelo de negocios, resultados, impacto, ruta de crecimiento, el equipo y despedida. Estos puntos deben ser resumidos al máximo, claros y directos. Un ejemplo del pitch para nuestro caso de estudio lo podemos observar en la Figura 6.

Figura 6. Pitch en el startup de bagazo de café.

Hola- Somos Ecotech VIESMA y este es nuestro proyecto Innovacarb. Nunca ha sido mejor la combinación café y agua.

¡En MEX no nos llega agua potable a casa! Para eso, es necesario un producto llamado “Carbón Activado”. Este sirve para la adsorción de compuestos contaminantes que se encuentran en el agua. Además, le producto puede utilizarse en diversos usos como en la industria cosmética.

El Problema es que, en MEX no utilizamos nuestros recursos para prepararlo. En cambio, contaminamos es su importación a nuestro país. Además, el insumo que se utiliza en su producción es, en su mayoría, cascara de coco y madera, no existiendo una diversificación en su fabricación.

Por otro lado, ¿sabían que en MEX existe una cantidad de 17 ton/año de residuo de café? ¡¡¡Imagínense convertir estos residuos para purificar el agua!!

Y nosotros tenemos la solución: INNOVACARB utiliza el bagazo de café como materia prima para su transformación y producción sostenible a carbón activado. Así, incorporamos un modelo de negocio enfocados en crear un sistema de recolección de residuos de café, para su conversión en CA y posterior comercialización en la industria cosmética y de tratamientos de agua. Paralelamente generaremos alianzas con ONG's que trabajen en llevar aguas a zonas.

Por ello, nuestro impacto y visión es que: no existe producción de CA con equilibrio de viabilidad económica, ecológica y rendimiento de producción. Así, generamos un CA de misma capacidad y calidad, a partir de residuos de café desechados, creando un proceso de economía circular.

Nosotros requerimos alianzas con Cafeterías que nos proporcionen nuestra materia prima, alianzas con Universidades que nos permitan caracterizar nuestro producto, y alianzas con ONGs para que utilicen nuestro producto en llevar agua a las zonas marginadas. Para poder lograr tener nuestras ciudades y comunidades sostenibles.

Nosotros somos Ecotech VIESMA conformados por Deborah y Fernando de Guadalajara, teniendo ese mismo ideal y pasión; y este es nuestro proyecto INNOVACARB”

Fuente: Elaboración propia

¿Pueden reconocer cada punto que mencionamos en los puntos? Deben comunicarlo en 3 a 5 minutos. Pueden utilizar herramientas como historias cautivadoras, casos impactantes o datos relevantes; todo depende de quién sea la posible alianza estratégica. Es crucial estudiar bien a tu aliado potencial antes de la presentación. Después de captar su atención, lo más importante es el seguimiento. Desde nuestra experiencia, este paso es crucial y hemos perdido muchas alianzas por descuidarlo. Recuerda: “El no ya lo tienes”. Si te rechazan, no te preocupes, es parte del proceso. Sigue contactando, muestra mejoras, mantén la transparencia, establece y cumple con una agenda, y realiza monitoreos continuos.

Retos y soluciones

En el caso de estudio de economía circular, nos hemos encontrado con algunos retos inesperados (problema) (Figura 7). Esperábamos una recepción positiva por cafeterías, pero encontramos que solo los trabajadores jóvenes estaban interesados, mientras que los encargados no mostraban tanto interés. Algunos dueños incluso consideraban que quedar con los residuos era un favor. Además, descubrimos que parte de nuestro insumo se entregaba a otras personas, lo que nos llevó a buscar contratos de exclusividad que resultaron poco efectivos. Las instituciones gubernamentales también presentaron desafíos, ya que las directrices sobre recolección y reúso no están claras y se centran en grandes generadores e industrias. Finalmente, enfrentamos el problema del retorno de inversión, subrayando la importancia de hacer cálculos precisos y no confiar únicamente en intuiciones.

Ahora sin ver las soluciones (solution) de la Figura 7, imaginen esta situación y piensen cómo resolver estos problemas. Si su solución es similar a la nuestra, es hora de emprender en economía circular. Si no, no se preocupen, estábamos en la misma situación. Cuando alguien no quiere colaborar, lo mejor es convencerlo ofreciéndole un incentivo. Si eso no funciona, no gastes energía y sigue adelante. Para problemas más complejos, es crucial aprender a delegar y buscar cuidadosamente asesoría de abogados y especialistas. En cuanto al retorno de inversión, realiza cálculos y ajusta estrategias según sea necesario. Confiar en tu conocimiento es clave.

Figura 7. Retos y soluciones encontrados en el caso de estudio.

Problem	Description	Solution
No hay interés en el pago de recolección	Las cafeterías no quieren pagar la recolección, sobre todo las cafeterías grandes	Darles un pago, buena propaganda y facilidades de pago
Cafetería piensa que vos da un producto	A algunas cafeterías piensan que vos dan un producto y querrán pago por eso. Es decir, no se hacen cargo de sus residuos	No hacer tratos con ellos
Requerimientos no claros	Requerimientos no claros por parte de instituciones regulativas públicas	Asesorarse con abogados externos
Contratos y exclusividad	Contratos con las cafeterías y empresa que consumen carbon activado	Asesorarse con abogados externos
Retorno de Inversión!!	Que todo el proyecto no sea viable económicamente	Hacer un buen estudio en línea y físico del producto. Realizar estudio de campo con todos los actores, y variar los productos y servicios ofrecidos

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones: un mundo de empresas económicamente circulares

La creación de empresas de economía circular presenta una perspectiva prometedora para la sostenibilidad, con ventajas significativas como la reducción de residuos, la promoción de la reutilización de materiales y la disminución de la huella de carbono, contribuyendo a la conservación de recursos naturales y la mejora ambiental.

Sin embargo, también enfrenta desventajas y retos, como los altos costos iniciales de implementación, la necesidad de desarrollar infraestructuras adecuadas y la resistencia al cambio en mercados tradicionales. Para superar estos desafíos, es crucial invertir en tecnologías innovadoras y diversificar en productos y servicios de la empresa, establecer políticas de incentivo para prácticas sostenibles y fomentar la colaboración entre gobiernos, empresas y comunidades; y, por supuesto, hacer tus cálculos financieros. Además, la educación y concienciación sobre los beneficios de la economía circular pueden acelerar la adopción de estas prácticas, facilitando una transición más suave y efectiva hacia modelos de negocio más responsables y resilientes.

Si nosotros somos realistas y queremos hacer un cambio en el paradigma en el que estamos, debemos ser más inteligentes y persistentes.

Tenemos herramientas y, para empezar, no necesitas un gran asesoramiento, solo tu capacidad de ver una solución a un problema.

Referencias

- 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(July), 110007. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110007>
- Daou, A., Mallat, C., Chammas, G., Cerantola, N., Kayed, S. & Saliba, N. A. (2020). The Ecocanvas as a business model canvas for a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120938. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120938>
- Fichter, K. & Tiemann, I. (2020). Impacts of promoting sustainable entrepreneurship in generic business plan competitions. *Journal of Cleaner Production*, 267, 122076. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122076>
- García, E. (2019). Análisis de los factores determinantes de la intención de consumo de café Sostenible. *Diferencias entre los consumidores de México y España*. 1–62. <https://investigacion.unirioja.es/documentos/5fbf7e5a299952682503c547/f/5fbf7e5a299952682503c546.pdf>
- IndexBox Inc. (2023, October 20). Mexico's import of activated carbon dives to \$6.9M in June 2023. News and Statistics - IndexBox. <https://www.indexbox.io/blog/mexico-activated-carbon-imports-june-2023/#:~:text=In%20June%202023%2C%20the%20United%20States%20%281.1K%20tons%29,volume%20from%20the%20United%20States%20stood%20at%20-4.6%25>
- International, E. & Agosto, A. (2017). Introducción resumen metodología tamaño de mercado motivadores y tendencias de consumo características del café distribución nacional Retail Foodservice Institucional Tendencias Locales Apéndice. https://amecafe.org.mx/wp-content/uploads/2017/08/Euromonitor_Informe_Análisis-de-consumo-2016-AMECAFE-Final.pdf
- Mattos, C. A., Scur, G. & Albuquerque, T. L. M. (2022). Evaluation of

- circular business model: Theory of Change approach. *Evaluation and Program Planning*, 92(March), 102069. <https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2022.102069>
- Rolewicz-Kalińska, A., Lelicińska-Serafin, K. & Manczarski, P. (2020). The circular economy and organic fraction of municipal solid waste recycling strategies. *Energies*, 13(17). <https://doi.org/10.3390/en13174366>
- Stylianou, M., Agapiou, A., Omirou, M., Vyrides, I., Ioannides, I. M., Maratheftis, G. & Fasoula, D. (2018). Converting environmental risks to benefits by using spent coffee grounds (SCG) as a valuable resource. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(36), 35776–35790. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2359-6>
- Yusufoğlu, B., Kezer, G., Wang, Y., Ziora, Z. M. & Esatbeyoglu, T. (2024). Bio-recycling of spent coffee grounds: Recent advances and potential applications. *Current Opinion in Food Science*, 55, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2023.101111>

Capítulo 3

Economía circular de residuos electrónicos en México: Alianzas y regulaciones para la sostenibilidad ambiental

*Hermes Ulises Ramírez Sánchez
Aida Lucia Fajardo Montiel
Samuel Horacio Cantú Munguía*

<https://doi.org/10.61728/AE20251635>



Resumen

El presente capítulo aborda la problemática en México sobre los residuos electrónicos, desde la óptica de la economía circular. El país genera un promedio de 1.2 millones de toneladas de residuos electrónicos cada año, lo cual posiciona a la nación como uno de los principales productores de América Latina. El documento analiza la obsolescencia programada y un aumento en los patrones de consumo. Se evidencia que solo el 10 % de los residuos electrónicos reciben un tratamiento apropiado. Así mismo, se describen iniciativas gubernamentales como el programa de Prevención y gestión integral de los residuos y la NOM-161-SEMARNAT-2011; se incluyen también algunos programas del sector privado impulsados por empresas como HP, Samsung y Apple, quienes promueven la implementación de buenas prácticas en la gestión de los residuos electrónicos. Este capítulo también examina algunos casos de éxito en países que han adoptado marcos legales que incluyen a la economía circular, tales como Japón y Francia. Se concluye que la transición hacia la economía circular no solo es una opción, sino una necesidad que impulse el desarrollo del país, todo esto a través del fomento de una mayor conciencia ciudadana.

Introducción

El modelo de la economía circular, considerado como una propuesta sostenible, permite reemplazar el viejo paradigma lineal “tomar, hacer y desechar”, que tantos estragos ha ocasionado sobre la explotación de los recursos. Este nuevo paradigma de pensamiento y de producción permite la reducción, reutilización y reciclaje de nuestros recursos (Ellen MacArthur Foundation, 2013). En el contexto de los residuos electrónicos, la aplicación de este modelo es sumamente relevante, dado que se ha experimentado un patrón de crecimiento exponencial durante las últimas décadas. Estas tasas de incremento en los residuos se deben a

múltiples razones, pero recientemente se ha experimentado un cambio sin precedentes, ya que el teletrabajo, por ejemplo, ha impulsado a que cada vez más personas utilicen dispositivos tecnológicos en todo momento.

Por lo tanto, a nivel global, la gestión de residuos electrónicos representa un reto ambiental y México no es la excepción. De acuerdo con información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el país generó un aproximado de 1.2 millones de toneladas de residuos tan solo en el año 2020. A simple vista, estas cifras no parecen relevantes; sin embargo, este volumen posiciona al país como uno de los principales generadores de residuos en América Latina (INEGI, 2021). En este tenor destaca la urgente necesidad en la implementación de estrategias basadas en un modelo de economía que permita una gestión correcta de estos desechos y, por ende, la mitigación de los impactos ambientales asociados.

La cantidad de residuos electrónicos generados en el país y su ascenso constante están acompañados por dos factores importantes; el primero es la obsolescencia programada y el segundo, un consumo exacerbado. Ejemplo de ello lo observamos en equipos como dispositivos móviles, equipos de cómputo y algunos otros electrodomésticos, los cuales representan una porción significativa de los residuos generados. Según detalla la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), tan solo el 10 % de todos los residuos electrónicos generados conlleva un proceso de reciclaje apropiado, y alrededor del 90 % restante está expuesto, ya sea a un manejo informal o, en el peor de los casos, son depositados en rellenos sanitarios, generando impactos colaterales como la liberación de toxinas al medio ambiente (SEMARNAT, 2020).

Recientes fenómenos como lo fue la pandemia por COVID-19 han tenido un impacto significativo sobre la generación de residuos electrónicos. En este período de azote de la pandemia fue necesaria la reorganización en las formas de trabajo, estudio y modelos de producción en México y el mundo. Durante el periodo de emergencia sanitaria se experimentó un incremento en el consumo de dispositivos electrónicos como computadoras, tablets, teléfonos portátiles y algunos otros equipos necesarios para poder llevar a cabo el teletrabajo y la educación a distancia (Forti et al., 2020).

Según indicadores del Global E-waste Monitor 2020, la generación de residuos electrónicos incrementó un 21 % a nivel global en el período comprendido entre el año 2014 y 2019, lo cual se traduce en una cifra de 53.6 millones de toneladas en el año 2019. Es de esperar que este ascenso continúe hasta alcanzar las 74.7 millones de toneladas para el año 2030 (Forti et al., 2020). Siguiendo estas cifras, en México se reportó un incremento bastante significativo, ya que en el año 2015 se contabilizó la generación de 900 000 toneladas de dicho residuo vs. 1.2 millones de toneladas en el 2020, un incremento del 33 % tan solo en cinco años (INEGI, 2021).

El incremento en la cantidad de residuos electrónicos en nuestro país resalta la urgente necesidad de implementar estrategias basadas en una economía circular. Estos modelos tienen la garantía de enfrentar desafíos ambientales y de salud asociados con los desechos electrónicos; así mismo, tienen la capacidad de impulsar el desarrollo económico a través del aprovechamiento y disminución en la explotación de los recursos naturales.

Residuos electrónicos y la cultura del descarte

Nuestra sociedad actual se caracteriza por experimentar tendencias en el uso y desechode los productos en lugar de repararlos o utilizarlos para otro fin. Esta condición ha sido uno de los principales motores que impulsan el incremento en el consumo y la posterior generación de residuos; actualmente, es más fácil adquirir otro dispositivo electrónico que procurar su reparación. Esta clase de comportamiento está impulsada por diversos factores, entre ellos la obsolescencia tecnológica, un marketing cada vez más agresivo que promueve la idea de que lo nuevo siempre es lo mejor y una mentalidad que valora mucho más el consumo que la sostenibilidad (Cucchiella et al., 2015).

Los factores tecnológicos de los dispositivos son otro componente clave en la cultura del descarte. El concepto de obsolescencia programada analiza cómo muchos productos han sido intencionalmente diseñados para tener una vida útil muy corta. Algunos factores son los componentes de una baja calidad que coincidentemente fallan en el momento de expirar

la garantía; así mismo, el diseño en la imposibilidad de reparar algunos componentes, como remaches en lugar de tornillos, piezas que van selladas o pegadas y que al momento de intentar realizar reparaciones se quiebran o se dañan algunos otros elementos del dispositivo.

Estos patrones intencionales en la fabricación generan un ciclo de consumo, ya que obligan al usuario a reemplazar con frecuencia y, por ende, incrementar los residuos generados (Ongondo et al., 2011). Adicional a esto, la ausencia de políticas que incentiven la reparación o la reutilización agudiza aún más el problema, dejando así al consumidor con pocas o nulas opciones para salir de este círculo de consumo.

La estrategia de la obsolescencia programada, en donde la vida útil está calculada de manera deliberada para ser más corta, incentiva a los consumidores a reemplazarlos con mayor frecuencia. Esta práctica tuvo su origen en la década de los años veinte, cuando los productores de bombillas y electrodomésticos comenzaron a limitar la durabilidad de los productos con un único objetivo: incrementar las ventas (Slade, 2007). Desafortunadamente, esta táctica sigue vigente hasta nuestros días, sin regulaciones, sin penalizaciones y sin un plan lógico por parte de los productores o los gobiernos que logre parar este gran desafío de producción, consumo y desecho.

El consumo de teléfonos móviles en México es un claro ejemplo de este problema, ya que es uno de los sectores mayormente afectados por este fenómeno. Un estudio realizado por la Asociación Nacional de Telecomunicaciones (ANATEL) identifica que la vida útil de un teléfono móvil en México es tan solo de 24 meses, por lo cual, una vez transcurrido este tiempo, los usuarios buscan reemplazarlo por un modelo más nuevo (ANATEL, 2019).

Se estima que en 2020 fueron vendidos más de 30 millones de teléfonos celulares en México, cifra que contribuye de manera significativa en la producción de 1.2 millones de toneladas de residuos electrónicos contabilizados en ese mismo año. Consecutivamente, los usuarios de teléfonos celulares incrementan en gran medida; según datos del INEGI y el Instituto Federal de Telecomunicaciones, el teléfono celular es una de las tecnologías con mayor uso entre la población mexicana. Tan solo en el 2023, había 97.2 millones de usuarios de estos dispositivos, lo cual

representa un 81.4 % de la población nacional de 6 años o más de edad (INEGI, 2024).

Otro de los dispositivos que se encuentra sujeto también a las condiciones de la obsolescencia programada son los equipos de cómputo, tanto portátiles como de escritorio. Un estudio elaborado por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) pone de manifiesto que en las instituciones educativas dichos equipos tienen una vida útil de entre 3 y 4 años (UNAM, 2020).

En el año 2020, la cantidad de equipos de cómputo desechados en México alcanzó la cifra de 1.5 millones de unidades, y de este total menos de un 20 % llevó un proceso de reciclaje adecuado (INEGI, 2021). Esa tendencia es preocupante dado que la acumulación de residuos electrónicos se encuentra principalmente impulsada por la obsolescencia programada.

Hablando de electrodomésticos, especialmente de electrodomésticos tales como lavadoras, refrigeradores, microondas y algunos otros artículos, también están sujetos a experimentar obsolescencia. Según la Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO), se ha reducido drásticamente la vida útil de estos aparatos durante los últimos 20 años, situándose actualmente en un tiempo de uso de entre 6 a 8 años, antes de su reemplazo (PROFECO, 2019).

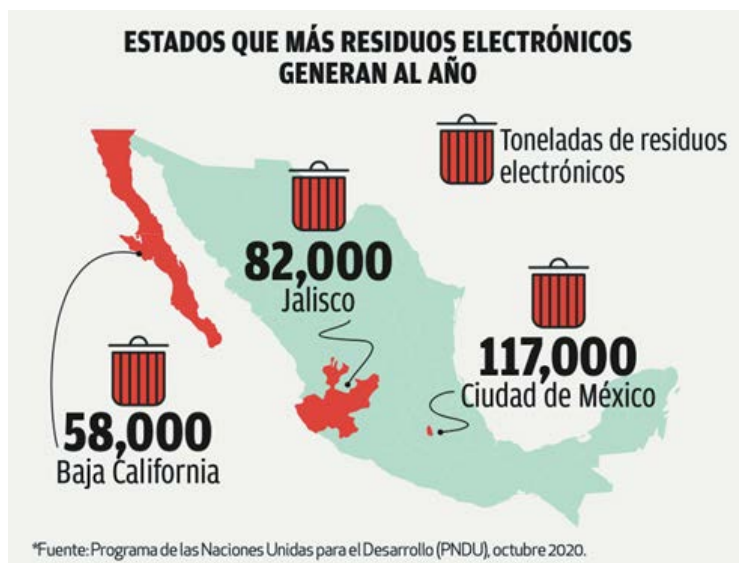
Iniciativas en la gestión de residuos en México

Debido a las cifras anteriormente expuestas, el gobierno mexicano se ha visto impulsado a fomentar una gestión responsable y a promocionar una economía circular en el sector de los residuos electrónicos. El Programa de Prevención y Gestión Integral de Residuos, que implementa la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Dicha estrategia busca promover la reducción, reutilización y reciclaje y tiene como primordial objetivo el establecimiento de una infraestructura apropiada para realizar dicha gestión de manera integral, incluyendo los residuos electrónicos (SEMARNAT, 2022).

Por otro lado, una de las regulaciones con mayor importancia en esta materia es la NOM-161-SEMARNAT-2011, la cual traza los criterios para la clasificación y manejo de los diferentes residuos de manejo especial.

Esta norma determina que los residuos en cuestión deben gestionarse de manera distinta y obliga a los fabricantes a desarrollar planes que incluyen un manejo que considere el reciclaje y la disposición final apropiados. Bajo este ámbito, la SEMARNAT ha registrado un incremento del 20 % en la gestión de residuos electrónicos (DOF, 2013).

El programa verde ANATEL, que lleva como lema “Dale un nuevo propósito a tu viejo celular”, enlista un total de 865 centros de acopio en el 2022. Según datos de PROFECO, los tres estados con mayor generación de residuos electrónicos se encuentran en Ciudad de México con 117 000 toneladas, Jalisco con 82 000 y Baja California con 58 000 (PROFECO, 2021).



Procuraduría Federal del Consumidor. (2021). Recicla tus dispositivos. Gobierno de México.

El Programa Verde ANATEL publicó en su listado de centros de acopio 2022 un total de 865 puntos de recolección, distribuidos de la siguiente manera por entidad federativa:

Entidad federativa	Centro de acopio
CDMX	120
Estado de México	109
Nuevo León	56
Jalisco	52
Baja California	45
Guanajuato	40
Sonora	39
Veracruz	39
Chihuahua	35
Puebla	31
Sinaloa	29
Tamaulipas	27
Coahuila	23
Querétaro	20
Michoacán	18
San Luis Potosí	17
Tabasco	16
Morelos	15
Hidalgo	14
Yucatán	14
Chiapas	12
Guerrero	12
Aguascalientes	11
Durango	11
Quintana Roo	10
Baja California Sur	9
Oaxaca	8
Campeche	7
Colima	6
Zacatecas	6
Tlaxcala	5
Yucatan	5
Nayarit	4
Total	865

Como puede observarse, México ha creado toda una infraestructura que aporta valor dentro del ciclo de consumo y reciclaje de estos aparatos electrónicos de gran demanda en nuestro país. En este punto, el tema de la educación y concientización ambiental es fundamental en este proceso de incorporación de buenas prácticas como nación.

Al respecto de la educación ambiental en México, CECADESU es el Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable; fue creado en 1994 como una pieza clave en la difusión, promoción y desarrollo de acciones en materia ambiental. CECADESU también ha sido un referente en el país para la publicación de libros y materiales didácticos en la materia (SEMARNAT, 2024).

El papel de la industria privada en la economía circular

La colaboración del sector privado y la coordinación con el gobierno mexicano han sido un pilar sobre el cual se sostienen iniciativas que incorporan principios de economía circular en la gestión de desechos electrónicos. Un ejemplo de esto es el programa HP Partner Program, a través del cual la empresa HP México pone a disposición un modelo efectivo de responsabilidad extendida.

El objetivo de HP Partner Program es la recolección y reciclaje de equipos electrónicos obsoletos, tales como impresoras, equipos de cómputo y otros accesorios. Este programa realiza una coordinación con diversas empresas que certifican el reciclaje de los dispositivos recolectados y garantizan un manejo adecuado de los residuos. Según datos de la propia compañía, desde su arranque, ha logrado la gestión de más de 100 000 toneladas de residuos en México (HP Inc., 2021).

La operación del programa se realiza desde los múltiples puntos de recolección, tanto en tiendas como en centros de servicio de HP, lo cual facilita la tarea a los consumidores en la devolución de los equipos electrónicos viejos o dañados. Adicional a esto, se ofrecen algunos incentivos como descuentos en nuevas compras por entregar equipos obsoletos. Este tipo de estrategias no solo fomenta el reciclaje, sino que también promueve la conciencia ambiental en los consumidores.

Ahora bien, el gobierno de México también ha aportado en el éxito de este programa, brindando apoyo, orientación y supervisión con el único

objetivo de asegurar que las prácticas realizadas se apeguen a la normatividad del país. Aún queda mucho por hacer, porque sabemos que los esfuerzos no pueden ser aislados, y el gobierno es un pilar fundamental en la transición y apoyo de estos programas.

Así como HP, existen algunas otras empresas tecnológicas en el mundo que han puesto en práctica modelos similares en México. Dichas empresas han implementado sus esfuerzos por ampliar la responsabilidad. Algunos ejemplos los encontramos con dos gigantes de la tecnología, como lo son Samsung y LG, quienes también han implementado programas de recolección y reciclaje de dispositivos electrónicos, en colaboración con centros locales. Esto ha aumentado la capacidad de gestión de residuos e incentivado nuevamente la conciencia ambiental.

En el caso de Samsung, ellos han establecido más de 100 puntos de recolección en el país. Según datos del fabricante, se han logrado reciclar más de 70 000 toneladas desde el nacimiento de su programa en el año 2017 (Samsung Electronics, 2021).

Acciones similares por parte de la empresa LG se han sumado a esta causa; a través de su programa “Life’s Good when you Recycle”, se ha logrado la recolección de más de 50 000 toneladas de residuos en el país desde el año 2018 (LG Electronics, 2021).

Otro de los gigantes de la tecnología es Dell, quien a través de su programa “Dell Reconnect”, en alianza con Goodwill Industries, Ha permitido a los consumidores la entrega de equipos electrónicos viejos en tiendas participantes, desde donde son recolectados y gestionados de manera responsable. En México, dicho programa ha establecido más de 80 puntos de recolección y se estima que ha reciclado alrededor de 30 000 toneladas desde su creación en el año 2015 (Dell Technologies, 2020).

La empresa Apple también se suma a esta clase de programas de reciclaje de sus productos. El enfoque de esta compañía es considerar los aspectos de reciclaje desde la etapa de diseño. De acuerdo con la empresa, la producción de equipos compactos requiere menor utilización de recursos. Así mismo, gran parte de los materiales utilizados en la fabricación de los dispositivos, como cristal libre de arsénico, aluminio y policarbonato sólido, son materiales recuperados por procesos de reciclado (Apple Inc, 2023).

Gracias a esta clase de iniciativas se ha visto un incremento del reciclaje en el país. Así mismo, y en virtud de la vigilancia e involucramiento por parte del gobierno en esta clase de iniciativas, las empresas dedicadas al reciclaje de residuos electrónicos han incrementado su capacidad operativa, asegurando hacerlo a través de procesos seguros y sustentables. Sin duda es una necesidad continuar incentivando esta clase de programas directamente con los fabricantes, ya que de esta manera se crea una cadena de valor que beneficia al medio ambiente y, por supuesto, a la economía circular.

El resultado de los esfuerzos combinados entre el gobierno y la industria privada comienza a ser el precedente para una transición hacia una economía circular en el manejo de los desechos electrónicos. Las empresas anteriormente citadas y la implementación de programas que faciliten al usuario la gestión de sus residuos demuestran un compromiso y responsabilidad extendida de los productores.

Desafíos globales y oportunidades para México

Como ya hemos podido observar, el incremento exponencial de los residuos electrónicos es una condición que se encuentra fuertemente vinculada con el rápido avance tecnológico y, como lo hemos revisado, con la obsolescencia programada. Aunado al impacto ambiental, es importante no dejar de lado las afectaciones sobre la salud pública, ya que esta clase de desechos contiene materiales altamente tóxicos (Forti et al., 2020).

La fragmentación en la cadena de valor es uno de los principales retos en la gestión efectiva de residuos a nivel global. Esta falta de cadenas de valor que integren una coordinación en las prácticas ocasiona una pérdida de recursos valiosos, principalmente en los procesos de reciclaje y reutilización (Cucchiella et al., 2015).

Estos grandes desafíos conllevan soluciones inteligentes, es por ello que la economía circular también se está transformando constantemente. La Responsabilidad Extendida del Productor (REP) es un ejemplo de ello. Este modelo responsabiliza al fabricante durante todo el ciclo de vida, incluyendo el final de la vida útil del producto.

Algunas otras estrategias dentro del modelo de economía circular contemplan el diseño del producto que aporte valor en el proceso de reciclaje y reutilización (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

Lograr la implementación efectiva de la economía circular en el manejo de los residuos en México enfrenta desafíos y dificultades que requieren una colaboración entre los diferentes niveles de gobierno y partes interesadas. Sin embargo, algunos países en el mundo han logrado este desarrollo y sirven como ejemplo en este proceso de transición.

La Unión Europea ha sido una de las potencias mundiales pioneras en la promoción de la economía circular como parte de su política. La directiva (2008/98/CE), reformada en el año 2018, establece obligaciones en la reducción de generación de residuos y promueve el reciclaje y reutilización. Establece metas concretas de reciclaje municipal y pretende transformar su economía hacia la neutralidad de carbono en el año 2050.

Japón, otra de las potencias mundiales que ha enfrentado escasez de recursos, ha adoptado el modelo de economía circular dentro de sus leyes desde el año 2000. En su legislación sobre reciclaje de electrodomésticos, aseguran que los productores recuperen y reciclen un importante porcentaje de sus productos una vez que finalizan su vida útil. Gracias a este mecanismo legal, Japón logra obtener tasas de reciclaje superiores al 80 % en algunos sectores.

Por su parte, Francia ha promulgado la Ley Antidesperdicio y Economía Circular en el año 2020, A través de la cual se busca la eliminación de residuos plásticos y fomentar el uso de productos reutilizables. Así mismo, esta ley introduce el término de “índice de reparabilidad”, el cual incentiva a los consumidores a elegir productos fáciles de reparar.

Inspirado en estos modelos exitosos, México se encuentra en un proceso para reformar la Ley General Para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, con el objetivo de incorporar la economía circular. La actual propuesta de reforma (2025) propone la incorporación de la economía circular como principio rector, la responsabilidad extendida del productor y la creación de incentivos y sanciones económicas.

Es de esperar que, tras su aprobación, se logre incentivar la valorización de los recursos reutilizables y se fomente la innovación en productos mejor diseñados, es decir, más duraderos y con capacidad de reciclaje.

Sin dejar de lado que este modelo permitirá mejorar ciertas condiciones económicas como la creación de empleos, mejora en la salud pública, reducción en la contaminación por esta clase de residuos y fortalecimiento de la responsabilidad social empresarial (Chedraui Peralta, 2025).

Conclusión

En este análisis que hemos realizado sobre la economía circular y la gestión de residuos electrónicos en México, ha quedado claro que México se encuentra en un punto crucial para transformar los desafíos en oportunidades.

La cultura de consumo que ha sido impulsada por la obsolescencia programada y algunas otras prácticas insostenibles ha provocado que México se posicione como uno de los mayores productores de residuos en América Latina. No por esto todo está perdido, ya que algunas iniciativas emergentes han demostrado un interés colectivo sobre la gestión responsable y la imperante necesidad de incorporación de modelos circulares.

Los programas que hemos revisado y que han sido implementados por empresas privadas como HP, Samsung, LG, Dell y Apple, solo por nombrar algunas, representan pasos significativos en la dirección correcta. Sin embargo, estas iniciativas solo atienden una pequeña parte del problema en general, ya que la literatura nos indica que únicamente el 10 % de los residuos electrónicos reciben un tratamiento adecuado.

Las actuales propuestas en las Reformas de Ley plantean un panorama prometedor, ya que la verdadera transición hacia una economía circular inicia desde el marco legal de un país, tal como se ha demostrado en Europa, Japón y Francia.

El proceso de transición requiere de mucha constancia e interés por parte de la sociedad en general. Sin lugar a duda, la promoción de la conciencia ambiental es una realidad que tiene que ser bien abordada en nuestro país, ya que el presente documento tan solo aborda el problema relacionado con los residuos electrónicos, pero los restos ambientales en el país son mucho mayores. En este contexto, la economía circular no solo es una propuesta, sino una medida imperante que ayudará a mejorar las condiciones de nuestro país.

Referencias

- AANATEL. (2019). *Informe Anual de la Asociación Nacional de Telecomunicaciones*. <https://www.anatel.org.mx>
- Apple Inc. (2023). Apple 2030: A plan as innovative as our products. <https://www.apple.com/environment/>
- Chedraui Peralta, A. (2025). *Iniciativa que reforma y adiciona diversas disposiciones de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, en materia de economía circular*. Secretaría de Gobernación. http://sil.gobernacion.gob.mx/Archivos/Documentos/2025/01/asun_4827978_20250115_1736972591.pdf
- Cucchiella, F., D'Adamo, I., Koh, S. L., & Rosa, P. (2015). Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 263-272. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.010>
- Dell Technologies. (2020). Dell Reconnect Program. <https://corporate.delltechnologies.com/en-us/social-impact/advancing-sustainability.htm>
- DOF. (2013). Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011. <https://www.dof.gob.mx>
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy Vol. 1: An economic and business rationale for an accelerated transition*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org>
- Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). *The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential*. United Nations University (UNU), United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) & International Telecommunication Union (ITU).
- HP Inc. (2021). *HP Partner Program: Recycling and Sustainability*. <https://www8.hp.com/us/en/hp-information/environment/hardware-recycling.html>
- INEGI. (2021). *Estadísticas a propósito del Día Mundial del Medio Ambiente*.
- INEGI. (2024). *Encuesta Nacional sobre Disponibilidad y Uso de Tecnologías de la Información en los Hogares (ENDUTIH) 2023* (Comunicado de prensa núm. 372/24). https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2024/ENDUTIH/ENDUTIH_23.pdf

- LG Electronics. (2021). *Life's Good when you Recycle Program*. <https://www.lg.com/global/sustainability>
- Ongondo, F. O., Williams, I. D., & Cherrett, T. J. (2011). How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes. *Waste Management*, 31(4), 714-730.
- PROFECO. (2019). *Informe Anual de la PROFEPA*.
- PROFECO. (2021). *Recicla tus dispositivos*. Gobierno de México. [https://www.gob.mx/profeco/es/articulos/recicla-tus-dispositivos?idiom=](https://www.gob.mx/profeco/es/articulos/recicla-tus-dispositivos?idiom=es)
- Samsung Electronics. (2021). *Sustainability Report 2021*. <https://www.samsung.com/global/sustainability/>
- SEMARNAT. (2020). *Informe de la situación del medio ambiente en México 2020*. <https://www.gob.mx/semarnat>
- SEMARNAT. (2022). *Prevención y gestión integral de los residuos*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/prevencion-y-gestion-integral-de-los-residuos>
- SEMARNAT. (2024). *CECADESU, referente en la educación ambiental en México*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat/educacionambiental/articulos/cecaquesu-referente-en-la-educacion-ambiental-en-mexico?idiom=es>
- Slade, G. (2007). *Made to Break: Technology and Obsolescence in America*. Harvard University Press.
- UNAM. (2020). *Estudio sobre el Ciclo de Vida de Computadoras en Instituciones Educativas*. <https://www.unam.mx>

Capítulo 4

Economía circular y la gestión del agua en México

Lourdes Graciela Cabrera Chavarría

Aída Lucía Fajardo Montiel

Samuel Horacio Cantú Munguía

<https://doi.org/10.61728/AE20251642>



Resumen

El presente capítulo aborda la crisis hídrica en México; se evidencia la progresiva agudización de las sequías en el país, entre los años 2019 y 2020. Ocasionados, por un lado, por el cambio climático y las consecuencias de mantener un paradigma lineal e insostenible en la gestión del agua. La economía circular se postula como un paradigma que permite la migración hacia una gestión sostenible y regenerativa; es el mecanismo a través del cual se rompería el ciclo “tomar, usar y desechar”. El artículo se centra en los casos en México en donde la sobreexplotación de acuíferos, contaminación y pérdida en las redes de distribución han ocasionado que el sistema enfrente crisis. Así mismo, se abordan las principales barreras que, de acuerdo con la OCDE, experimenta la región de Latinoamérica, entre las cuales destacan algunas debilidades regulatorias, la escasez de recursos financieros y la falta de conciencia de las partes interesadas. En este sentido, se realiza una reflexión sobre cómo México se encuentra ante una encrucijada decisiva, ya sea para continuar con el modelo actual de economía lineal o sentar las bases para la transición hacia una economía circular del agua.

Introducción

A nivel global, el desabasto de los recursos hídricos es una realidad; sin embargo, la percepción sobre este fenómeno puede no ser la misma en cada una de las regiones. Aquellas zonas con una alta demanda que no logra satisfacer las necesidades de su población tienen una percepción distinta de aquellas que habitan en zonas con alta abundancia del valioso recurso.

Los desafíos con relación a la explotación no solo del agua, sino del resto de los recursos naturales, se han incrementado durante el siglo XXI, y este fenómeno ha puesto de manifiesto la necesidad de abordar y gestionar el problema desde distintas ópticas y estrategias que se adapten a la complejidad del problema.

Bajo esta perspectiva, la economía circular surge como un paradigma sumamente prometedor para afrontar los retos ambientales y económicos derivados de esta sobreexplotación. El concepto de economía circular surge como una propuesta completamente revolucionaria, la cual se popularizó en los años noventa en China, en donde uno de los principales objetivos fue el de capitalizar el reciclaje de los materiales, buscando un equilibrio entre el crecimiento económico y la protección del medioambiente. Aunque no existe certeza sobre un único creador u origen del concepto, se han identificado contribuciones de autores como John Lyle (Estados Unidos), Michael Braungart (Alemania) y Walter Stahel (Winans, Kendall y Deng, 2017).

En el año 2002 se desarrolló un famoso concepto denominado “Cradle to Cradle” (De la cuna a la cuna); dicho concepto fue desarrollado por Michael Braungart y William McDonough. La propuesta de estos teóricos realiza un cambio sobre el paradigma que busca minimizar los impactos ambientales, un modelo que hemos visto de manera tradicional muy aceptado, incluso hoy en nuestros días. Esta nueva visión se enfoca en la eliminación del concepto residuo, transformándolo en entrada o alimento para otros procesos (Voorhuis y Gijbels, 2010).

En el año 2010, se creó la fundación Hellen MacArthur. Esta fundación lleva el nombre de su creadora y de quien se convirtió en la navegante solitaria más rápida en dar la vuelta al mundo en el año 2005. De acuerdo con la información de la página de la fundación, Hellen llevaba consigo lo que necesitaba y regresó con nuevos conocimientos sobre la forma en que funciona el mundo, como un lugar de ciclos entrelazados en donde las decisiones que tomemos el día de hoy afectan lo que ocurrirá el día de mañana. A pesar de haber pasado 71 días sola en el mar, confrontó la naturaleza de manera asombrosa, y es ahí donde ella comienza a reflexionar acerca de la fragilidad de los sistemas hasta la fecha construidos. Identificó que los recursos de su embarcación no difieren mucho de lo que ocurre a nivel global y es así como, tras esta experiencia, logra comprender de manera adecuada el concepto “finito” (Ellen MacArthur Foundation, sf).

Ellen considera que el modelo económico lineal en el que vive nuestra sociedad es defectuoso; en cambio, una economía basada en el uso de las cosas en lugar de agotarlas.

Economía circular en el sector hídrico

Aplicar la economía circular en la gestión del agua tiene diferentes implicaciones, que van desde la conservación (minimizar), la reutilización y reciclaje, en contraste con el modelo lineal que se basa solo en tomar, usar y desechar. De acuerdo con Urrea Vivas (2021), la gestión del agua basada en este modelo simula el comportamiento de los sistemas naturales, en donde el recurso se reutiliza una y otra vez en ciclos, lo cual permite convertir las aguas residuales en nuevos recursos.

De acuerdo con el informe de las Naciones Unidas, alrededor del 80% de las aguas residuales retornan a los ecosistemas sin ser tratadas o reutilizadas. Lo cual nos indica el fracaso del modelo lineal. Ahora bien, entre los principales impactos obtenemos que miles de millones de personas en el mundo carecen de acceso a servicios de agua potable y saneamiento y aproximadamente 40 % de la población mundial se ve afectada por la escasez (UN-Wather, 2018).

El recurso del agua en el planeta parece abundante; sin embargo, es importante precisar que aproximadamente el 3 % del agua sobre la tierra es dulce y de esta proporción, en su mayoría es inaccesible, ya que la gran mayoría de agua dulce se encuentra congelada en glaciares y en los casquetes polares; el resto se encuentra bajo la tierra como agua subterránea. Y es así como el preciado recurso se encuentra en solo una pequeña fracción disponible en la superficie, ya sea sobre lagos, ríos y humedales. Estas fuentes son la base sobre la cual pesa la dependencia de los seres humanos y múltiples ecosistemas (National Geographic Society, 2025).

Es por ello por lo que la aplicación de los principios de la economía circular en el sector del agua se vuelve una oportunidad cada vez más significativa, ya que no solo se trata de una buena práctica en función de la sustentabilidad, sino de abordar frente a frente un problema global de explotación y escasez del recurso.

La Federación del Medio Ambiente del Agua, por sus siglas en inglés WEF (Water Environment Federation), es una organización sin fines de lucro con más de 30 000 miembros individuales, la cual opera desde 1928. Esta organización aborda la perspectiva de la economía circular del agua y centra su atención en la reducción de residuos, la recuperación de nutrientes y energía y la regeneración de la naturaleza dentro del ciclo

hidrológico; asimismo, promueve el tratamiento de agua como un recurso renovable, aplicando tecnologías avanzadas y la mano de obra calificada.

Entre los principales desafíos para lograr la efectiva implementación de una economía circular, esta organización identifica altas inversiones en infraestructura y tecnología, así como algunos obstáculos regulatorios que denotan la necesidad de la modificación de políticas y estándares para apoyar la reutilización del agua. Y aunque parezca difícil, también la percepción pública resulta ser un problema, ya que se identifica la necesidad de erradicar el estigma que se tiene sobre la utilización y reciclaje de aguas tratadas. Finalmente, y no menos importante, las limitaciones que resultan de la dificultad de acceso a las tecnologías de tratamiento avanzado y la mano de obra son solo algunas de las barreras a las cuales se encuentra este modelo de economía tan prometedor para el sector hídrico (Water Environment Federation, SF).

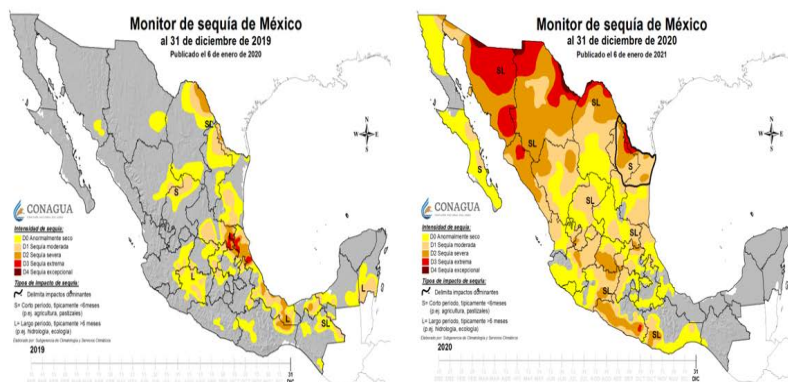
De acuerdo con un reporte emitido por el Banco Mundial en el año 2021, el mundo se enfrenta a una crisis hídrica, impulsada por un aumento de la demanda debido al crecimiento demográfico, patrones de consumo y expansión económica. La consecuencia es que miles de millones de personas ahora habitan en regiones con alto estrés hídrico. Aunado a esto, es desafortunado que las proyecciones indiquen que para el año 2050 más de la mitad de la población se encontrará en riesgo (Delgado et al., 2021).

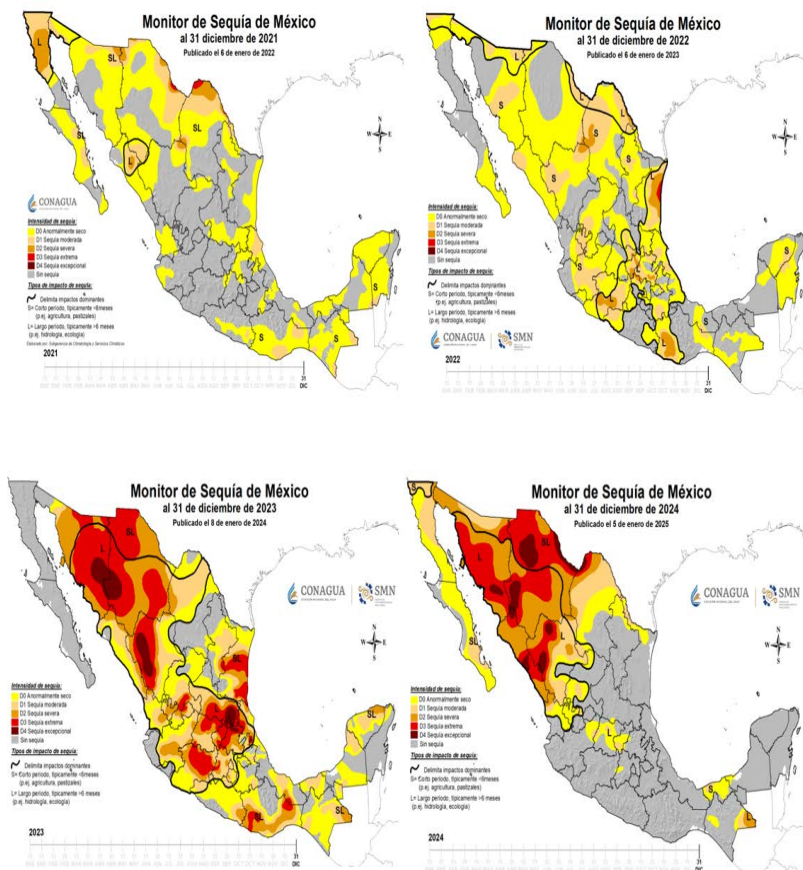
Para hacer frente a los grandes retos y desafíos del sector hídrico actual y el que simulan las proyecciones, la economía circular se presenta como una solución innovadora que reconoce, por sobre todo, el valor completo del agua dentro de un ciclo de uso y regeneración. Como ya se ha mencionado, permite situar el agua no solo como un recurso que se utiliza y se desecha, sino como la entrada para otros nuevos procesos. A través de la aplicación de la economía circular se busca fomentar la resiliencia y la promoción de prácticas regenerativas. La implementación no es tarea fácil; requiere entonces superar las múltiples barreras existentes. Empero, los resultados de adoptar un enfoque sistemático permitirán la integración de prácticas avanzadas en el manejo de los recursos hídricos (Delgado et al., 2021).

Gestión de agua en México

Según SEMARNAT (2024), en México no existe aún consenso que permita el establecimiento de una visión multisectorial para la implementación de la economía circular del agua. Lo cual representa un gran desafío, pero también un punto de partida en la construcción de una estrategia (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2024).

Ahora bien, la crisis hídrica que enfrenta nuestro país durante los últimos años y la transformación de zonas que anteriormente no afrontaban estos retos se han venido transformando en los últimos años. De acuerdo con información de la Comisión Nacional del Agua y a través de su plataforma denominada “Monitor de Sequía en México”, podemos constatar cómo se han venido transformando las diferentes zonas geográficas del país a lo largo de los últimos cinco años:





Fuente: Servicio Meteorológico Nacional, Monitor de Sequía de México 2019-2024. Comisión Nacional del Agua.

Como se puede observar en las imágenes, desde 2019 hasta 2024, se observa una clara y preocupante extensión en la tendencia de estrés hídrico. Podemos observar cómo en 2019 se monitorea un comportamiento relativamente bajo en las zonas identificadas con sequía extrema y excepcional; caso contrario a lo que podemos detectar en los años 2023 y 2024, se establecieron comportamientos distintos en el centro y norte del país. La complejidad en la interpretación de estos cambios en el mapa de estrés hídrico se convierte en un reto cada vez más profundo debido a los fenómenos ocasionados por el cambio climático, así como el uso y sobreexplotación del recurso sin una estrategia coordinada.

Los modelos tradicionales en la extracción del agua y sus usos han generado diversos problemas que no pueden resumirse solo a unos cuantos; sin embargo, algunos de ellos son:

- La sobreexplotación de los mantos acuíferos de una forma desmedida, lo cual ha provocado su descenso y pone en riesgo la disponibilidad de agua para los usuarios. Algunas de las zonas marcadas con alto estrés hídrico dependen en gran medida de la obtención de este recurso precisamente de los mantos acuíferos.
- Por otro lado, la contaminación del agua provocada por los múltiples efluentes que descargan sin un adecuado tratamiento y que desembocan directamente en ríos, aguas subterráneas y lagos, provoca, por un lado, que no se logre el adecuado aprovechamiento del recurso y, en el peor de los casos, una inmensa propagación de enfermedades debido al foco de contaminación que representan.
- Asimismo, y no menos importante, las pérdidas ocasionadas por fugas en las redes de distribución generan una reducción significativa en el aprovechamiento y uso del agua.

De acuerdo con información de CONAGUA, son múltiples los impactos que se resienten con las sequías; ellos destacan los biológicos, que tienen afectaciones en flora y fauna. Asimismo, los impactos de orden superior son aquellos que tienen una afectación sobre el ámbito socioeconómico, y según el rubro, estos pueden clasificarse en económicos, ambientales y sociales:

- Económicos: Los efectos económicos que pueden llegar a resentirse pueden ser la disminución o pérdida de la producción de alimentos, así como la recesión en tasas de crecimiento económico, disminución de la capacidad productiva, incremento en demandas energéticas, desempleo y la disminución de ingresos.
- Ambientales: Entre los impactos ambientales se detectan los daños a los ecosistemas, la pérdida de suelos, así como la degradación de la calidad del agua y del aire y, con todo esto, la degradación del paisaje.
- Sociales: Los efectos sociales se resienten en la escasez, calidad y cantidad de los alimentos, mayor vulnerabilidad en problemas de salud, disminución de la calidad de vida, conflictos entre los usuarios del

agua, asimismo inestabilidad social y posible marginación en zonas afectadas (Comisión Nacional del Agua, 2024).

Ante este panorama es prioritario el cambio de paradigma sobre nuestra actual gestión del agua; a continuación, abordaremos algunas de las posibles soluciones basadas en economía circular que pueden ser aplicadas en México y que permitan un cambio en las formas y patrones clásicos de consumo.

México enfrenta diversos desafíos en torno a la incorporación o aceleración de la economía circular. Por un lado, encontramos áreas de oportunidad en la legislación, ya que el marco regulatorio carece de principios de la economía circular; así mismo, no presenta mecanismos o acciones que fomenten la implementación de dichas estrategias.

Así mismo, dichas barreras en la regulación mexicana no promueven la creación de sinergias con los sectores industriales; así mismo, en este contexto legal no se abordan cuestiones que fiscalmente generen penalización para aquellos sectores que apliquen patrones de consumo causantes de externalidades socioambientales. Por lo tanto, uno de los principales desafíos en esta materia es acortar las brechas en torno a las políticas públicas que logren incorporar los conceptos de este nuevo paradigma prometedor para una gestión más eficiente del agua.

Un informe de la OCDE (2025), denominado “The Circular Water Economy in Latin America”. Destaca que la región de Latinoamérica se enfrenta a una compleja gama de desafíos en relación a los recursos hídricos, y es que, a pesar de que esta región cuenta con la mayor proporción de recursos hídricos renovables a nivel global, esta región se encuentra faltamente expuesta ante los impactos relacionados con desastres como sequías, inundaciones y tormentas.

Por otro lado, el informe también destaca que el saneamiento y el acceso al agua potable siguen siendo preocupantes, ya que para el año 2020, una cuarta parte de la población de esta región carecía de acceso al agua potable segura. Aunado a esto, el 54 % de los caudales residuales domésticos no recibían ninguna clase de tratamiento, comparado con un 14 % en regiones como Europa y América del Norte.

El informe citado basa su información en la Encuesta sobre Agua y Economía Circular de la OCDE. El cual destaca que la mayoría de

los países se adhieren a un modelo lineal en la gestión hídrica. En este informe se destaca que seis países, a saber, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Perú y Uruguay, ya han incluido explícitamente políticas de economía circular. México está desarrollando una.

Entre los tres principales obstáculos que impiden la transición hacia una economía circular, destacan los siguientes:

- Marcos regulatorios inadecuados, así como desajustes entre las diferentes políticas existentes, México, Argentina, Brasil y Costa Rica. Enfrentan esta barrera institucional. La falta de coordinación entre los actores políticos que regulan los sectores hídricos y energéticos; ejemplo de ello lo encontramos en países como Paraguay y Perú.
- El segundo obstáculo recae en la insuficiencia de recursos financieros, lo cual dificulta la capacidad de acceso a tecnologías, infraestructura y capacidad de reutilización de subproductos.
- Finalmente, la falta de concientización en los formuladores de políticas y la sociedad en general causa una barrera más en el proceso de transición hacia una economía circular (OCDE, 2025).

En esta misma línea, el informe destaca la necesidad de incorporar estrategias que permitan, en primer lugar, la transición y eliminación de dichas barreras a través del fortalecimiento de los marcos regulatorios, la adaptación de herramientas financieras que incentiven los modelos innovadores y el involucramiento de las partes interesadas y el desarrollo de sus capacidades mediante la sensibilización y participación en las prácticas circulares del agua.

México en medio de una encrucijada hídrica

Como hemos podido observar el modelo lineal que es ampliamente utilizado en México y muchos países en el mundo nos demuestra cada vez más la evidencia que no es funcional y por el contrario es completamente insostenible ante la creciente demanda de recursos y los estragos del cambio climático. Las consecuencias de dicha gestión las hemos podido observar por la alta variación en los perfiles hídricos de nuestro país, principalmente enfocados en la transformación de zonas sin estrés hídrico a zonas con sequías extremas.

Frente a esta situación, la economía circular no resulta ser una solución simple, pero sí la más prometedora. Este modelo no es solo un paradigma, sino una promesa que requiere acciones contundentes y un cambio en la forma de abordar el complejo problema del agua. La transición en algunos otros países ya se ha logrado iniciar y algunos otros con mayor potencial que México experimentan tasas de recuperación y tratamiento mucho más altas.

Esta transición se encuentra llena de obstáculos, ya que, como señala la OCDE y algunos otros organismos, la falta de un marco regulatorio robusto, así como el acceso a recursos financieros y la falta de concientización en las partes interesadas, nos brindan un panorama que a primera vista parece desalentador, mas no imposible de lograr. Sin embargo, superar estas barreras requiere de coordinación tanto a nivel político como privado. Por esta razón, México se encuentra en una encrucijada, ya sea para continuar con el modelo tradicional o reinventarse hacia un futuro más sostenible en la gestión hídrica. Apostar por la economía circular es apostar por mejorar la viabilidad del país y el aseguramiento del recurso para nuestras generaciones futuras.

Referencias

- Comisión Nacional del Agua. (2024). *Atención a la Sequía en México*. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/atencion-a-la-sequia-en-mexico>
- Deb, U., Bhowmik, S., Gali, V. R., Kumar, A., & Dutta, S. (2022). *Circular economy for water management in agriculture: A comprehensive review*. *Circular Economy and Sustainability*, 2(3), 1059–1085. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00165-x>
- Delgado, A., Rodriguez, D. J., Amadei, C. A., & Makino, M. (2021). *Water in circular economy and resilience (WICER)*. *The World Bank*. <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/36254/163924.pdf>
- Eawater. (2024). *Economía circular del agua*. Everything About Water. <https://everythingaboutwater.com/economia-circular-del-agua/>
- Ellen MacArthur Foundation. (s.f.). *La historia de Ellen* [Página web]. <https://ellenmacarthurfoundation.org/es/sobre-nosotros/la-historia-de-ellen>

- Gómez-Valdez, M. I., Salomón-Guzmán, E. G., & Palerm-Viqueira, J. (2019). Captación de agua de lluvia para consumo doméstico: ¿Una opción para localidades sin suministro por red? *Impluvium*, 9, 21–28. <https://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/impluvium/numero09.pdf>
- National Geographic Society. (2025). *Earth's freshwater*. National Geographic Education. <https://education.nationalgeographic.org/resource/earths-fresh-water/>
- OCDE (2025). *La economía circular del agua en América Latina , Estudios urbanos de la OCDE, Publicaciones de la OCDE, París*, <https://doi.org/10.1787/a0508572-en> .
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2024). *Bases para la elaboración de un diagnóstico de la Estrategia Nacional de Economía Circular en México*.
- United Nations University Institute for Water, Environment and Health (UNU-INWEH). (2025). Top UN expert highlights urgent need to rethink water governance amid global water “bankruptcy”. <https://unu.edu/inweh/news/top-un-expert-highlights-urgent-need-rethink-water-governance-amid-global-water>
- UN-Water. (2018). *Water quality and wastewater* [Factsheet]. https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2018/10/WaterFacts_water_and_wastewater_sep2018.pdf
- Urrea Vivas, M. A. (2021, March 23). *Avoid water stress by utilizing a circular economy model*. Harvard Advanced Leadership Initiative Social Impact Review.
- Voorhuis, J., & Gijbels, C. (2010). A fair accord: Cradle to Cradle as a design theory measured against John Rawls' Theory of Justice and Immanuel Kant's Categorical Imperative. *Sustainability*, 2, 371-382. <https://doi.org/10.3390/su2010371>
- Water Environment Federation. (s.f.). *Circular water economy FAQ*. <https://www.wef.org/topics/hot-topics/circular-water-economy/circular-water-economy-faq/>
- Winans, K., Kendall, A., & Deng, H. (2017). The history and current applications of the circular economy concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(Part 1), 825-833. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.123>

Capítulo 5

Transformación sostenible de alimentos: El secado solar como estrategia para una economía circular

*Berenice Recio Colmenares*¹

*Carolina Livier Recio Colmenares*²

*César Alejandro García García*³

<https://doi.org/10.61728/AE20251659>



¹ Doctora en Agua y energía; Departamento de Ciencias Básicas, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara; México.

² Doctora en Agua y energía; Departamento de Ciencias Básicas, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara; México.

³ Doctor en Tecnologías de la información; Departamento de Ciencias de la Información y Desarrollos Tecnológicos, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara; México.

Resumen

Este capítulo examina el secado solar como una tecnología sostenible para la conservación de alimentos, utilizando como caso de estudio la deshidratación del tomate verde (*Physalis ixocarpa* Brot). Se analizó la viabilidad técnica y económica de diferentes tipos de secadores solares —de convección natural, forzada y con condiciones controladas—, evaluando su impacto en la eficiencia del proceso y en la calidad del producto final. Mediante el estudio de las cinéticas de secado, se desarrollaron modelos matemáticos que permiten optimizar los parámetros operacionales y mejorar el rendimiento del proceso.

El secado solar se presenta, además, como una estrategia coherente con los principios de la economía circular, al fomentar el aprovechamiento de excedentes agrícolas, reducir el desperdicio poscosecha y promover el uso de energías limpias. Su implementación contribuye al cumplimiento de diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), entre ellos: Hambre Cero (ODS 2), Energía Asequible y No Contaminante (ODS 7), Producción y Consumo Responsables (ODS 12) y Acción por el Clima (ODS 13).

Los resultados del estudio ofrecen una alternativa viable y rentable para la agroindustria mexicana, al proporcionar una tecnología accesible que reduce costos operativos y agrega valor a productos subutilizados. Su adopción no solo mejora la seguridad alimentaria y las condiciones de vida en comunidades rurales, sino que también refuerza la resiliencia del sector agroalimentario frente a los desafíos del cambio climático.

Introducción

El secado solar, una técnica ancestral de conservación, ha resurgido como una solución eficiente y sostenible frente a los desafíos actuales de la industria agroalimentaria. Al utilizar energía solar para reducir el

contenido de humedad de los alimentos, esta tecnología permite extender su vida útil sin comprometer sus propiedades nutricionales o sensoriales, reduciendo además la dependencia de fuentes energéticas convencionales.

En un contexto global marcado por el aumento del desperdicio alimentario y la necesidad de avanzar hacia modelos productivos más sostenibles, el secado solar se posiciona como una estrategia clave dentro de la economía circular. Su implementación no solo contribuye a reducir las pérdidas poscosecha, sino que promueve el aprovechamiento integral de los recursos, disminuye la huella de carbono y favorece la autosuficiencia energética en comunidades rurales.

La industria agroalimentaria, uno de los sectores con mayor consumo energético, enfrenta importantes retos asociados a la falta de tecnologías de conservación adecuadas. La deshidratación, en este sentido, se configura como una alternativa viable para preservar alimentos, facilitando su almacenamiento y transporte, al tiempo que garantiza su inocuidad y calidad (Deepak y Behura, 2023).

Desde una perspectiva alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), el secado solar aporta a metas fundamentales como Hambre Cero (ODS 2), Energía Asequible y No Contaminante (ODS 7), Producción y Consumo Responsables (ODS 12) y Acción por el Clima (ODS 13). Al aprovechar recursos naturales renovables y fortalecer economías locales, esta tecnología promueve la generación de empleo digno, la reducción de la pobreza energética y la resiliencia frente al cambio climático (Parvathy y Kumar, 2023).

Los avances recientes en sistemas pasivos y activos han mejorado significativamente la eficiencia del secado solar, permitiendo su adaptación a diversas condiciones climáticas y escalas de producción. Estas innovaciones, además de mejorar la calidad del producto final, han potenciado la competitividad de los productores rurales, abriéndose nuevas oportunidades en mercados nacionales e internacionales (Gilago et al., 2023).

En este capítulo se presenta un estudio de caso sobre la aplicación del secado solar en la conservación del tomate verde (*Physalis ixocarpa* Brot), un cultivo ampliamente consumido en México y de alta vulnerabilidad poscosecha. Se evaluaron distintos sistemas de secado (convección natural, forzada y controlada) desde una perspectiva técnica y económica,

considerando parámetros operacionales, calidad del producto, costos y beneficios. Los resultados obtenidos evidencian el potencial del secado solar para reducir pérdidas, mejorar la rentabilidad y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios rurales.

Fundamentos del proceso de secado y métodos de deshidratación de alimentos

El secado de alimentos mediante energía solar constituye un componente clave en la transición hacia sistemas alimentarios sostenibles, al integrar prácticas tradicionales con principios contemporáneos de la economía circular. Esta técnica aprovecha la radiación solar como fuente de energía renovable para reducir el contenido de humedad de los alimentos, inhibiendo la actividad microbiana y enzimática, y extendiendo su vida útil sin requerir aditivos químicos ni altos consumos energéticos.

A diferencia de los métodos industriales que utilizan combustibles fósiles o electricidad intensiva, el secado solar opera a temperaturas moderadas (generalmente entre 40 y 70 °C), lo cual permite conservar las propiedades nutricionales, funcionales y organolépticas de los productos tratados. Esta característica lo convierte en una alternativa respetuosa con el medio ambiente, con una huella de carbono considerablemente menor que otros procesos de conservación térmica (Gilago et al., 2023; Tamasiga et al., 2023).

Existen diversas modalidades de secado solar, desde sistemas pasivos, como los secadores de tipo invernadero, hasta equipos activos con ventilación forzada y control de temperatura. La elección del sistema depende de factores como el tipo de alimento, las condiciones climáticas locales, la escala de producción y los recursos disponibles. En todos los casos, la eficiencia del proceso está determinada por parámetros clave como la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del flujo de aire y el espesor del producto.

La deshidratación mediante energía solar no solo permite reducir pérdidas poscosecha, sino que también contribuye a la valorización de excedentes agrícolas y a la generación de ingresos en comunidades rurales. Su integración en cadenas de valor locales fortalece la seguridad

alimentaria, promueve el uso responsable de recursos y favorece la diversificación de productos agroindustriales bajo un enfoque sostenible.

Metodología

El presente estudio experimental se centró en la evaluación del proceso de secado solar aplicado al tomate verde (*Physalis ixocarpa* Brot.), seleccionando frutos con características homogéneas en cuanto a color, tamaño y grado de madurez. Previamente al proceso de deshidratación, los tomates fueron sometidos únicamente a procesos de limpieza, lavado y corte, sin aplicar pretratamientos químicos. Cada fruto fue rebanado en secciones de 4 ± 1 mm de espesor, con un diámetro aproximado de 6 ± 0.5 cm y un peso entre 15 y 20 ± 2 g. Las rebanadas fueron dispuestas de manera uniforme sobre las bandejas de secado, asegurando una cobertura homogénea de la superficie. Para el monitoreo de la pérdida de humedad, se tomaron cuatro muestras representativas por lote experimental.

Protocolo experimental general

El procedimiento seguido para todas las pruebas se estructuró en tres etapas fundamentales: primero, el registro del peso inicial de cada muestra mediante una balanza portátil Ohaus HH320 (capacidad máxima de 320 g, resolución de 0.1 g); segundo, la determinación del contenido de humedad y actividad de agua con un analizador de humedad Ohaus MB-45 (capacidad de 200 g, resolución de 0.001 g); y finalmente, el monitoreo de la pérdida de humedad a intervalos de 30 minutos, hasta alcanzar la condición de humedad de equilibrio. Cuando las tres últimas mediciones consecutivas no presentaban variaciones significativas, se dio por concluido el secado y se registró el contenido final de humedad.

El secador utilizado en las pruebas experimentales fue un secador solar tipo gabinete, mostrado en la Figura 1. Este secador operó tanto en modo activo como pasivo, proporcionando las condiciones necesarias para llevar a cabo las evaluaciones del proceso de deshidratación del tomate verde.

Figura 1. Secador solar tipo gabinete utilizado en el estudio experimental, operando en modos activo y pasivo para la deshidratación del tomate verde.



Fuente: Fotografía tomada por los autores.

Evaluación de secadores solares

Secador solar tipo gabinete (SSG)

Se utilizó un secador solar tipo gabinete (Figura 1), capaz de operar tanto en modo pasivo como en modo activo. Este equipo permitió evaluar el comportamiento del tomate verde bajo condiciones variables de radiación y flujo de aire. La velocidad del aire en la cámara de secado fue medida mediante un anemómetro Extech, con rango de operación de 0.30 a 45.00 m/s, resolución de ± 0.01 m/s y margen térmico entre 0 °C y 50 °C.

Secador con condiciones controladas (SCC)

El secador con condiciones controladas fue diseñado con un motovenilador de 1/20 HP, capaz de generar un flujo de aire de hasta 450 m³/h. El sistema cuenta con un mecanismo de calefacción eléctrica de 4.5 kW que permite ajustar la temperatura de la cámara entre 25 y 80 °C. La estructura transparente de la cámara facilita la absorción de energía solar, mientras que las aberturas laterales permiten una circulación eficiente del aire. La velocidad del flujo de aire, controlada por un inyector, puede ajustarse entre 0.5 y 4 m/s, con circulación por encima, debajo y a través

de las bandejas. La temperatura interna se monitorea mediante un sensor PT1000, el cual también regula el sistema de calefacción. Para el análisis cinético del proceso, se establecieron temperaturas de 40, 50 y 60 °C (± 0.5 °C) y velocidades de aire de 2, 4 y 6 m/s (± 0.02 m/s).

Secador solar directo (SSD)

El secador solar directo (Figura 2) consistió en una cámara de acrílico transparente equipada con perforaciones en la base y los laterales, que permiten la salida del aire caliente y húmedo. Se evaluaron dos versiones: una con convección natural y otra con convección forzada, mediante un ventilador tipo abanico de 12 cm, operando a 115 V-AC y 0.17 A, con velocidades entre 3.33 y 3.45 m/s. Las rebanadas de tomate fueron expuestas directamente a la radiación solar, colocadas sobre bandejas metálicas pintadas de negro. En ambas configuraciones, el secado se llevó a cabo hasta que la masa de las muestras se mantuvo constante en tres lecturas consecutivas. El contenido inicial de humedad fue determinado por triplicado, conforme a la norma NMX-F-083-1986.

Figura 2. a) Secadores tipo gabinete convección natural y convección forzada, b) Producto deshidratado sellado al vacío.



Fuente: Fotografías tomadas por los autores.

Modelado de la cinética de secado

Para analizar el comportamiento del tomate verde durante el proceso de deshidratación, se aplicaron modelos matemáticos semiempíricos

ampliamente validados en la literatura, entre ellos los modelos de Page, Midilli y Kucuk, y el modelo logarítmico (Onwude et al., 2016). Los parámetros obtenidos permiten describir la evolución temporal del contenido de humedad bajo diferentes condiciones térmicas y de flujo de aire, con el fin de optimizar la eficiencia del proceso.

Resultados

Cinéticas de secado para el tomate verde

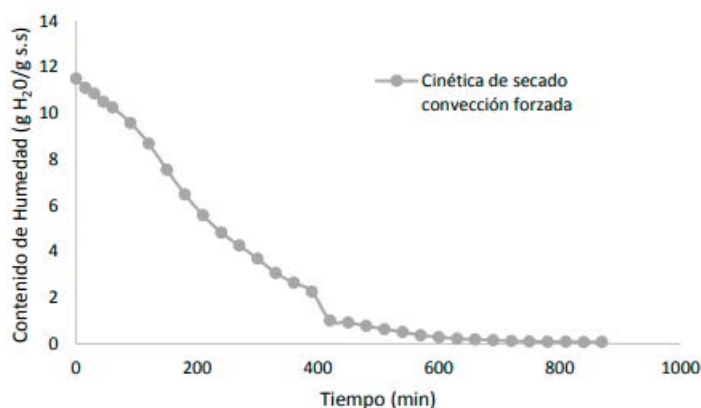
El proceso de desecación del tomate verde generó datos experimentales que correlacionan el contenido de humedad en base seca con el tiempo de secado. Las curvas obtenidas permiten identificar las fases del proceso, evidenciando que este no es uniforme ni continuo. Las metodologías empleadas incluyeron diferencias de humedad, pesaje intermitente y continuo, y permitieron construir curvas de cinética de secado bajo diversas condiciones de temperatura y velocidad del aire.

Se analizaron tres configuraciones: secador solar tipo gabinete con convección natural y forzada, y un secador con condiciones controladas. En cada caso, se seleccionaron cuatro muestras representativas por ensayo para monitorear la pérdida de humedad a lo largo del tiempo.

Cinética de secado con secador tipo gabinete

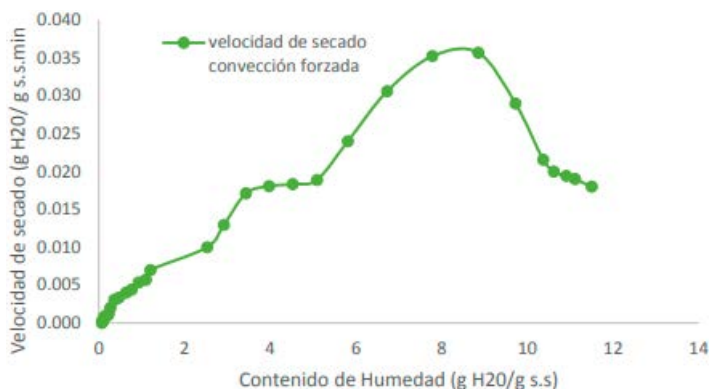
El uso del secador solar tipo gabinete permitió alcanzar humedades finales entre 5 % y 8 % (bh), con tiempos de secado de aproximadamente 12 horas para la convección natural y 15 horas para la convección forzada. Las Figuras 3 y 4 muestran la evolución del contenido de humedad y la velocidad de secado, respectivamente. Durante los primeros 60 minutos, no se observó un periodo claro de calentamiento, ya que la temperatura de operación fue moderada (~40 °C).

Figura 3. Cinética de secado solar convección forzada.



Fuente: Elaboración propia.

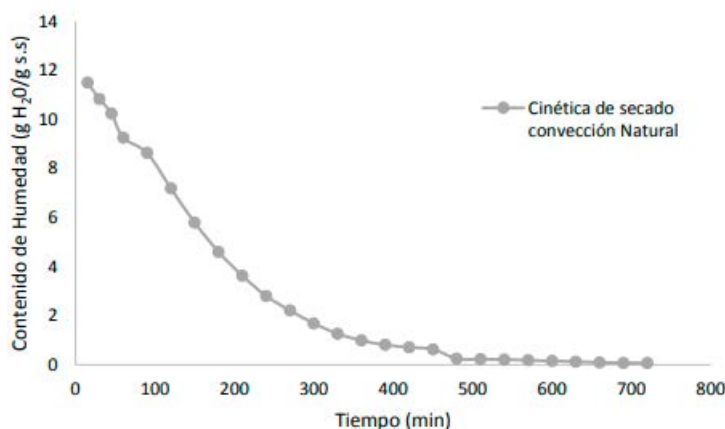
Figura 4. Velocidad de secado convección forzada.



Fuente: Elaboración propia.

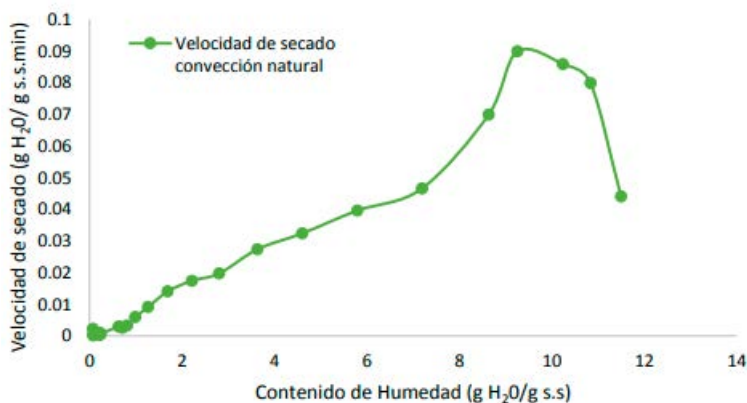
En convección natural (Figuras 5 y 6), se identificaron igualmente dos fases de velocidad decreciente: de 60 a 450 minutos y de 450 a 720 minutos. La humedad disminuyó de 0.39 ± 0.05 g H₂O/g s.s. a 0.071 ± 0.02 g H₂O/g s.s., con irradiancias máximas de 990 y 986 W/m², respectivamente.

Figura 5. Cinética de secado solar convección natural.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Velocidad de secado convección natural.



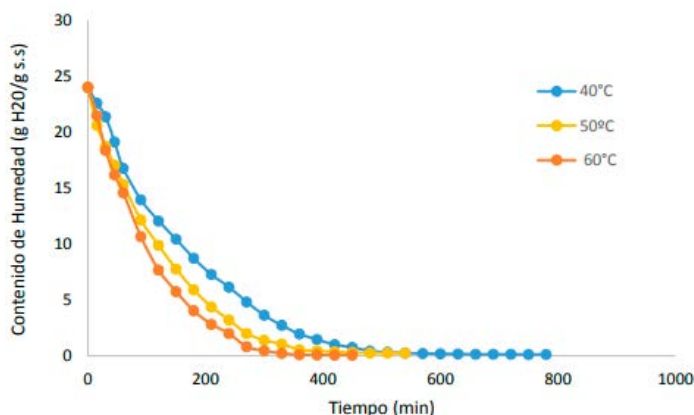
Fuente: Elaboración propia.

Cinética de secado con condiciones controladas

Las Figuras 7 y 8 presentan los resultados del secado bajo condiciones controladas a velocidades constantes de 2 m/s y temperaturas de 40, 50 y 60 °C. El tiempo requerido para alcanzar humedades finales disminuyó significativamente al aumentar la temperatura: a 60 °C, se logró 0.11 g

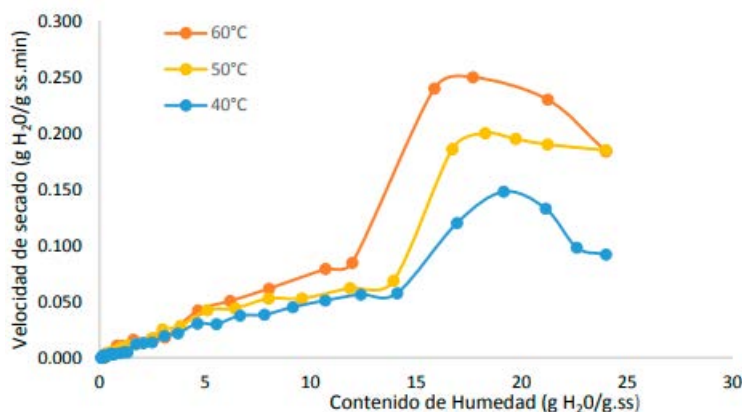
H₂O/g s.s. en 500 minutos; a 50 °C, 0.20 g H₂O/g s.s. en 650 minutos; y a 40 °C, 0.13 g H₂O/g s.s. en 800 minutos.

Figura 7. Cinética de secado bajo condiciones controladas velocidad 2 m/s.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Velocidad de secado bajo condiciones controladas 2 m/s.

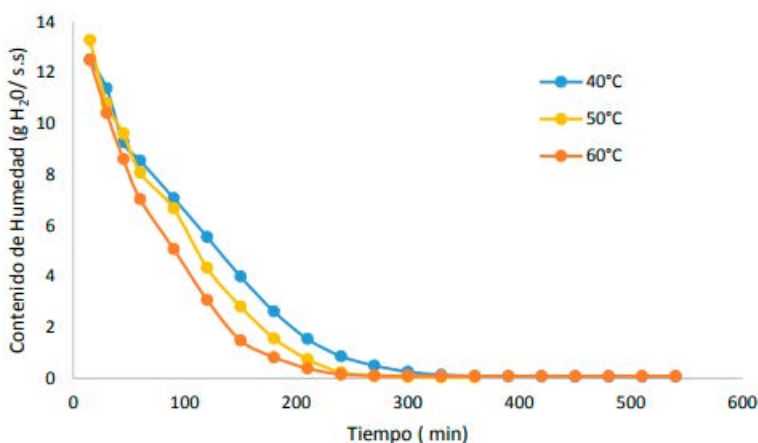


Fuente: Elaboración propia.

Las velocidades máximas registradas fueron de 0.22, 0.18 y 0.12 g H₂O/g s.s. min para 60, 50 y 40 °C, respectivamente, evidenciando tres fases de secado: calentamiento, velocidad decreciente 1 y velocidad decreciente 2.

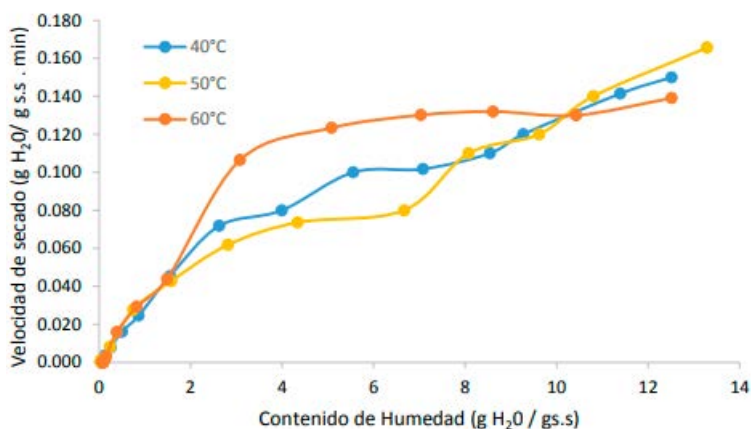
Con una velocidad de aire de 4 m/s (Figuras 9 y 10), los tiempos de secado se redujeron aún más: 250 minutos a 60 °C (0.071 g H₂O/g s.s.), 300 minutos a 50 °C (0.06 g H₂O/g s.s.), y 450 minutos a 40 °C (0.07 g H₂O/g s.s.). Las velocidades máximas fueron de 0.30, 0.20 y 0.17 g H₂O/g s.s. min respectivamente.

Figura 9. Cinética de secado bajo condiciones controladas 4 m/s.



Fuente: Elaboración propia.

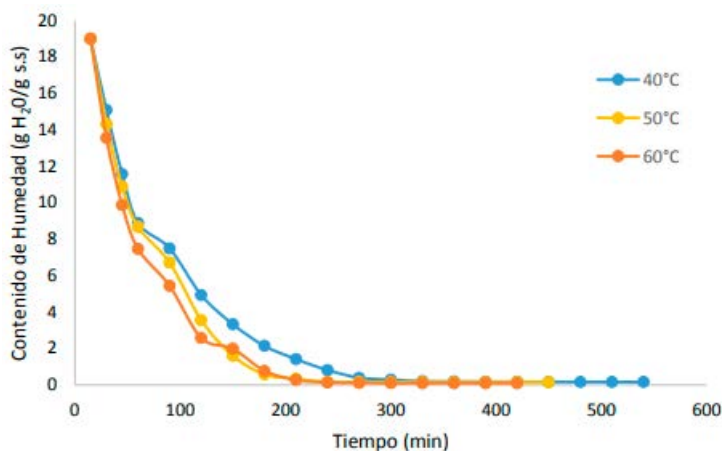
Figura 10. Velocidad de secado 4 m/s.



Fuente: Elaboración propia.

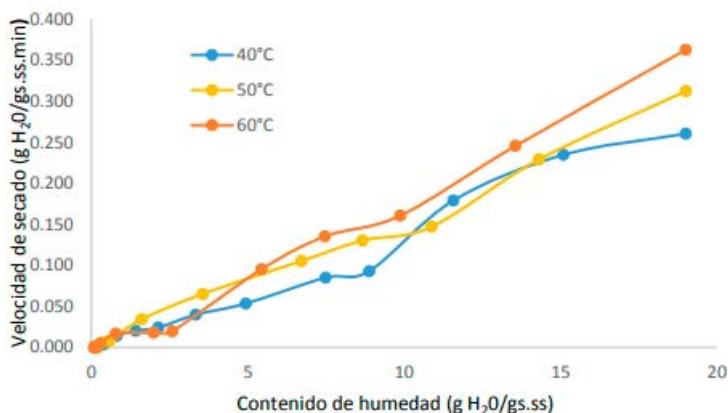
Finalmente, a 6 m/s (Figuras 11 y 12), se obtuvo una mayor eficiencia de secado, especialmente a 60 °C, con una humedad final de 0.084 g H₂O/g s.s. en 300 minutos. A 40 °C, se alcanzó 0.13 g H₂O/g s.s. en 420 minutos. Se observaron dos etapas claramente diferenciadas: velocidad constante inicial (en 40 y 50 °C) y velocidad decreciente. A 60 °C se identificó un periodo de velocidad creciente seguido por la fase decreciente.

Figura 11. Cinética de secado 6 m/s.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Velocidad de secado 6 m/s.



Fuente: Elaboración propia.

En todos los casos, las curvas se construyeron con promedios de cuatro muestras por ensayo, de $4 \text{ mm} \pm 0.001$ de espesor y masa entre 13 y 20 g. Las correlaciones ($r = 0.7$ a 0.8) y la desviación estándar (0.068) indican que la masa no tuvo una influencia significativa sobre la cinética de secado.

Discusión

La eficiencia del proceso de secado solar depende de múltiples factores técnicos y físicos que deben ser cuidadosamente optimizados para garantizar la calidad del producto final. Entre estos factores destacan la temperatura de operación, el corte y el espesor del alimento. Un espesor excesivamente delgado, por ejemplo, puede dificultar la manipulación del producto y provocar adherencias en la charola de secado, mientras que espesores mayores ralentizan el proceso de deshidratación. En este sentido, se ha sugerido la aplicación de pretratamientos como la deshidratación osmótica para reducir el contenido inicial de agua y mejorar la eficiencia del secado, aunque en este estudio se optó por no aplicarlos para evaluar el comportamiento natural del producto.

Asimismo, el contenido inicial de humedad, aunque importante, no es el único parámetro determinante del proceso. La selección del estado

de madurez del tomate verde (*Physalis ixocarpa* Brot) también juega un papel fundamental, ya que influye en su estructura celular, contenido de sólidos solubles y respuesta térmica durante la deshidratación.

Desde un enfoque termodinámico, el contenido de humedad se expresa comúnmente como porcentaje en base seca, definido como la relación entre la masa de agua contenida en la muestra (adsorbato) y la masa de la materia seca (adsorbente). Esta representación permite una mejor comparación entre condiciones experimentales y facilita la modelación matemática del proceso.

En términos comparativos, Sharma et al. (2009) realizaron una revisión de los sistemas de secado solar, describiendo sus principios, tipologías y aplicaciones, aunque sin ofrecer datos experimentales específicos ni integrar criterios de sostenibilidad o economía circular. En contraste, el presente estudio proporciona una evaluación experimental detallada de la cinética de secado del tomate verde, bajo diversas condiciones de operación, y contextualiza sus hallazgos en función de los principios de circularidad.

Del mismo modo, Onwude et al. (2016) abordaron el modelado del secado en capa fina mediante diversos enfoques teóricos, pero no profundizaron en aplicaciones prácticas para cultivos específicos ni en la incorporación de residuos en ciclos productivos. En el presente trabajo, se validaron modelos semiteóricos como los de Page, Midilli y Kucuk, adaptándolos a las condiciones experimentales observadas, y se exploró la posibilidad de integrar los residuos del proceso en nuevas cadenas de valor.

Rabha et al. (2017), por su parte, analizaron la cinética de secado del chile fantasma en un secador solar tipo túnel, identificando un comportamiento de velocidad decreciente sin fase constante, lo cual concuerda con las observaciones registradas en este estudio para el tomate verde. No obstante, las diferencias en el tipo de secador y en las características del producto limitan la extrapolación directa de los resultados. Similarmente, Elavarasan et al. (2021) investigaron el secado del tomate (*Solanum lycopersicum*) en condiciones de convección forzada, obteniendo datos comparables en términos de tiempos y humedades finales, aunque sin evaluar impactos ambientales ni posibilidades de circularidad.

Este estudio aporta evidencia sobre la viabilidad técnica del secado solar de tomate verde, subrayando su potencial para ser integrado en esquemas productivos más sostenibles. La comparación entre distintos tipos de secadores y velocidades de aire permitió identificar configuraciones óptimas para reducir el tiempo de secado y preservar la calidad del producto. Además, se destaca el potencial de los residuos generados durante el proceso (como pieles o partes no comercializables) para ser utilizados en la elaboración de nuevos productos, promoviendo así la reducción del desperdicio alimentario y el cierre de ciclos materiales en el marco de la economía circular.

Modelos matemáticos

Los modelos matemáticos constituyen una herramienta fundamental para optimizar las condiciones del proceso de secado y comprender los mecanismos complejos de transferencia de calor y masa que intervienen en la deshidratación de alimentos. La elección adecuada del modelo permite predecir el comportamiento del producto durante el secado y ajustar las variables operativas en función de la eficiencia energética y la calidad final.

Existen dos escalas principales en la modelación del secado: los modelos a macroescala y los modelos a microescala. Los primeros se centran en describir el comportamiento global del alimento, sin entrar en los detalles estructurales microscópicos. En este grupo se incluyen los modelos empíricos, semiteóricos y teóricos, los cuales se emplearon en el presente estudio para ajustar las curvas de cinética de secado del tomate verde.

En la Tabla 1 se presentan los catorce modelos matemáticos considerados, junto con sus respectivas ecuaciones y referencias bibliográficas.

Tabla 1. Modelos matemáticos para cinética de secado

Modelo	Correlación matemática	Referencias
Newton	$MR = \exp(-kt)$	Liu y Bakker-Arkema (1997) O'Callaghan, Menzies y Bailey (1971)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Agrawal y Singh (1977) Zhang y Litchfield (1991)
Page Modificado	$MR = \exp(-(kt)^n)$	Overhults, White, Hamilton y Ross (1973) White, Ross y Ponekert (1981)
Henderson y Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Chinnman (1984) Westerman, White y Ross (1973)
Logarítmico	$MR = a \exp(-kt) + c$	Yagcioglu, Degirmencioglu, and Cagatay (1999)
Dos términos	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	Henderson (1974) Rahman, Perera y Theband (1998)
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang and Singh (1978)
Thomson	$MR = \exp((-a - (a^2 + 4bt)^{1/2})/2b)$	Thomson, Peart y Foster (1968)
Difusión aproximada	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	Kassem (1998)
Werna	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$	Werma, Bucklin, Endan y Wratten (1985)
Henderson y Pabis modificado	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Karathanos (1999)
Dos términos exponencial	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	Sharaf-Elden, Blaisdell y Hamdy (1980)
Difusión simplificada de Fick	$MR = a \exp(-c(t/L^2))$	Diamante and Munro (1991)
Page Modificado Ec.2	$MR = \exp(-k(t/L^2)^n)$	Diamante and Munro (1991)

Se analizó el comportamiento de los datos experimentales obtenidos en las pruebas realizadas bajo diferentes condiciones controladas en el secador de gabinete, con el objetivo de determinar cuál de los modelos ofrecía el mejor ajuste a la cinética de secado del tomate verde. Para ello se evaluaron los catorce modelos descritos en la Tabla 1.

La Tabla 2 resume los valores de los parámetros ajustados para cada modelo, así como los errores asociados a cada uno, utilizando datos correspondientes a una temperatura de 60 °C y una velocidad de aire de 6 m/s. En total, se llevaron a cabo nueve combinaciones de prueba, variando la temperatura entre 40 y 60 °C y la velocidad del aire entre 2 y 6 m/s.

Tabla 2. Parámetros de cada modelo para ajuste con cinética de secado a 60°C y 6 m/s y sus errores correspondientes al ajuste.

Modelo	Correlación matemática	Parámetros de los modelos	χ^2	MBE	RMSE	R ²
Newton	$MR = \exp(-kt)$	k = 0.0212	9.19E-05	8.62E-05	9.28E-03	9.99E-01
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	k = 0.0241 n = 0.9679	8.19E-05	7.17E-05	8.47E-03	9.99E-01
Page Modificado	$MR = \exp(-(kt)^n)$	k = 0.0213 n = 0.9679	8.19E-05	7.17E-05	8.47E-03	9.99E-01
Henderson y Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	a = 0.9925 k = 0.0211	9.33E-05	8.16E-05	9.03E-03	9.99E-01
Logarítmico	$MR = a \exp(-kt) + c$	a = 0.9911 k = 0.0212 c = 0.0024	9.71E-05	7.89E-05	8.88E-03	9.99E-01
Dos términos	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	a = 0.4963 b = 0.4963 k0 = 0.0211 k1 = 0.0211	1.09E-04	8.16E-05	9.03E-03	9.99E-01
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	a = -0.0090 b = 0.0000	2.43E-02	2.13E-02	1.46E-01	8.86E-01
Thomson	$MR = \exp((-a - (a^2 + 4bt)^{1/2})/2b)$	a = -8607 b = 11.3759	1.17E-03	1.05E-03	3.97E-02	9.25E-01
Difusión aproximada	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	a = 0.0303 k = 0.2751 b = 0.0745	8.33E-05	6.77E-05	8.23E-03	9.99E-01
Werma	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$	a = 0.9697 k = 0.0205 g = 0.2754	8.33E-05	6.77E-05	8.23E-03	9.99E-01
Henderson y Pabis modificado	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	a = 0.3308 k = 0.0211 b = 0.3308 g = 0.0211 c = 0.3308 h = 0.0211	1.31E-04	8.16E-05	9.03E-03	9.99E-01
Dos términos exponencial	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	a = 0.6717 k = 0.0243	9.04E-05	7.91E-05	8.90E-03	9.99E-01
Difusión simplificada de Fick	$MR = a \exp(-c(t/L^2))$	a = 0.9925 c = 0.0015 L = 0.2652	1.00E-04	8.16E-05	9.03E-03	9.99E-01
Page Modificado Ec. 2	$MR = \exp(-k(t/L^2)^n)$	k = 0.0085 L = 0.5855 n = 0.9679	8.82E-05	7.17E-05	8.47E-03	9.99E-01

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 2, los modelos que presentan mejor ajuste a los datos experimentales bajo estas condiciones específicas son: el modelo de Werma, el modelo de Difusión Aproximada y el modelo de Page Modificado. No obstante, considerando todas las condiciones evaluadas, los tres modelos que consistentemente ofrecieron mejor ajuste son: Werma, Dos Términos Exponencial y Page Modificado. Los valores promedio de las medidas estadísticas correspondientes se resumen en la Tabla 3, ordenados de menor a mayor error.

Tabla 3. Valores de medidas estadísticas para el ajuste promedio de todas las pruebas

Modelo	Promedio			
	X ²	MBE	RMSE	R ²
Werma	0.00021	0.00017	0.01268	0.9985
Dos términos exponencial	0.00021	0.00019	0.01328	0.9983
Page Modificado	0.00022	0.00020	0.01345	0.9983
Page	0.00023	0.00020	0.01349	0.9982
Difusión aproximada	0.00027	0.00022	0.01421	0.9980
Page Modificado Ec.2	0.00030	0.00025	0.01459	0.9979
Logaritmico	0.00038	0.00030	0.01639	0.9972
Newton	0.00055	0.00052	0.02157	0.9969
Dos términos	0.00050	0.00039	0.01877	0.9969
Henderson y Pabis modificado	0.00064	0.00042	0.01944	0.9966
Henderson y Pabis	0.00050	0.00044	0.01987	0.9965
Difusión simplificada de Fick	0.00052	0.00044	0.01987	0.9965
Thomson	0.00156	0.00140	0.05291	0.9647
Wang and Singh	0.00943	0.00836	0.08284	0.9532

Una vez identificados los modelos con mejor desempeño, se procedió a analizar los parámetros de ajuste de cada uno de ellos para establecer correlaciones en función de la temperatura y la velocidad del aire. El modelo de Werma, que mostró el mejor ajuste general, requiere la definición de tres parámetros: a , k y g . Estos parámetros varían en función de las condiciones específicas de secado, y fueron determinados empíricamente a partir de los datos obtenidos en las distintas pruebas.

Tabla 4. Parámetros del modelo Werma en las pruebas realizadas

Velocidad (m/s)	Temperatura (°C)	a	k	g
2	40	11.9232	0.0091	0.0095
2	50	8.4928	0.0111	0.0116
2	60	9.5703	0.0145	0.0154
4	40	14.9463	0.0165	0.0171
4	50	14.9804	0.0203	0.0211
4	60	11.1929	0.0257	0.0273
6	40	0.8399	0.0136	0.0364
6	50	7.9088	0.0247	0.0258
6	60	0.9697	0.0205	0.2754

Modelo de dos términos exponencial

El modelo de dos términos exponencial requiere definir dos parámetros: a y k. Estos parámetros se muestran en la Tabla 5 a diferentes temperaturas y velocidad de secado.

Tabla 5. Parámetros del modelo Dos términos exponencial en las pruebas realizadas

Velocidad (m/s)	Temperatura (°C)	a	k
2	40	1.6367	0.0077
2	50	1.5218	0.0096
2	60	1.6468	0.0124
4	40	1.7102	0.0137
4	50	1.6790	0.0169
4	60	1.7730	0.0212
6	40	0.5286	0.0213
6	50	1.4775	0.0218
6	60	0.6717	0.0243

Modelo de Page modificado

El modelo de Page modificado también utiliza dos parámetros: a y k . Los valores de estos parámetros, obtenidos a diferentes temperaturas y velocidades de secado, se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros del modelo Page modificado en las pruebas realizadas

Velocidad (m/s)	Temperatura (°C)	k	n
2	40	0.0059	1.1345
2	50	0.0080	1.0691
2	60	0.0094	1.1388
4	40	0.0100	1.1866
4	50	0.0126	1.1668
4	60	0.0149	1.2262
6	40	0.0156	0.9417
6	50	0.0184	1.0553
6	60	0.0213	0.9679

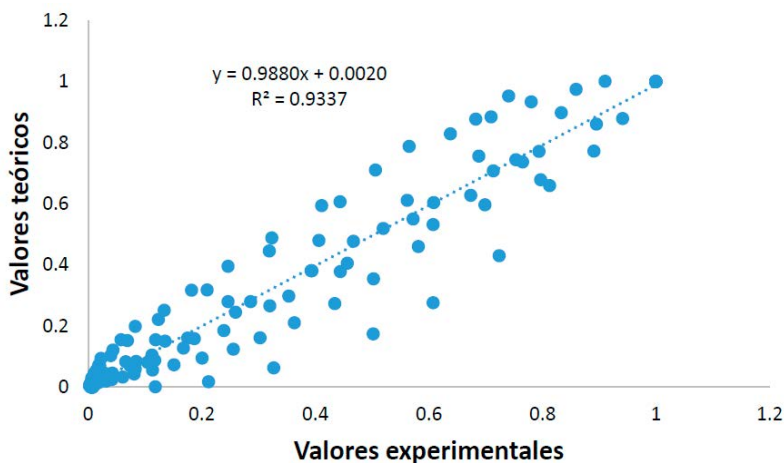
Validación de los modelos desarrollados.

La validación de los modelos matemáticos desarrollados se realizó empleando como criterio principal el coeficiente de determinación (R^2), el cual indica el grado de correlación entre los valores teóricos calculados y los datos experimentales. Este coeficiente permite cuantificar la proporción de la variabilidad de los datos observados que es explicada por el modelo, siendo un valor cercano a 1 indicativo de un ajuste óptimo. En el presente estudio, los tres modelos seleccionados (Werma, Dos términos exponencial y Page modificado) presentaron valores de R^2 superiores al 93 %, lo que evidencia un elevado nivel de ajuste y una adecuada capacidad predictiva en la descripción de la cinética de secado del tomate verde bajo las condiciones experimentales evaluadas.

Para el proceso de validación, se utilizaron los datos experimentales obtenidos en el secador de gabinete bajo condiciones controladas de temperatura y velocidad del aire. A partir de dichas condiciones, y mediante las correlaciones previamente obtenidas para los parámetros de cada modelo, se calcularon las razones de humedad (MR) en función del tiempo. Posteriormente, se compararon los resultados teóricos generados con cada modelo frente a los datos experimentales, y se determinaron las medidas estadísticas correspondientes: el error cuadrático medio (RMSE), el error medio absoluto (MBE) y el valor de χ^2 .

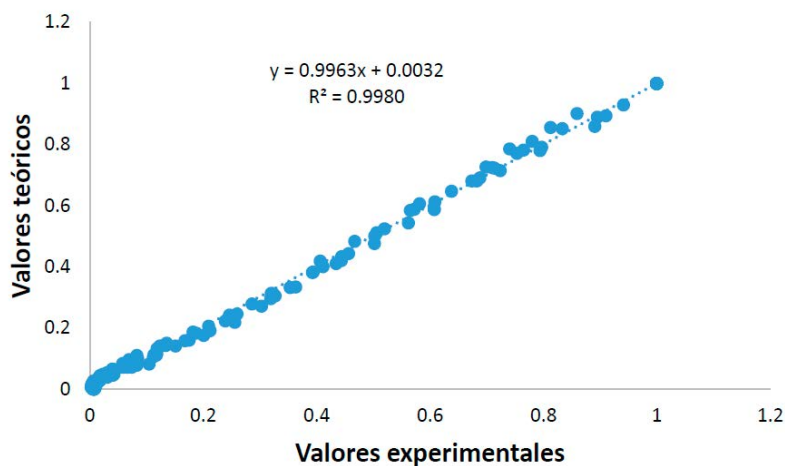
Las Figuras 13, 14 y 15 presentan las comparaciones gráficas entre los datos experimentales y los valores teóricos obtenidos con los modelos de Werma, Dos términos exponencial y Page modificado, respectivamente. Estas gráficas permiten visualizar la calidad del ajuste para cada modelo bajo diversas condiciones de operación.

Figura 13. Comparación entre valores experimentales y teóricos calculados con el modelo de Werma.



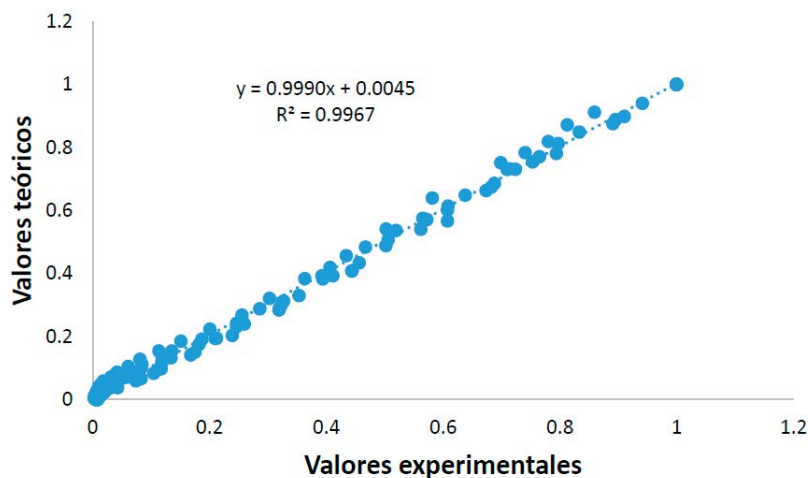
Fuente elaboración propia.

Figura 14. Comparación entre valores experimentales y teóricos calculados con el modelo de dos términos exponencial.



Fuente elaboración propia.

Figura 15. Comparación entre valores experimentales y teóricos calculados con el modelo de Page modificado.



Fuente elaboración propia.

El análisis visual y estadístico reveló que el modelo de Dos términos exponencial es el que mejor reproduce el comportamiento experimental

del proceso de secado, seguido por el modelo de Page modificado, y finalmente el modelo de Werma. Esta jerarquía de ajuste fue confirmada mediante las medidas estadísticas resumidas en la Tabla 7.

Tabla 7. Validación de los modelos matemáticos desarrollados

Modelo	X ²	MBE	RMSE	R ²
Werma	0.00723	0.00714	0.08451	0.9337
Dos términos exponencial	0.00022	0.00021	0.01458	0.9980
Page Modificado	0.00036	0.00036	0.01897	0.9967

Los valores presentados en la Tabla 7 confirman que los tres modelos presentan un ajuste aceptable ($R^2 > 0.93$). No obstante, el modelo de Dos términos exponencial destaca por ofrecer el mejor desempeño general, con un valor promedio de R^2 de 0.998, lo cual garantiza una precisión del 99.8 % en la predicción del contenido de humedad en función del tiempo de secado, dentro del rango de temperaturas de 40 a 60 °C y velocidades del aire de 2 a 6 m/s.

A pesar de los resultados positivos, es importante señalar que el estudio se desarrolló bajo condiciones experimentales controladas y en una escala de laboratorio. Por lo tanto, las conclusiones podrían no ser directamente extrapolables a entornos agroindustriales reales, donde influyen factores como la variabilidad climática, la radiación solar disponible y las características locales de operación. En consecuencia, se recomienda llevar a cabo estudios adicionales en condiciones reales de campo para validar y ajustar los modelos desarrollados, garantizando así su aplicabilidad práctica en contextos productivos diversos.

Conclusiones

El presente estudio permitió realizar una evaluación técnica y económica del secado solar como estrategia sostenible para la conservación del tomate verde, centrando el análisis en distintas configuraciones de secadores: convección natural, convección forzada y condiciones controladas.

Los resultados obtenidos evidencian el potencial de esta tecnología para optimizar el uso de recursos, reducir pérdidas poscosecha y favorecer una producción alimentaria más eficiente y resiliente.

Se comprobó que la temperatura y la velocidad del aire inciden de forma significativa en la eficiencia del proceso de secado, lo que permitió identificar condiciones óptimas de operación. Entre los modelos matemáticos evaluados, el modelo de Werma mostró el mejor desempeño en la representación de la cinética de deshidratación del tomate verde bajo condiciones experimentales controladas.

Más allá de su eficiencia técnica, el secado solar representa una alternativa que promueve el aprovechamiento energético responsable, contribuye a la reducción del desperdicio alimentario y permite agregar valor a productos agrícolas frecuentemente subutilizados. Esto refuerza su utilidad como herramienta en la transición hacia modelos de producción y consumo más sostenibles y con menor impacto ambiental.

Los hallazgos de esta investigación tienen aplicaciones prácticas relevantes para el sector agroindustrial nacional, ya que muestran que la implementación de tecnologías solares de secado puede reducir costos operativos, mejorar la conservación de alimentos y beneficiar directamente a los productores rurales. Además, al emplear fuentes de energía limpia y fomentar el aprovechamiento integral de los recursos, esta tecnología se perfila como una solución viable para enfrentar desafíos vinculados al cambio climático, a la seguridad alimentaria y al desarrollo sostenible de las comunidades agrícolas.

Bibliografía

- Bhanu, A. S., Elavarasan, E., Natarajan, S. K., Anandu, A., & Senin, H. M. (2021). Experimental investigation of drying kinetics of poovan banana under forced convection solar drying. En S. K. Acharya & D. P. Mishra (Eds.), *Current Advances in Mechanical Engineering* (pp. 621-631). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4795-3_56
- Deepak, C.N., & Behura, A.K. (2023). Critical review on various solar drying technologies: Direct and indirect solar dryer systems. *Applied Solar Energy*, 59(5), 672–726. <https://doi.org/10.3103/S0003701X2360073X>

- Elavarasan, E., Natarajan, S. K., Bhanu, A. S., Anandu, A., & Senin, H. M. (2021). Experimental investigation of drying kinetics of poovan banana under forced convection solar drying. En S. K. Acharya & D. P. Mishra (Eds.), *Current Advances in Mechanical Engineering* (pp. 621-631). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8390-4_63
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s. f.). Hambre [Página de inicio]. <https://www.fao.org/hunger/es/>
- Fernandes, L.; Tavares, PB Una revisión sobre dispositivos de secado solar: transferencia de calor, movimiento de aire y tipo de cámaras. *Solar* 2024, 4 , 15-42. <https://doi.org/10.3390/solar4010002>.
- Gilago, M. C., Mugi, V. R., & Chandramohan, V. P. (2023). Evaluating the performance of an indirect solar dryer and drying parameters of pineapple: Comparing natural and forced convection. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(9), 3701-3709.
- Ilikaracan, I., & Appleton, H. (1994). Women's roles in the innovation of food cycle technologies.
- Jangde, K., Singh, A., & Arjunan, T. V. (2022). Efficient solar drying techniques: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 50970-50983. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15792-4>
- Kaimal, A. M., Tidke, V. B., Mujumdar, A. S. et al. (2022) Seguridad alimentaria y sostenibilidad mediante tecnologías de secado solar: un estudio de caso basado en un secador de conducción solar. *Mater Circ Econ*, 4(7). <https://doi.org/10.1007/s42824-022-00051-9>
- Khan, MIH; Batuwatta-Gamage, CP; Karim, MA; Gu, Y. (2022). Comprensión fundamental de los procesos de transferencia de calor y masa para el modelado de secado basado en aprendizaje automático basado en la física. *Energies*, 15, 9347. <https://doi.org/10.3390/en15249347>
- Lodamo, B. Z., Adem, K. D., & Jemal, F. K. (2023). Performance evaluation and comparison of mixed-mode natural convection solar dryer with and without solar air heater for green banana flour production. En B. H. Woldegiorgis, K. Mequanint, M. Z. Getie, E. G. Mulat, & A. Alemayehu Assegie (Eds.), *Advancement of Science and Technology: Green Energy and Technology*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33610-2_16

- Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N. M., & Abdan, K. (2016). Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(3), 599-618. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12196>
- Parvathy, V. K., & Kumar, J. (2023). Convergence of community network and sustainable development goals, Kudumbashree community network. En *SDGs in the Asia and Pacific Region* (pp. 1-25). Springer International Publishing.
- Rabha, D. K., Muthukumar, P., & Somayaji, C. (2017). Experimental investigation of thin layer drying kinetics of ghost chilli pepper (*Capsicum Chinense* Jacq.) dried in a forced convection solar tunnel dryer. **Renewable Energy*, 105*, 583-589. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.091>
- Sharma, A., Chen, C. R., & Lan, N. V. (2009). Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13*(6-7), 1185-1210. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.015>
- Tamasiga, P., Miri, T., Onyeaka, H., & Hart, A. (2022). Food waste and circular economy: Challenges and opportunities. *Sustainability*, 14(16), 9896. <https://doi.org/10.3390/su14169896>

Capítulo 6

La economía circular del agua en la zona metropolitana de Guadalajara

*Hermes Ulises Ramirez Sanchez
Aída Lucía Fajardo Montiel
Samuel Horacio Cantú Munguía*

<https://doi.org/10.61728/AE20251666>



Resumen

El agua es fundamental en la economía circular, así el objetivo de este trabajo es describir la economía circular del agua en la Zona Metropolitana de Guadalajara resaltando su importancia, aplicación y los cambios necesarios para la óptima gestión del recurso hídrico. La economía circular es un modelo económico relacionado con la sostenibilidad y cuyo objetivo es que el valor de recursos, materiales y productos utilizados se mantengan en la economía el mayor tiempo posible, minimizando la generación de residuos. El objetivo de la economía circular es mejorar la eficiencia del uso del agua. Así, el concepto de economía circular del agua se refiere a la posibilidad de volver a utilizar el agua una, otra y otra vez, como sucede en su ciclo natural. La reutilización del agua, permite minimizar el consumo, utilizándola en distintos usos como el riego, limpieza, entre otros. Existen tecnologías para la reutilización del agua y opciones de utilizarla aun sin ningún tratamiento. En su fase de reutilización, con el uso de energías renovables, los residuos se transforman en nuevos recursos.

El objetivo de este capítulo será describir la utilización, reutilización del agua en el ámbito doméstico, industrial y de servicios en la Zona Metropolitana de Guadalajara y proponer nuevos esquemas de reutilización y mejora en las practicas ya realizadas, bajo el modelo de economía circular. El modelo de economía circular y la óptima gestión de los recursos hídricos, necesita un cambio de mentalidad de la sociedad. La economía circular del agua tiene un potencial muy fuerte. En algunos países, existen modelos circulares del agua en muchas ciudades y se está trabajando en multitud de proyectos de modelos sostenibles y de futuro. Sin embargo, en México, aún faltan acciones concretas para su implantación. Para lograr la gestión integral de los recursos hídricos con perspectiva de la economía circular, es indispensable implicar a las administraciones públicas, empresas, organizaciones y ciudadanos;

y generar un diálogo social y participativo, basado en estrategias de educación y comunicación de acuerdo con el tipo de público al que va dirigido. Finalmente, la rentabilidad y sostenibilidad de estos sistemas son cruciales. Los beneficios directos de la economía circular del agua son relevantes, pero también es importante valorar los beneficios indirectos y no monetizables, como el ahorro de agua potable, la reducción de cargas en los sistemas sanitarios, entre otros.

Introducción

El crecimiento poblacional y económico han impulsado un rápido incremento en la demanda de recursos hídricos (WWAP 2015), así el 36 % de la población mundial vive en regiones con escasez de agua y para el año 2050, más de la mitad de la población del mundo estará en riesgo por escasez de agua (HLPW 2018). En particular, la rápida urbanización, especialmente en países de renta baja a media, ha creado varios desafíos relacionados con el agua. Estos incluyen: una degradación en la calidad del agua, un suministro inadecuado y falta de infraestructura de saneamiento, particularmente en asentamientos periurbanos e informales crecientes. En América Latina y el Caribe, solo alrededor del 60 % de la población está conectada a un sistema de alcantarillado y solo un 30 a 40 % de las aguas residuales de la región que se captan se tratan. Estos porcentajes son sorprendentes, dados los niveles de ingreso y urbanización de la región, y tienen implicaciones importantes en la salud pública, la sostenibilidad ambiental y la equidad social.

Los objetivos del desarrollo sostenible (ODS) añaden una nueva dimensión a los desafíos a los que se enfrenta el sector del agua, al centrar la atención en la sostenibilidad. Los objetivos vinculados a este sector incluyen mejorar la calidad del agua, implementar una gestión integrada de los recursos hídricos, lograr eficiencia en el uso del agua en todos los sectores, reducir el número de personas que sufren escasez de agua, y restaurar los ecosistemas acuáticos.

Para lograr los ODS, los gobiernos de la región tendrán que incrementar de manera significativa los niveles de tratamiento de las aguas residuales. Las necesidades de inversión en el sector del agua potable y

saneamiento son enormes, y para mejorar la gestión de las aguas residuales en la región, los países están embarcándose en programas masivos para captarlas y tratarlas. A medida que las ciudades siguen creciendo, existe la oportunidad de asegurar que se realicen inversiones de la manera más sostenible y eficiente posible. El desarrollo urbano futuro necesita enfoques que minimicen el consumo de los recursos y que se centren en la recuperación del recurso, siguiendo los principios de la llamada economía circular. En este contexto, las aguas residuales son y deben considerarse un recurso valioso a partir del cual pueden extraerse energía y nutrientes, así como ser una fuente adicional de agua.

Las aguas residuales pueden tratarse hasta lograr diversas calidades para satisfacer la demanda de diferentes sectores, incluidos la industria y la agricultura. Pueden emplearse para mantener el flujo ambiental, e incluso pueden reutilizarse como agua potable. El reúso del agua residual es una solución al problema de la escasez mundial de agua, puesto que se liberan recursos de agua para otros usos, o para su conservación. Además, los productos secundarios del tratamiento de las aguas residuales pueden convertirse en valiosos para la agricultura y la generación de energía, haciendo que las plantas de tratamiento de aguas residuales sean más sostenibles ambiental y financieramente.

Por consiguiente, una mejor gestión de las aguas residuales ofrece una doble propuesta de valor si, además de los beneficios ambientales y para la salud del tratamiento de las aguas residuales, ingresos financieros pueden cubrir parcial o totalmente los costos de operación y mantenimiento. La recuperación de recursos de las aguas residuales en forma de energía, agua reutilizable, biosólidos y otros recursos como nutrientes, representan un beneficio económico y financiero que pueden contribuir a la sostenibilidad de los sistemas de saneamiento, y de las empresas de agua que los operan. Una de las principales ventajas de adoptar los principios de economía circular en la gestión de aguas residuales es que la recuperación y el nuevo uso del recurso podrían transformar el saneamiento de ser un servicio costoso a uno que es autosostenible y añade valor a la economía.

¿Qué es la economía circular?

Una economía circular es un sistema industrial restaurativo o regenerativo de acuerdo con su intención y diseño. Es un sistema económico que busca minimizar los residuos y aprovechar los recursos lo mejor posible. El método tradicional se basa en una economía lineal con un modelo de producción de “hacer, usar y descartar”. La economía circular reemplaza el concepto de final de vida con la restauración, cambia hacia el uso de la energía renovable, elimina el uso de químicos tóxicos que impiden el reciclaje y la devolución a la biósfera, y busca la eliminación del residuo a través de un diseño superior de los materiales, productos, sistemas y modelos de negocio. Una economía de esa naturaleza se basa en tres principios básicos:

- Diseñar para que no se produzca desperdicio y contaminación.
- Mantener los productos y materiales en uso, y
- Regenerar los sistemas naturales.

La economía circular es un modelo económico relacionado con la sostenibilidad y cuyo objetivo es que el valor de recursos, materiales y productos utilizados se mantenga en la economía el mayor tiempo posible, minimizando la generación de residuos.

¿Qué es la economía circular del agua ?

La economía circular del agua consiste en que las aguas residuales son y deben considerarse un recurso valioso a partir del cual pueden extraerse energía y nutrientes, así como ser una fuente adicional de agua.

El objetivo de la economía circular es mejorar la eficiencia del uso del agua. Así, el concepto de economía circular del agua se refiere a la posibilidad de volver a utilizar el agua una, otra y otra vez, como sucede en su ciclo natural. La reutilización del agua permite minimizar el consumo, utilizándola en distintos usos como el riego, limpieza, entre otros, y utilizar los residuos biosólidos en la generación de energía, como fertilizantes, entre otros.

Una de las mayores ventajas de adoptar los principios de una economía circular en el procesamiento del agua residual es que la recuperación y

reciclaje del recurso podría transformar el saneamiento de ser un servicio costoso a ser un sistema autosostenible que añade valor.

Sin embargo, en la mayoría de las ciudades (caso de la Zona Metropolitana de Guadalajara, ZMG), los servicios de saneamiento y tratamiento de aguas residuales todavía se piensan y planifican de manera lineal. Es más, con mucha frecuencia, el suministro de agua se planifica primero, los sistemas de alcantarillado se planifican después y los insumos de energía para ambos se consideran en ocasiones únicamente una vez que los sistemas han sido diseñados y construidos. A fin de cambiar la manera en que las instituciones abordan las aguas residuales, se necesita un cambio de paradigma en la región.

Las aguas residuales no deberían ser vistas como una carga para los gobiernos y la sociedad, sino como una oportunidad económica que puede convertirse en un recurso valioso.

¿Cómo aplicar la economía circular del agua?

Las aguas residuales (AR) pueden tratarse hasta lograr diversas calidades para satisfacer la demanda de diferentes sectores (industria y la agricultura). Pueden emplearse para mantener el flujo ambiental, e incluso pueden reutilizarse como agua potable. El reúso del AR es una solución al problema de la escasez mundial de agua, liberando recursos de agua (Figura 1).

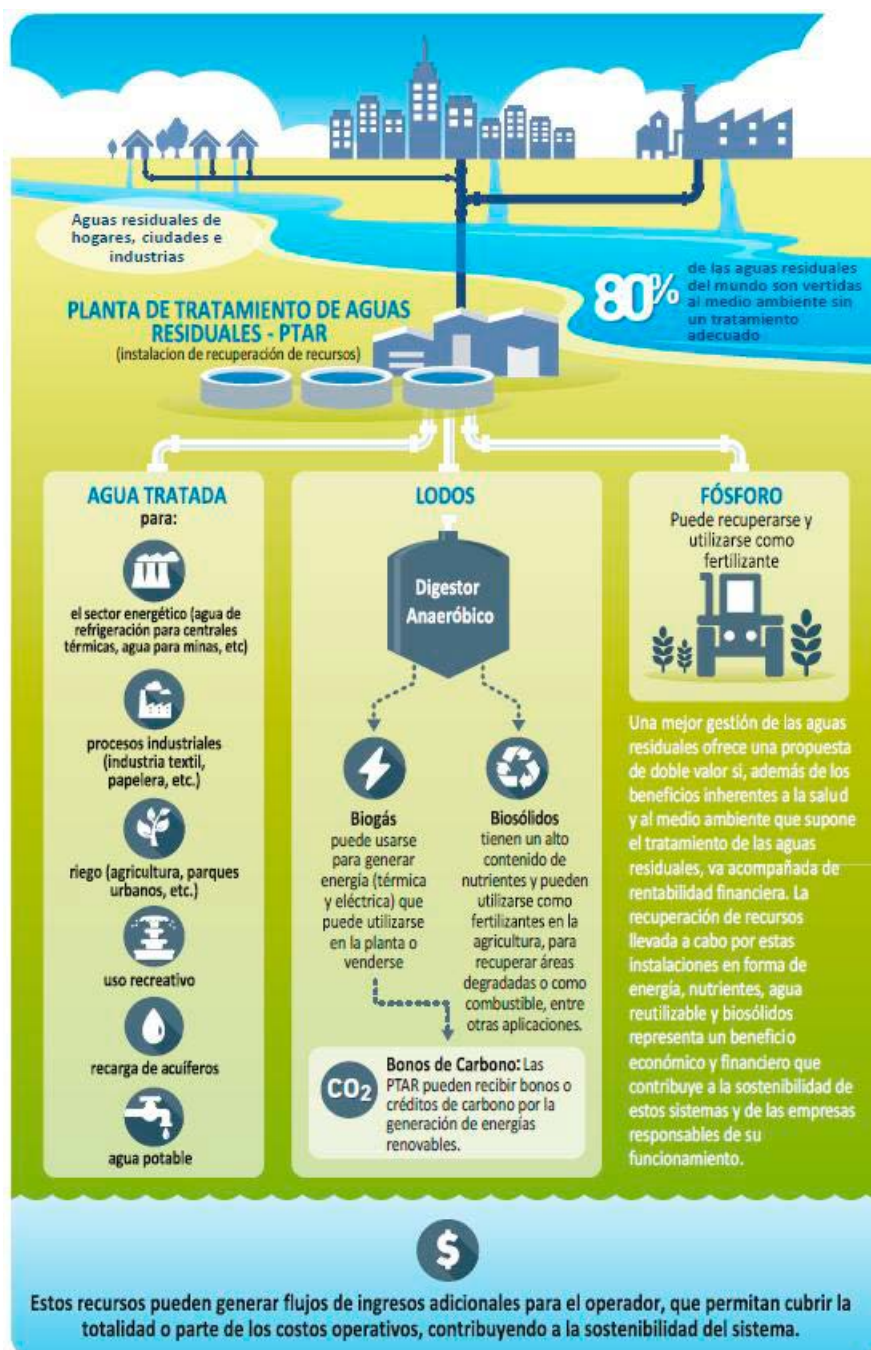
Los productos secundarios del tratamiento de AR pueden convertirse en valiosos para la agricultura y generación de energía, haciendo que las PTAR sean sostenibles ambiental y financieramente (Figura 1).

Una mejor gestión de las aguas residuales ofrece una propuesta de doble valor: además de los beneficios ambientales y para la salud que ofrece el tratamiento de las aguas residuales, es posible lograr flujos financieros que cubran parcial o totalmente los costos de operación y mantenimiento. La recuperación de recursos de aguas residuales en forma de energía, agua, biosólidos y otros recursos (como nutrientes y microplásticos) representa un beneficio económico y financiero que contribuye a la sostenibilidad de estos sistemas y las empresas de agua que los manejan.

Como ya se ha documentado, las plantas de tratamiento de aguas residuales pueden:

- Vender el agua tratada para reutilizarse en la industria y potencialmente cubrir todos los costos de operación y mantenimiento, como en el caso de San Luis Potosí, México; Durban, Sudáfrica; y Aquapolo, Brasil (WWD 2011).
- Generar energía para venderla o para autoconsumo, ahorrando costos de energía, como en el caso de Atotonilco, México (Banco Mundial 2018); Santiago, Chile (Banco Mundial, 2019a); EBMUD en los Estados Unidos; y Ridgewood, en los Estados Unidos.
- Deshacerse de los biosólidos sin costo, como en el caso de Cusco, Perú; y Brasilia, Brasil.
- Vender el fósforo recuperado como fertilizante, como en el caso de Chicago, en los Estados Unidos (ASCE 2013).
- Cubrir los costos de capital y de operación, como en el caso de Cerro Verde, Perú.

Figura 1. Recuperación de recursos en plantas de tratamiento de aguas residuales



El ahorro de costos (además de las consideraciones ambientales) es una de las principales razones para considerar la recuperación de los recursos y para incorporar los principios de una economía circular en las plantas de tratamiento del agua residual en México y en particular en la ZMG. El desafío sigue siendo escalar las experiencias y los proyectos exitosos.

Con frecuencia, el sector privado es renuente a invertir en el sector de saneamiento por el poco rendimiento sobre la inversión y los elevados riesgos. Promover estos nuevos modelos de negocio con flujos adicionales de ingresos a la vez atraería al sector privado para cerrar la brecha de financiamiento.

Existe la necesidad de un entorno habilitador de estos modelos y que permita la inversión privada en infraestructura al unísono con mayor eficiencia en el financiamiento público para mejorar la sostenibilidad de los servicios, particularmente en los países en desarrollo.

Este nuevo enfoque también es necesario para alcanzar los ODS, que añaden una nueva dimensión a los desafíos del sector, al considerar la sostenibilidad. Los ODS se enfocan no solo en la provisión de servicios de saneamiento, sino también en mejorar la calidad del agua, poner en práctica la gestión integrada de los recursos hídricos, mejorar la eficiencia del uso del agua en los diversos sectores, reducir el número de personas que sufren escasez de agua y restaurar los ecosistemas acuáticos, entre otros objetivos pertinentes.

Por tanto, el tratamiento y manejo sostenible de las aguas residuales será crucial para lograr el ODS 6, y además también puede contribuir a cumplir varias otras metas. Por ejemplo, la generación de electricidad en las plantas de tratamiento de aguas residuales usando el biogás producido, puede contribuir hacia el ODS 7 (relacionado con la energía) y el ODS 13 (de acción por el clima); tratar las aguas residuales y restaurar las cuencas hidrográficas también contribuye al ODS 3 (salud y bienestar), al ODS 11 (ciudades sostenibles), y al ODS 14 (vida submarina), entre otros.

Economía circular del agua en la ZMG

En el caso particular de la Zona Metropolitana de Guadalajara, poco se ha hecho en el tema de la economía circular del agua. Muchos académicos y organizaciones no gubernamentales han propuesto diversos mecanismos

de economía circular del agua; sin embargo, estas no se han concretado por falta de voluntad política, tanto de los gobiernos en turno como de los industriales, que son los que más consumen, contaminan y poco tratamiento le dan a sus aguas una vez utilizadas. Los casos conocidos de economía circular del agua en la ZMG se reducen a:

1. La línea morada: En diciembre de 2023, el Gobierno del estado de Jalisco, en conjunto con industriales de El Salto, incluye obras como la ampliación de la PTAR El Ahogado, que fortalecerán el ciclo del agua para que la ciudad recupere 2 mil 600 l/s provenientes del reúso. Se invirtieron 16 mil mdp para realizar obras de potabilización, saneamiento, reúso, distribución y abastecimiento de agua. Sin embargo, no está claro su funcionamiento y a qué empresas provee la Línea Morada (Figura 2).

Figura 2. Línea morada instalada en 2023 entre el Gobierno del estado de Jalisco en conjunto con industriales de El Salto



2. Nidos de lluvia: Es el programa del Gobierno de Jalisco que busca implementar un nuevo modelo de abastecimiento, almacenamiento y uso del agua en las colonias y localidades con mayor vulnerabilidad hídrica del Estado, apostando por una sana relación con el agua, sus ciclos y las disponibilidades naturales. El sistema consiste en la conexión del techo de la vivienda para canalizar el agua de lluvia hacia un almacenaje y, mediante una serie de componentes, limpiar el agua

Figura 5. Algunos hogares de la ZMG reciclando sus aguas de lavado, de agua fría de regadera y de lavado de frutas y vegetales.



¿Existen otras alternativas de economía circular del agua?

Actualmente existen otras alternativas más que pudieran aplicarse a la ZMG dentro de la economía circular del agua. Podríamos pensar en una empresa (estatal o particular) de agua del futuro que aspira a operar eficientemente y a recuperar todos los recursos del agua residual y a ser sostenible a largo plazo. La empresa de agua del futuro opera según los principios de una economía circular y reconoce el valor real del agua residual como recurso: aspira a ser neutra desde el punto de vista de uso de energía eléctrica o incluso puede ser productora de energía, pone en práctica el uso beneficioso de los biosólidos y reutiliza el agua residual tratada. De manera ideal, todos estos elementos proporcionan un flujo adicional de ingresos o ayudan a cubrir los costos de operación y mantenimiento, con lo que la empresa es sostenible tanto ambientalmente como financieramente. Por lo tanto, la empresa del futuro no maneja plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), sino plantas para la recuperación del recurso agua (PRRA). La empresa de agua del futuro también maneja eficientemente su infraestructura a la vez que protege el medio ambiente y la salud de la población.

El primer requisito para pasar a una economía circular y ejecutar la reutilización y recuperación de recursos en instalaciones de tratamiento es asegurar que las instalaciones se gestionan de manera efectiva y eficiente. La gestión efectiva y eficiente empieza con una planificación y un diseño inteligente. Cuando las instalaciones de tratamiento se planifican con la recuperación de recursos y la sostenibilidad en mente, el camino hacia una economía circular queda allanado.

Además de la reutilización del agua para irrigación, en la Tabla 1 se enumeran las maneras de utilizar el agua residual tratada. Los ejemplos aumentan cada año, particularmente en regiones que experimentan escasez de agua. Sin embargo, la mayor parte del agua tratada sigue descargándose en el cuerpo de agua más próximo. En lugar de descargarla, el agua residual puede tratarse hasta lograr diferentes calidades y puede adaptarse a los requisitos de cada consumidor: irrigación de cultivos o campos, recarga de agua subterránea, agua para enfriamiento o agua para procesos industriales, agua potable, etc. Idealmente, el usuario final pagaría una cuota por el agua residual tratada, con lo que se crearía un flujo adicional de ingresos para la empresa, que podría ayudar a cubrir los costos de operación y mantenimiento.

Al mismo tiempo de la comercialización del agua tratada, se pueden obtener recursos mediante el establecimiento de proyectos de recuperación de recursos; pueden aprovechar los flujos adicionales de ingresos o ahorros en costos (Figura 6) para reducir el riesgo financiero de los proyectos de infraestructura, mejorar la tasa de rendimiento y crear un entorno más atractivo para el sector privado. Estos ingresos no dependen únicamente de las tarifas del sector público, sino del mercado para los productos secundarios que se generan durante el proceso de tratamiento de las aguas residuales.

Tabla 1. Potencial de reutilización de las aguas residuales

Agricultura	Recreación	Industria	Medio ambiente
Cultivos de alimentos.	Aplicación de agua para paisajismo.	Lavar/limpiar (alimentos, bebidas).	Recarga de agua subterránea.
Cultivos de alimentos con irrigación por goteo.	Lagos para navegación.	Enfriamiento (generación de energía, papel y textiles).	Incremento del flujo.
Cultivos no alimenticios.	Lagos para nadar.	Agua para procesos, agua para calderas (todas las industrias).	Mejoramiento de la aridez.
Agua para que beba el ganado.	Para fabricar nieve.		

Fuente: USEPA 2012.

¿Existen casos de éxito de la economía circular del agua?

En el mundo se han desarrollado infinidad de proyectos para la aplicación de la economía circular del agua, aunque es verdad que no todos han funcionado, hay muchos casos de éxito que están operando actualmente y que proporcionan todos los beneficios de la economía circular, permitiendo una mejor gestión del recurso agua desde el punto de vista ambiental, sin dejar de lado el lado económico de operación y mantenimiento y generando recursos por la comercialización de agua tratada, como de productos secundarios del proceso de PRRA. En la Tabla 2 se exponen algunos de los mas significativos a nivel mundial y que podrían servir de referencia para establecerlos en la ZMG.

Figura 6. Flujos potenciales de ingresos y ahorros de las plantas de tratamiento para la recuperación de recursos.



Tabla 2. Casos de éxito de proyectos de la Economía Circular del Agua en el mundo

Caso	Modelo de economía circular	Estructura del contrato	Estructura financiera	Factores facilitadores
Bolivia: Santa Cruz de la Sierra	Compra de reducciones de emisiones certificadas (REC) de captura de gas metano. Electricidad para autoconsumo.	Contrato de compra de reducción de emisiones para captura de biogás. Primer contrato de este tipo para países de renta baja.	Banco Mundial a financiar los REC pero se retiró por cambio en la legislación.	Regulatorios: El proyecto no se ejecutó por limitaciones regulatorias en el sector de la energía. Técnicos: Tecnología de captura de metano adaptada a lagunas anaeróbicas.
Egipto: Cairo, New Cairo	Agua tratada reutilizada para agricultura. Biosólidos empleados como fertilizantes.	Primera alianza público-privada (APP) en Egipto Diseño, construcción, financiamiento, operación, transferencia; 20 años.	71% de financiamiento público. 21% de financiamiento sin recurso. 8% de capital.	Institucionales: Fuerte liderazgo del gobierno central (creación de una unidad centralizada de APP). Regulatorios: El completo potencial del proyecto no se ha realizado debido a marcos regulatorios ambiguos o inexistentes. Tanto la venta de créditos de carbono como el uso de la electricidad generada se han estancado. Técnicos: Fuerte apoyo y asesoría técnica externa (Servicio de Asesoría para Infraestructura pública-privada, PPIAF en inglés).
México: San Luis Potosí	Agua residual tratada para la industria (para el enfriamiento de la central eléctrica), agricultura (riego de 500 hectáreas), y conservación ambiental (mejora de los humedales) como parte del plan integral de saneamiento y reutilización del agua residual.	Construcción, propiedad, operación, transferencia (BOOT en inglés); 20 años. Convenio de compra revolvente con la Comisión Federal de Electricidad (CFE).	40% de subvención del gobierno con fondos de FINFRA . 36% de préstamo de Banobras; periodo de vencimiento a 18 años. 4% capital de empresa con capital de riesgo. Garantía de gobierno federal.	Institucionales: Fuerte liderazgo de las autoridades del agua federales y estatales. Colaboración transversal con la CFE. Regulatorios: El alto precio local para la industria para el uso del agua del acuífero promovió el uso del agua tratada. Claridad del mecanismo de pago y de los riesgos. Técnicos: Escasez del recurso agua, múltiples niveles de calidad del agua residual tratada adaptados para cada usuario final.
México: Atotonilco de Tula	Agua residual tratada reutilizada para agricultura (irrigación Valle Mezquital). Autogeneración de energía con biogás para cubrir alrededor del 60% de las necesidades de energía. Biosólidos empleados como fertilizante y mejoramiento del suelo.	Diseñar, construir, poseer, operar, transferir (DBOOT en inglés); 25 años.	49% subvención gubernamental del Fondo Nacional de Infraestructura (FONADIN). 20% de capital del consorcio socio. 31% de financiamiento comercial.	Institucionales: Robusta propiedad de instituciones gestoras de recursos de agua con experiencia. Robusta experiencia de agencia de financiamiento publico. Regulatorios: Reglamentos claros permitieron la reutilización del agua y los biosólidos. Técnicos: Múltiples niveles de calidad del agua residual tratada a la medida de diferentes usos, el Programa de Tecnología para el Tratamiento del Agua adaptado a las temporadas secas.

Caso	Modelo de economía circular	Estructura del contrato	Estructura financiera	Factores facilitadores
Estados Unidos: Ridgewood	Neutralidad energética en la planta por medio del uso del biogás (con co-digestión).	Contrato de compra de energía de 20 años con empresa municipal.	4 millones en financiamiento privado (Ridgewood Green). Certificados de energía renovable.	Institucionales: Fuerte apoyo público y compromiso de la municipalidad. Técnicos: Se empleó innovación para actualizar la infraestructura existente.
Brasil: PRODES	Subvenciones de financiamiento basadas en resultados, atadas a estrictas normas de gestión y ambientales que promueven la eficiencia del recurso. Financiamiento vinculado a la existencia de comités de cuencas que promuevan un método de planificación de cuencas.	No se promueve una estructura de contratación en particular.	Financiamiento basado en resultados.	Institucionales: Fuerte apoyo del Ministerio de Finanzas y la Agencia Nacional del Agua (ANA). Regulatorios: Estricta conexión entre resultados y ayuda financiera Técnicos: Fuerte apoyo técnico de ANA durante el proceso de certificación.
Sudáfrica: Durban	Agua residual tratada vendida para propósitos industriales: Modi (industria de papel) y SAPREF (refinería).	Contrato de Construcción, propiedad, operación, transferencia (BOOT en inglés) a 20 años.	47% de préstamo del Banco de Sudáfrica. 20% de capital. 33% de préstamo comercial.	Institucionales: Fuertes mecanismos de coordinación apoyados por el gobierno local. Técnicos: Cercanía de los usuarios finales del agua residual tratada. Innovaciones tecnológicas para actualizar la planta existente.
Caso	Modelo de economía circular	Estructura del contrato	Estructura financiera	Factores facilitadores
Chile: Santiago, La Fafana	Generación y venta de biogás a un usuario final.	Empresa conjunta + Contrato de acuerdo de compra de biogás (6 años renovables).	Instrumentos de financiamiento empresarial combinado (bonos verdes/deuda). Posibilidad de vender certificados de energía renovable.	Fuerte propiedad de grupos de interés y socios financieramente sólidos. Técnicos: Proximidad a la planta de gas ciudad. Innovaciones tecnológicas para actualizar la planta existente. Regulatorios: Mercado regulado del gas permite el uso del gas para la producción de gas ciudad. Regulación del agua que promueve la innovación: concede un período de cinco años de gracia durante los que las empresas pueden conservar las utilidades obtenidas de una innovación antes de ser obligados a trasladarlas a los consumidores por medio de reducción de tarifas.
Perú: Arequipa, Cerro Verde	Reutilización del agua residual tratada para la industria minera.	Contrato APP de Construcción, propiedad, operación, transferencia (BOOT en inglés) a 29 años adjudicado al usuario final.	100% financiado por el usuario final (empresa minera privada) (ate mining company).	Institucionales: Legislación integral para APP, fuerte apoyo de gobierno local y federal. Técnicos: Socio privado asegura que se eligiera la mejor tecnología para las condiciones locales. Institucionales: Fuerte apoyo del gobierno regional y federal. Escasez de agua: el costo de aprovechar la fuente de agua más cercana era elevado.

¿Porque la economía circular del agua no se ha desarrollado en Mexico y ZMG?

Desafortunadamente, en México y en particular en la Zona Metropolitana de Guadalajara, se han presentado muchos obstáculos institucionales, económicos, regulatorios, sociales y tecnológicos, que tendrán que superarse para lograr el cambio necesario de paradigma para poder implementar exitosamente proyectos de economía circular del agua. Entre estos obstáculos se encuentran:

Obstáculos institucionales:

1. La brecha en el conocimiento y la falta de voluntad política conservan el statu quo.
2. Existe falta de coordinación entre instituciones, legislación y sectores.

Obstáculos económicos:

1. El agua está subvalorada.
2. Se recalca demasiado la promoción y el financiamiento de nueva infraestructura.
3. Las plantas de tratamiento de aguas residuales dependen de financiamiento convencional (es decir, público) y no se aprovechan de las condiciones del mercado ni de incentivos para mejorar la sostenibilidad.

Obstáculos regulatorios:

1. Los marcos regulatorios en vigor con frecuencia son demasiado restrictivos o incongruentes.
2. El control de las descargas industriales es inadecuado
3. Faltan marcos regulatorios y de directrices para la reutilización del agua, para el uso beneficioso de los biosólidos y para la generación de energía en las plantas de tratamiento de aguas residuales.
4. No hay incentivos para la reutilización del agua residual y la recuperación de los recursos, o si existen son insuficientes.

Obstáculos sociales:

1. Las percepciones negativas sobre el agua regenerada y de los productos provenientes del agua residual no se han contrarrestado de manera adecuada.

2. Existe falta de coordinación entre instituciones, legislación y sectores.

Obstáculos tecnológicos:

1. Los criterios de selección de la tecnología están sesgados hacia tecnologías costosas sin considerar qué posibilidades son más idóneas para las condiciones locales.

Así, de acuerdo ante lo anteriormente expuesto, las oportunidades para implementar proyectos de economía circular del agua en la ZMG son amplias de aquí al futuro; sin embargo, es necesario romper con el status quo y convencer a los gobiernos y particulares de cambiar el paradigma de PTAR a PRRA, promoviendo las bondades económicas, políticas, sociales y ambientales de dichos proyectos.

Conclusión

En México y la ZMG sigue existiendo la concepción tradicional de una economía lineal del agua con un modelo de producción de “hacer, usar y descartar”: Es necesario un cambio de paradigma en el que se reconozca la propuesta de valor de las aguas residuales en una economía circular. Cuando se dé este cambio, se podrá desarrollar la economía circular del agua, para tratar de tener un ciclo del agua sano, sustentable y, asimismo, generar ingresos. En resumen, pasar de tener la visión de que las “aguas residuales son un residuo” y empezar a verlas como un recurso.

Referencias

- American Society of Civil Engineers (ASCE). (2013). “Chicago to Add Nutrient Recovery to Largest Plant.” *Civil Engineering*, November 5. <https://www.asce.org/magazine/20131105-chicago-to-add-nutrient-recoveryto-largest-plant/>.
- Banco Mundial y Banco de Desarrollo para América Latina (CAF). (2018). *Agua Residual: de desecho a recurso—Cambiano paradigmas en América Latina y el Caribe*. <http://pubdocs.worldbank.org/en/569441545316362225/FINAL-AGENDA-BancoMundialAgua-Residual-SPA.pdf>.

- Banco Mundial. (2019). *Wastewater: From Waste to Resource-The Case of Santiago, Chile*. Banco Mundial, Washington, DC.
<http://documents.worldbank.org/curated/en/284951573498126244/pdf/WastewaterFromWaste-to-Resource-The-Case-of-Santiago-Chile.pdf>.
- Panel de alto nivel en materia de agua (HLPW). (2018). *Making Every Drop Count. An Agenda for Water ACCIÓN: High- Level Panel on Water Outcome Document*. 14 de marzo de 2018. https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/17825HLPW_Outcome.pdf.
- Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP). (2015). *The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World*. Paris: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, UNESCO.
- Water and Wastes Digest (WWD). (2011). Brilliant Water Reuse in Brazil. *Revista de WWD* (en línea), September 12. <https://www.wwdmag.com/water-recycling-reuse/brilliant-water-reuse-brazi>

Capítulo 7

Monitoreo y control de un reactor batch para la producción de biogás mediante la fermentación anaerobia de sustratos orgánicos de segunda generación, una perspectiva a la economía circular

*Luis Abraham Díaz Alcalá¹
Kelly Joel Gurubel Tun²*

<https://doi.org/10.61728/AE20251673>



¹ Ingeniero en Energía. Departamento de Estudios del Agua y de la Energía, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, México

² Doctor en Ciencias Departamento de Estudios del Agua y de la Energía, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, México <https://orcid.org/0000-0001-9999-9018>

Resumen

Las energías renovables han crecido rápidamente a nivel global para disminuir el uso de fuentes convencionales y mitigar el cambio climático, aunque actualmente representan solo el 20 % de la energía mundial. Los biocombustibles a partir de residuos agroindustriales, como el bagazo del agave, ofrecen una alternativa sostenible, alineada con los objetivos de desarrollo sostenible mediante la digestión anaerobia. Jalisco es el quinto estado con mayor consumo de energía (5.9 % aproximadamente), se ubica en el cuarto lugar en población, tercero en consumo per cápita de energía eléctrica y tercero en generación de residuos sólidos urbanos (Vera Romero et al., 2016). Además, en Jalisco la agricultura, especialmente el cultivo de agave, genera residuos que pueden aprovecharse en este proceso. Uno de los desafíos de la digestión anaerobia es desarrollar un sistema de monitoreo eficiente que mejore la producción de biogás y el tratamiento de efluentes.

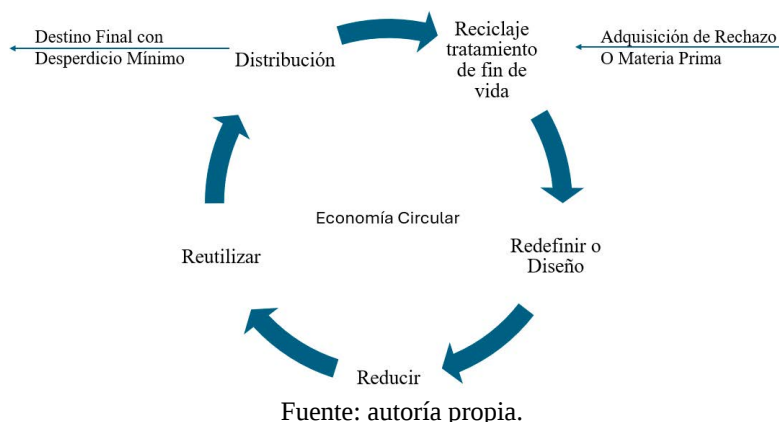
El análisis de datos y señales de los sensores se realiza mediante interfaces gráficas en el instrumento virtual (VI), usando el software LabVIEW en conjunto con un módulo NI PXIe 7042 del fabricante National Instruments para monitorear la conductividad proveniente del inóculo en el reactor Minifors 2. Esto permite integrar parámetros de recolección de señales, aplicando calibraciones y funciones de interpretación de variables para adquirir datos, controlar instrumentos, analizar mediciones y presentar los resultados. LabVIEW utiliza iconos en lugar de código textual para crear aplicaciones que facilitan el desarrollo y la implementación de sistemas industriales y de producción personalizados, aplicables a la caracterización de sensores y el control de motores en sistemas de monitoreo. La implementación de controladores robustos podría mejorar la consistencia de la calidad del efluente tratado, así como del biogás producido (Phaik Eong Poh, 2015). En el presente trabajo se diseñó una configuración P&ID (Piping and Instrumentation Diagram,

por sus siglas en inglés) de sensores y actuadores descritos en la Figura 4, para el monitoreo y control de variables clave del proceso que conducen a su óptima operación.

Introducción

La economía circular es una filosofía de organización de empresas y sistemas inspirada en los seres vivos, que persiguió el cambio de una economía lineal (producir, usar y tirar) cada vez más difícil de implementar por el agotamiento de los recursos hacia un modelo circular y regenerativo, tal y como ocurre en la naturaleza y que además supone una gran oportunidad en el ámbito empresarial (Hermida Balboa C. Catalina & Domínguez Somonte Manuel, 2014). El constante crecimiento y la demanda de recursos energéticos deben considerar el uso de tecnologías que permitan el mejor aprovechamiento de procesos productivos. Para Jalisco, el aprovechamiento de residuos orgánicos de procesos como la elaboración del tequila puede ser promotor para el desarrollo de economías circulares. La producción de biogases como el metano o el hidrógeno proveniente de procesos de fermentación anaeróbica ha tomado relevancia, dado que pueden generarse de procesos que producen materia orgánica no aprovechada y que contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero. Este subproducto de la descomposición natural de la materia orgánica se puede aprovechar si esta se realiza de manera controlada; para esto se propone la utilización de un biodigestor que es instrumentado (Gómez-Camperos et al., 2022).

Figura 1. Diagrama general de la propuesta del ciclo de economía circular.



La digestión anaeróbica (DA) es un proceso biológico en el cual la materia orgánica decae en ausencia de aire. Esto porque el aire consiste en 21 % de oxígeno; el proceso anaeróbico en ocasiones se le conoce como anóxico (Rosato, 2018).

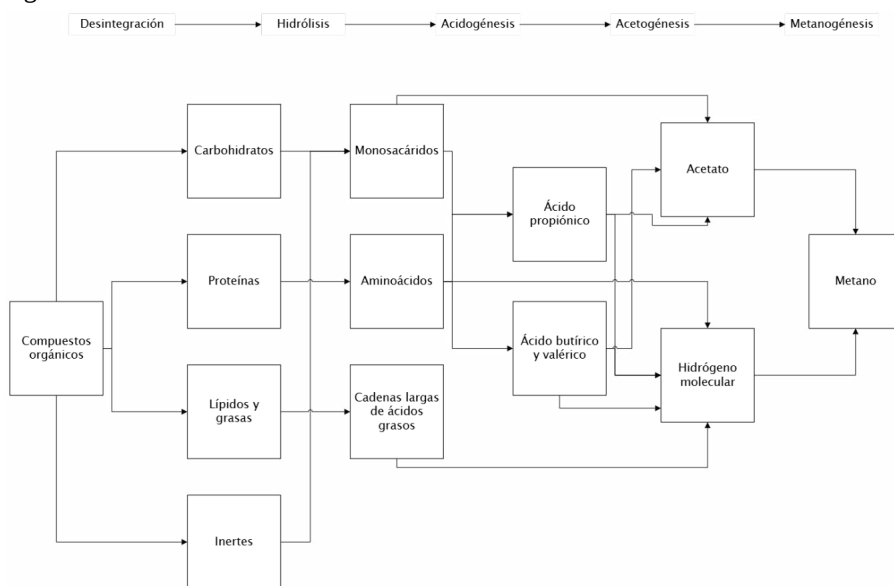
En la naturaleza existen diferentes tipos y procesos de digestión anaeróbica:

- Fermentación alcohólica.
- Fermentación butírica.
- Fermentación láctica.
- Fermentación metanogénica.
- Fermentación oscura.
- Fermentación propiónica.
- Foto fermentación.

Los procesos anaeróbicos son clasificados como fermentación o respiración anaeróbica dependiendo de los tipos de aceptantes de electrones que estén involucrados. En este caso estudiaremos los procesos de fermentación metanogénica y oscura; los microorganismos usarán las rutas energéticas más bajas o que permiten el transporte de electrones de un estado a otro. La producción de biogás en un proceso de fermentación anaeróbica en un reactor depende, en gran medida, de las condiciones de control esperadas. En este sentido, es importante tener en conside-

ración el correcto monitoreo y control de las variables de interés como la temperatura, el oxígeno total disuelto, ácidos grasos volátiles, pH, entre otras. La Figura 2 muestra las etapas relacionadas con la digestión anaerobia. Los compuestos orgánicos de la biomasa son digeridos hasta obtener los componentes esenciales de proteínas, lípidos y carbohidratos; a esta etapa se le denomina hidrólisis. Los monosacáridos, aminoácidos y ácidos grasos son convertidos en ácidos como el butírico o el propiónico; en esta etapa se obtiene como subproducto el biohidrógeno y la acidificación de medio. Finalmente, los ácidos volátiles son convertidos en acetato y, junto con el biohidrógeno, pueden ser convertidos en metano por consorcios de arqueas (Khanal, 2008).

Figura 2. Adaptación de las rutas biológicas principales de la conversión de materia orgánica

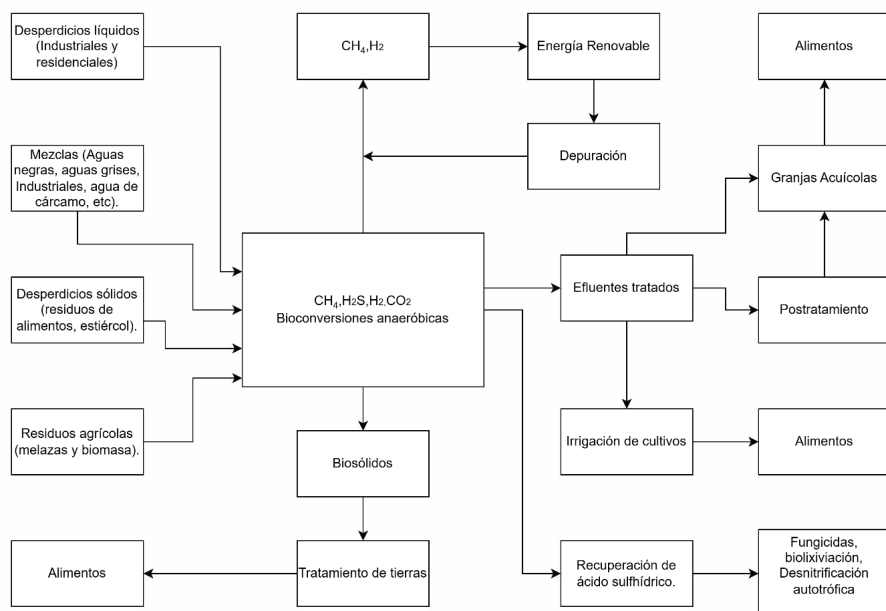


Fuente: Elaboración a partir de Khanal (2008).

Los procesos de digestión se pueden clasificar en dos categorías de transformación bioquímica: el anabolismo, donde existe una producción de células, y los procesos de degradación o catabolismo, que usualmente liberan energía (Ruggeri et al., 2015). En la Figura 3 se muestran los posibles potenciales de la recuperación de energía, de productos, sub-

productos y biocombustibles. Carbono, nitrógeno, hidrógeno y azufre provenientes de residuos de fuentes industriales, municipales y agrícolas se pueden aprovechar para ser convertidos en productos de valor agregado. Esto incluye biogases, biocombustibles, fertilizantes, entre otros (Khanal, 2008).

Figura 3. Adaptación del diagrama esquemático del ciclo de vida del aprovechamiento de diferentes fuentes de desperdicios



Fuente: Elaboración a partir de Khanal (2008)

Para lo anterior, se propone un monitoreo, adquisición y procesamiento de datos según el siguiente diagrama de bloques, el cual describe que el prototipo contempla tres elementos principales de hardware y uno de software. El primer elemento de hardware es el biorreactor Minifors 2 de la marca HT, descrito en la Tabla 1, el cual tiene integrado sistemas de control para la regulación de 3 variables importantes: el pH, la temperatura del inóculo y la agitación. El segundo es un instrumento de medición de gas uFlow de la marca bioprocess que monitorea el flujo en Nml/hr y el volumen acumulado en Nml del biogás generado pro-

ducto de la fermentación anaeróbica y el último elemento de hardware es un chasis PXIe de National Instruments que estará conectado a dos elementos auxiliares, el primero es un sensor Conducell 4uXF procesa señales analógicas en mA y las convierte en unidades de microSiemens en un lazo de adquisición de datos programado en LabView y el segundo elemento auxiliar consta de una placa Arduino, la cual procesa señales analógicas de un termistor NTC (Negative Temperature Coefficients, por sus siglas en inglés) para el monitoreo de la temperatura ambiental del laboratorio.

Materiales y métodos

Inóculo

La inoculación se hizo en tres corridas independientes de 48 horas cada una con la finalidad de observar la generación de biogás en el proceso de acidogénesis, donde existe mayor proporción de biohidrógeno, y monitorear las variables como la conductividad electrolítica, el pH, la temperatura del inóculo y temperatura ambiental. Se realizaron digestiones de muestras de biomasa de una planta de tratamiento de aguas residuales de la planta de tratamiento del Centro Universitario de Tonalá (CUT). Colocando el inóculo a un pH de 6 durante 48 h y a 35 °C de temperatura; lo anterior se realizó para favorecer la eliminación de arqueas y el enriquecimiento de bacterias formadoras de esporas, las cuales en su mayoría tienen la capacidad de producir biohidrógeno (Ntaikou, 2021).

Sustrato y medio de crecimiento

Este proyecto contempla varias etapas de experimentación. En el caso de nuestro estudio, se utiliza un reactor de mezcla continua CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor, por sus siglas en inglés). Y se realizaron digestiones con soluciones minerales conforme a la propuesta conocida en la literatura. La dieta ideal debe tener una tasa de relación entre carbono y nitrógeno (C/N) lo más cercana posible a 30. Dado que el fósforo es un elemento esencial para la vida, los microorganismos deben también alimentarse de este elemento; por tanto, el fósforo debe tomarse en cuenta.

Lo que resulta en una relación óptima de crecimiento para una relación C/N/P cuando es 150/5/1 (Rosato, 2018). Para el sustrato mineral, se preparó una solución 100 ml de agua destilada con 10 g de glucosa ($C_6H_{12}O_6$), 2.5 g de cloruro de amonio (NH_4Cl) y 0.5 g de fosfato de sodio monobásico hidratado ($NaH_2PO_4 \cdot H_2O$). Con esta proporción, el resultado C/N/P se acerca a 100/25/1. La solución restante se mezcla con 3 L de agua destilada y 1 L de inóculo de reúso del lote anterior.

Biorreactor Minifors 2 HT

Los experimentos se realizaron en un biorreactor de fermentación de 4 L Minifors instrumentado con sensores de pH, conductividad, temperatura y volumen de biogás. El proceso fue realizado por lotes y controlado a una temperatura de 35 °C, pH de 6 y una agitación de 50 rpm. Los componentes del biorreactor se describen en la Tabla 1 y los instrumentos de medición y control en la Tabla 2.

Tabla 1. Características y dimensiones del biorreactor de referencia (INFORS HT, 2023)

Componente	Capacidad
Recipientes	6 L
Volumen de trabajo	0.3–1.0 l / 0.6–2.0 l / 1.1–4.0 l
Dimensiones (anch. x prof. x alt.)	455 mm x 375 mm x 740 mm
Impulsores	Accionamiento para microorganismos: 150 min ⁻¹ hasta 1600 min ⁻¹ , accionamiento para culturas celulares: 24 min ⁻¹ hasta 600 min ⁻¹
Temperatura	+ 15 °C (Temperatura del refrigerante + 5 °C) hasta 60 °C
Gasificación por recipiente	Hasta 5 MFCs 2 min ⁻¹ (vvm)
Velocidad de la bomba por recipiente	4 x configurable (velocidad fija o variable) de fábrica: 3x fijo (ácido, álcali, anti-espuma), 1 x variable (alimentación)
Prestación de la bomba	0.0034 bis 3.52 ml min ⁻¹ (estándar), 0.017 hasta 16.13 ml min ⁻¹ , 0.0012 hasta 1.12 ml min ⁻¹
Puertos por recipiente	7.5 mm 4x
	10 mm 4x
	12 mm (Pg13,5) max. 7x
Esterilización	Autoclave

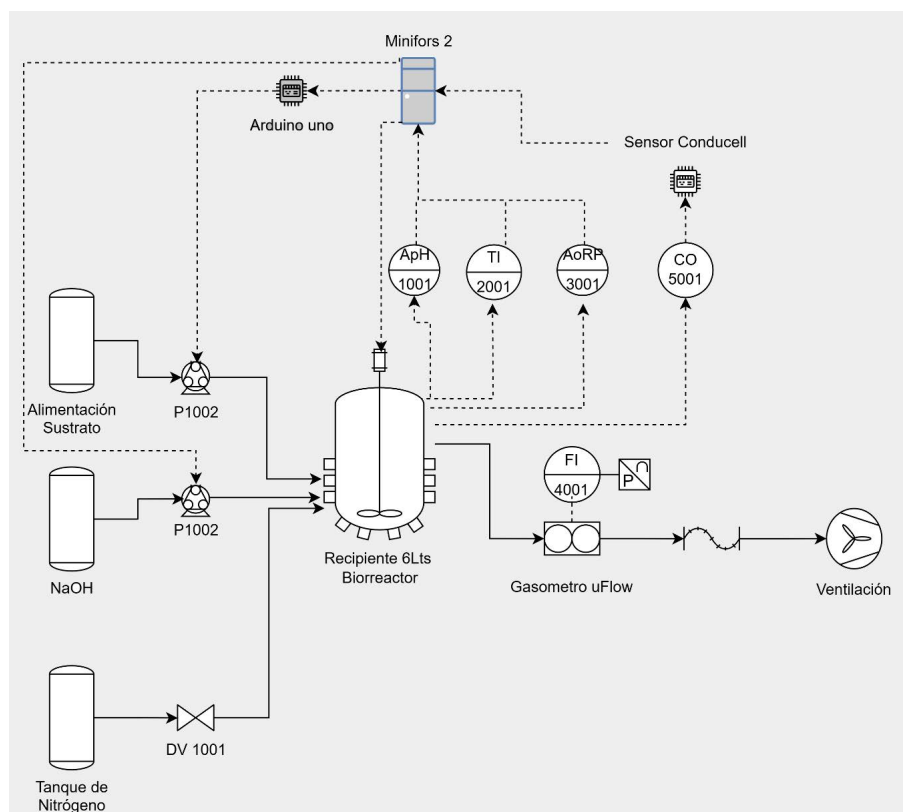
Tabla 2. Características y capacidades de los sensores y del reactor.

Componente	Capacidad y/o rango de operación
Sensor de pH	0-14 unidades de potencial hidrógeno
Bombas peristálticas	Operación máxima 12V a 7.5 W
Agitador	2750 RPM a 42V a 102 Watts
Sensor conductividad	Hamilton Conducell 4UxF de 4 - 20mA a 12V
Sensor temperatura de reactor	100Ω a 0 °C – 100 °C
Sensor temperatura ambiental	Termistor NTC 103
Minifors 2	120/230 VAC 50/60 Hz a 800 W
Control de temperatura	Placa térmica de 630 watts

Sistema y sensores de monitoreo y control

El monitoreo y control de un biorreactor es esencial para mantener las condiciones óptimas para el cultivo de células o microorganismos que promueven la producción de metabolitos de valor agregado y derivados para la producción de biocombustibles. En consecuencia, es importante considerar las variables de interés para la selección adecuada de los instrumentos de adquisición, medición y control. El diagrama de la Figura 4 describe una estructura P&ID de instrumentación y control del biorreactor de fermentación que puede escalarse para hemicelulosa de agave provenientes de alguna empresa productiva del estado de Jalisco.

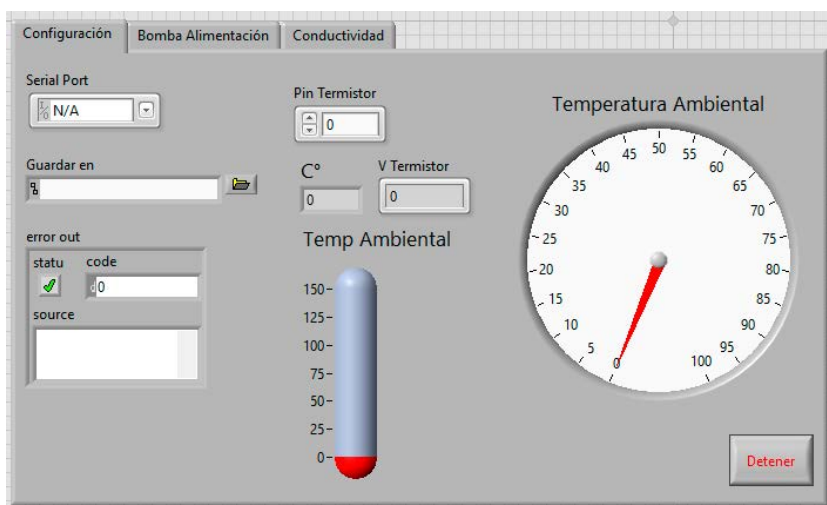
Figura 4. Diagrama P&ID del sistema de monitoreo y control del biorreactor Minifors 2.



Fuente: Elaboración propia.

La adquisición y procesamiento de señales obtenidas del proceso se realizan con equipo National Instruments: chasis PXIe-1078, controlador PXIe 8135, un módulo 4072, una placa Arduino UNO y con software LabVIEW y firmware de código abierto Arduino. El equipo tiene la capacidad para el diseño de estructuras y topologías para la adquisición y almacenamiento de datos para monitoreo y control periférico al biorreactor de fermentación para producción de biocombustibles en tiempo real. Con base en los requerimientos de los componentes para sincronización, validación y procesamiento, es pertinente contar con conocimientos del sistema y pruebas de validación para su correcto funcionamiento. El software y hardware permiten la construcción de esquemas de control en lazo abierto y cerrado para la regulación de los actuadores del reactor. Este proyecto contempla en una primera fase operación en lotes y bajo una estructura de lazo abierto. La Figura 5 muestra un extracto de la interfaz de usuario desarrollada en LabVIEW para la adquisición y gestión de datos provenientes de los sensores de monitoreo del reactor.

Figura 5. Interfaz de usuario para la configuración del sistema en LabView.



Fuente: Elaboración propia.

La estrategia de monitoreo y control consiste en mantener el pH, temperatura y agitación en valores de operación fijos o valor de consigna,

mientras que las variables conductividad y volumen gaseoso de biogás se monitorean con el equipo NI y se envían a un lazo abierto con registro por lotes. La conductividad es una variable importante ya que está relacionada con la etapa de acidogénesis, que indica la producción de ácido grasos volátiles que son necesarios para la producción de biogás. Esto es posible aproximar gracias a la dinámica cinética entre las bacterias acidogénicas y las acetogénicas (Alavi-Borazjani et al., 2020), la siguiente hipótesis ha sido documentada como una manera analítica para aproximar la cantidad de iones conforme la conductividad registrada en los procesos acidogénicos. La relación entre la conductividad y los iones para el proceso anaeróbico del biohidrógeno, con un pH inferior a 6, se puede escribir de la siguiente manera expresión (Aceves-Lara et al., 2012):

(1)

$$G = a * Ace + b * Bu + c * Na^+ + d * HCO_3^- + G_0$$

Donde G_0 es la conductividad inicial, Ace y Bu son la concentración de iones acetato y butirato, respectivamente, y Na es la concentración de iones de sodio utilizada para regular el pH a un valor constante de 6. Las conductividades molares específicas para Ace, Bu y HCO_3^- son 40.9, 35.1 y 44.5 ($Scm^2 mol^{-1}$), respectivamente. Lo cual para futuros estudios sería conveniente implementar.

El volumen de biogás producido es un indicador de la actividad biológica en el biorreactor y las rutas metabólicas del consorcio microbiano. Por lo cual, estas variables son primordiales para el control y optimización del rendimiento en la producción de biogás. Los convertidores de señales convierten señales eléctricas en medidas físicas utilizando una ecuación de calibración específica, proporcionando una interfaz visual para el seguimiento y ajuste de los parámetros del biorreactor. Las señales monitoreadas son utilizadas por el controlador para diseñar un modelo de control que regule la acidogénesis para la producción de biogás.

Resultados

Digestión anaerobia de solución mineral rica en glucosa

Es usual que, para calcular el potencial de producción de biogás de una molécula, esta se compare con una fuente de carbono probada y fácil de digerir como los monosacáridos. Se realizaron experimentos preliminares de producción de biogás utilizando una solución mineral que simule las vinazas ricas en azúcares fermentables. Para alimentar el inóculo se agregaron respectivamente 100 partes de glucosa, 25 partes de nitrógeno y una parte de fósforo (ver sección 2.2).

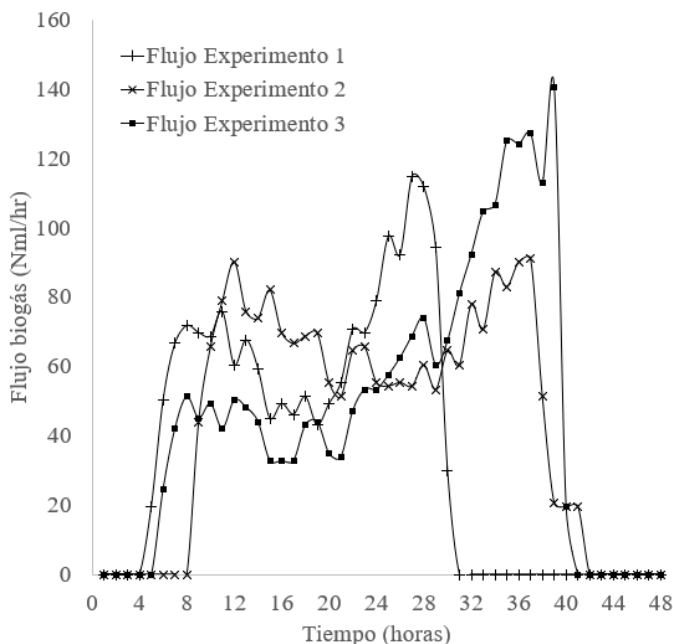
El uso de glucosa como fuente de carbono permitió obtener un potencial de producción de biogás de 508.17 mililitros normales (NmL) en promedio por cada gramo de glucosa agregado, según la siguiente tabla.

Tabla 3. Resumen de resultados generales de los 3 experimentos de 48 horas de DA.

Variable	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
Flujo promedio NmL hr-1	35.64	43.61	46.48
Volumen total NmL	1714	2165	2219
NmL biogás g-1 Carbono	428.50	541.25	554.75

El resultado anterior muestra que existe la posibilidad del uso de diferentes residuos como fuentes de carbono en procesos de digestión, por ejemplo, el uso de vinazas agave. Sin embargo, en términos de la generación de una estrategia de monitoreo y control se requiere un enfoque más práctico, debido a que el seguimiento de la demanda química de oxígeno (DQO) y las técnicas gravimétricas para el inóculo son limitantes debido a su complejidad y costo económico de implementación. La Figura 6 muestra el flujo de biogás obtenido en un periodo de 48 horas.

Figura 6. Flujo de la producción de biogás en el biorreactor instrumentado Minifors 2. a) La fuente de carbono utilizada corresponde a glucosa, además de una fuente de nitrógeno y formato en una relación 100:25:1.



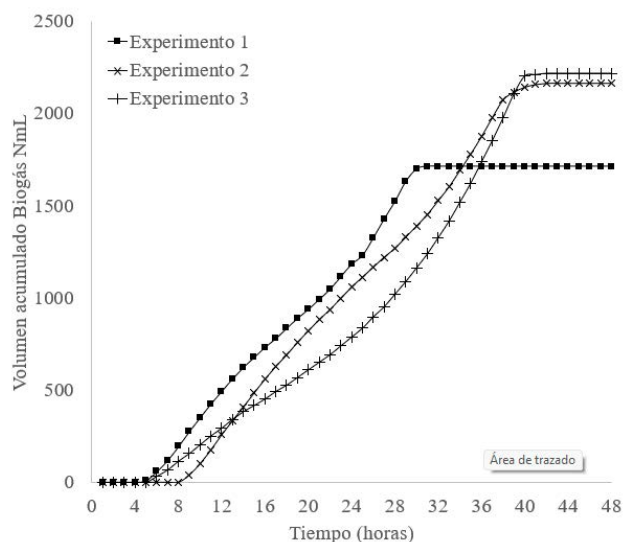
Fuente: Elaboración propia

Señales de monitoreo y control

En la generación de biogás a través de la digestión anaerobia se pueden utilizar diversos sensores. En el caso del biorreactor instrumentado Minifors 2, es relevante contar con un sensor de producción de biogás. Dado que la concentración de los gases (en realidad sus presiones parciales) depende de la temperatura y presión atmosférica, es necesario que el sensor realice los ajustes necesarios a las mediciones. Para el monitoreo de la producción volumétrica de biogás se utilizó un sensor μ Flow; se espera que, para proyectos adicionales, se puedan incorporar sensores de presión atmosférica y de concentración de gas, para que sean contrastados con una cromatografía de gases para una medición más exacta. Este experimento permitió la obtención de 508.17 NmL de biogás en promedio para las 3 corridas de 48 horas por cada gramo de glucosa agregada y por cada uno de los cuatro litros de trabajo del biorreactor. Durante los

experimentos, la mayor velocidad de producción de biogás se encuentra entre las 20 y 30 horas, como se muestra en la Figura 7; por lo que, para un proceso continuo o semicontinuo, los tiempos de retención hidráulica estarían calculados en esta ventana de tiempo.

Figura 7. Producción volumétrica de biogás. Se muestran los valores normalizados de volumen de biogás relativos a la cantidad relativa de inóculo.

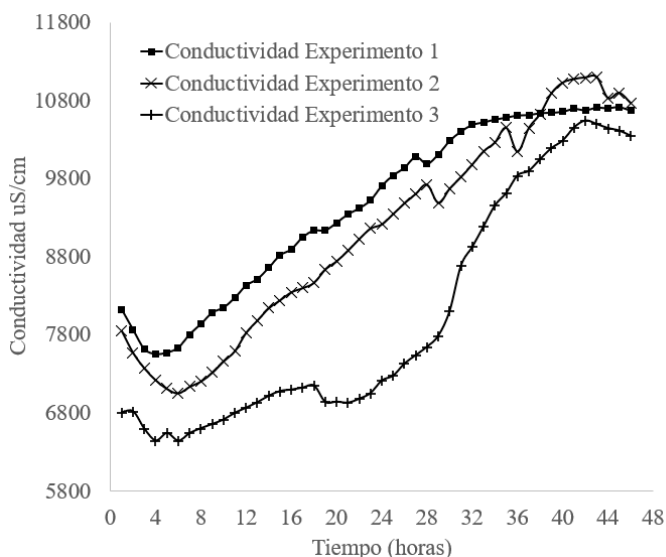


Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, se pueden relacionar algunos parámetros con los procesos biológicos que acontecen dentro del biorreactor; tal es el caso del bioproceso de acidogénesis con el aumento de la conductividad eléctrica. Para monitorear este fenómeno, es necesario contar con un sensor adecuado debido a los altos valores de sólidos disueltos y iones característicos de los procesos de digestión anaerobia. El aumento de ácidos grasos volátiles dentro del biorreactor al final del proceso de acidogénesis hace necesario un control de pH, dado que si este bioproceso prosigue, la producción de biogás es inhibida. Para este experimento se utilizó un sensor de conductividad electrolítica Hamilton Conducell 4UxF, el cual emite una señal analógica de corriente en mA que se puede correlacionar linealmente con la conductividad eléctrica. Al igual que la producción de biogás el aumento de la conductividad eléctrica se encuentra entre las 4 y 24 horas del experimento (Figura 8). Se ha mencionado que el aumento

en la concentración de ácidos volátiles puede inhibir la producción de biogás debido a la modificación del pH, por lo que el monitoreo de la conductividad eléctrica podría ayudar a definir los tiempos de retención (Marín-Peña et al., 2020).

Figura 8. Monitoreo de la conductividad eléctrica en la digestión anaerobia de glucosa. Esta gráfica corresponde al experimento del diagrama implementado en la Figura 6 y con ayuda de la interfaz en la Figura 7.



Fuente: elaboración propia

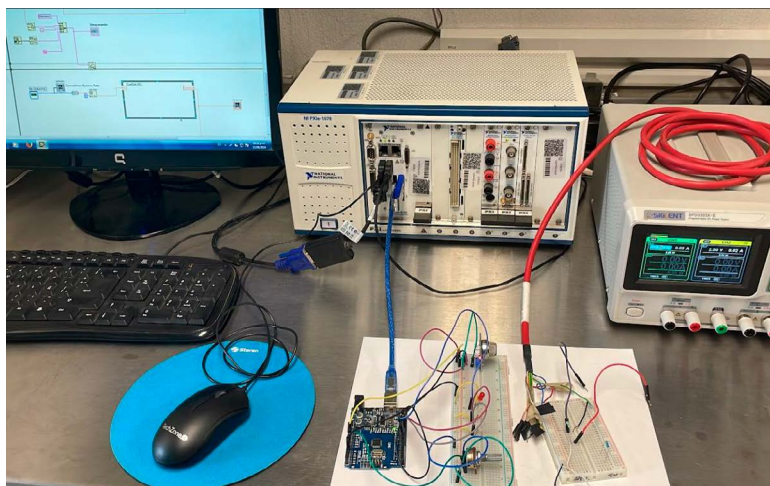
Además, la operación de distintos componentes requiere de un consumo eléctrico; si bien todos ellos están operados y regulados por el reactor con un consumo máximo total de 800 vatios, es importante considerar que los comportamientos de operación de los componentes están en función del control propio del Minifors. Es posible aproximarse y establecer un estimado de consumo energético en kWh dado los periodos de operación que oscilan en el orden de horas. La última corrida experimental cuya base de inóculo y sustrato son aguas de la planta de tratamiento del centro universitario de Tonalá y una solución a base de glucosa. Los resultados de operación de variables térmicas ambientales y del regulador térmico del reactor se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Tiempo de operación y consumo eléctrico.

Sensor / componente	Tiempo de operación	Consumo en kWh
Agitador	48:00:00	0.0629 kWh
Bombas peristálticas	03:25:00	0.0750 kWh
Calentador térmico	48:00:00	0.6000 kWh
Chasis PXIe 1078 (120 VAC a 60Hz a 7A MAX)	48:00:00	0.8400kWh
Total, componentes	Variable	1.5779 kWh
Total, potencia consumida	48:00:00	75.7392 kW

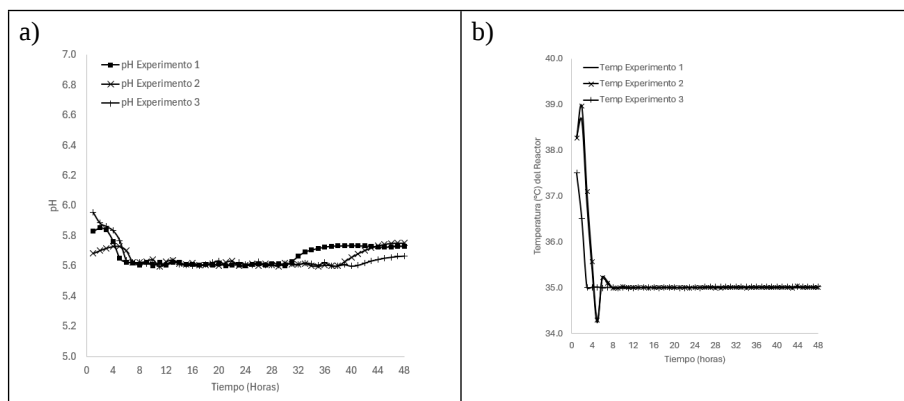
En la Figura 9 se muestra el montaje final del hardware para la adquisición de señales y procesamiento de datos analógicos a digitales. De izquierda a derecha, extracto de pantalla del diagrama de bloques del lazo de adquisición de señales en LabView; al centro, un chasis PXIe 1078 con 3 módulos operando, el controlador PXIe 8135, el módulo 4072 y una tarjeta Arduino Uno; a la derecha, la fuente de poder marca SILIGENT que suministra 24 V al sensor de conductividad 4xUF marca Hamilton.

Figura 9. Sistema de adquisición de señales y procesamiento de datos



Fuente: elaboración propia.

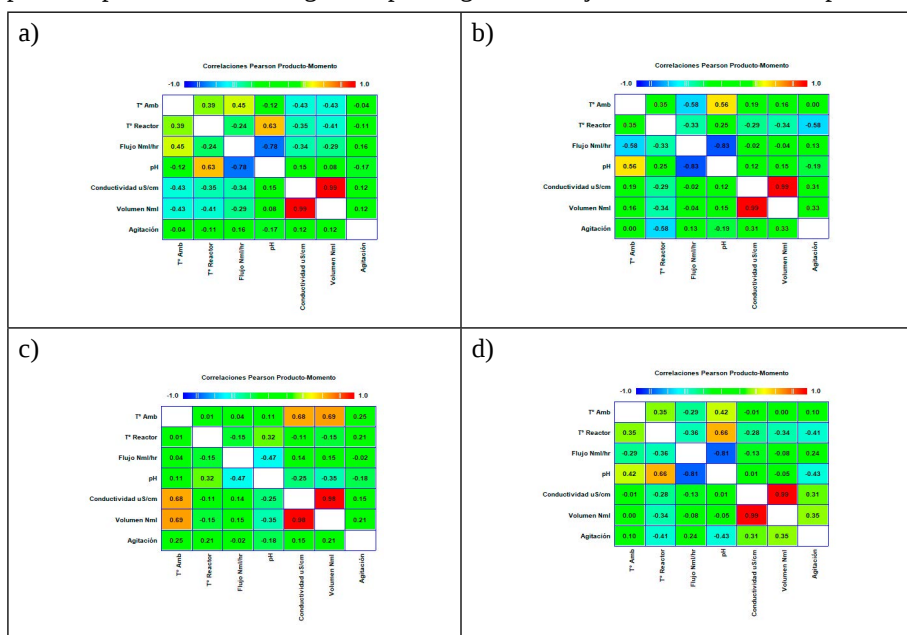
Figura 10. a) Perfil de pH en respuesta de la operación del agitador que mezcla la base alimentada por la bomba peristáltica. b) Perfil de temperatura en el reactor.



Fuente: Elaboración propia.

Una correlación se elaboró con ayuda del software especializado Statgraphic 19, para elaborar una matriz de correlación con los datos de todas las variables adquiridas para cada una de las corridas y una de valor promediado (Figura 11). La finalidad es observar si alguna de las variables monitoreadas tiene correlaciones directas o indirectas en el volumen acumulado de biogás producido. En el análisis se encontró que la conductividad tiene una alta correlación con el volumen acumulado de biogás generado para las condiciones de alimentación enunciadas anteriormente. La segunda variable de interés es el pH contra la temperatura del reactor, donde estas tienen moderadas covarianzas que promueven de manera inversa el biogás; es decir, si se aumenta el pH y la temperatura por encima de los puntos consignados 6 y 35 °C, es posible que se afecte la producción de biogás. El resto de las variables parecen no tener mayor correlación entre ellas. Por tanto, mayores estudios deben realizarse entre la conductividad, la temperatura y el pH en el proceso de la acidogénesis para lograr una mejor caracterización del proceso.

Figura 11. Matrices de correlación de variables, a) correlación de variables en la primera corrida, b) correlación de variables en la segunda, c) correlación de variables en la tercera y d) al promedio de todas ellas. Donde se encuentra que la conductividad tiene una alta correlación con el volumen acumulado de biogás generado para las condiciones de alimentación enunciadas anteriormente. La segunda variable de interés es el pH contra la temperatura del reactor, donde estas tienen moderadas covarianzas que promueven de manera inversa el biogás; es decir, si se aumenta el pH y la temperatura por encima de los puntos consignados 6 y 35 °C, es posible que se afecte la producción de biogás. El resto de las variables parecen no tener mayor correlación entre ellas. Por tanto, mayores estudios deben realizarse entre la conductividad, la temperatura y el pH en el proceso de la acidogénesis para lograr una mejor caracterización del proceso.



Fuente: Elaboración propia

Balance energético

La determinación de la energía neta producida en un biorreactor de DA que genera hidrógeno (H_2) implica un análisis microscópico del balance energético. Este balance se establece como la diferencia entre la energía contenida en el gas producido por unidad de volumen del biorreactor y la energía utilizada para mantener las condiciones de reacción. Es im-

portante mencionar que este análisis puede realizarse tanto en ejecuciones por lotes como en operaciones continuas, cada una con sus propias consideraciones.

Para lograr una comparación significativa, se establece un volumen de referencia y un período de tiempo de referencia para calcular cada término del balance energético

$$E_{neta} = E_{H2} - (E_C + E_p + E_A + E_B) \quad (2)$$

Donde;

E_{neta} = Energía del sistema

E_{H2} = Densidad energética del hidrógeno molecular producido durante el proceso de digestión.

E_C = Energía requerida para el proceso de tratamiento térmico.

E_p = Energía perdida en el proceso, se puede asumir como entropía global del sistema (reacción bioquímica, pérdidas mecánicas, pérdidas térmicas).

E_A = Energía requerida por el agitador.

E_B = Energía requerida por el sistema de bombeo.

La transferencia de calor para la combustión completa de hidrógeno en aire a 25 °C y 1 atm, con agua en su fase líquida en los productos, es -571.66 kJ, lo que significa que la reacción es exotérmica y esa cantidad de calor se libera al entorno. Si esta energía fuera consumida de manera regulada, la generación de hidrógeno molecular durante la acidogénesis varía según distintos autores en función de la concentración de azúcares iniciales (Mateus et al., 2020), esto quiere decir que la cantidad de hidrógeno puede ir desde el 10 % al 34 % de concentración volumétrica de biogás generado en esta etapa. Bajo la consideración anterior, si asumimos los parámetros máximos y mínimos mencionados y con la producción promedio de este estudio, se obtiene un rango menor de 2.5 litros por el

10% de una concentración mínima dando 250 Nml de hidrógeno y para un caso máximo de 850 Nml de hidrógeno molecular. Así pues, la equivalencia energética producida en esta primera etapa de digestión anaerobia también se puede utilizar como fuente de energía renovable (valor energético de 12.71 kJ L⁻¹) (Mateus et al., 2020) ofreciendo un máximo potencial de 10.80 kJ. Lo que está muy por debajo de la energía consumida por el sistema de monitoreo y del mismo biorreactor minifors, aun siendo quemada en presencia de oxígeno para generar una combustión.

Conclusiones

Las distintas fuentes productivas agroalimentarias generan de manera inherente residuos que no siempre son debidamente aprovechados. En el caso de la industria del tequila no es la excepción; su alta demanda nacional e internacional implica una gran cantidad de agave procesado y, en consecuencia, grandes cantidades de vinazas son desechadas. El presente estudio procura dar una aproximación de monitoreo y control de variables importantes en los procesos de DA. En el caso particular, se simuló una solución mineral rica en glucosa, aproximando la dieta ideal que propone la literatura. En este caso de estudio, se evidenció que el incremento de la conductividad electrolítica es acorde con la acetogénesis, con una producción paralela de ácidos que aumentan la conductividad y, en consecuencia, la generación de biogás. Si bien este biogás no fue perfilado mediante cromatografía, tiene una tendencia a una estabilización después de las 30 horas. Lo que nos permite sugerir que, en efecto, la generación de hidrógeno está presente en este proceso. Estudios adicionales e implementación de sistemas más robustos permitirán escalar estas configuraciones a un método productivo en semicontinuo y continuo para distintas fuentes de sustratos orgánicos de segunda generación, tales como los subproductos del proceso de elaboración del tequila, y contribuyendo al desarrollo de ciclos económicos más completos.

Referencias

Aceves-Lara, C., Latrille, E., Conte, T., & Steyer, J. (2012). Online estimation of VFA, alkalinity and bicarbonat e concentrations by electrical conductivity measurement during anaerobic fermentation. *Water*

- Science & Technology*, 65(7), 1281-1289. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.703>
- Gómez-Camperos, J. A., Regino-Ubarnes, F. J., & Jaramillo, H. Y. (2022). Desarrollo de un sistema de supervisión de las variables de temperatura, presión y pH en un Biodigestor Anaeróbico. *Revista Ingenio*, 19(1), 37–42. <https://doi.org/10.22463/2011642x.3035>
- Hermida Balboa C Catalina, & Domínguez Somonte Manuel. (2014). Economía circular como marco para el ecodiseño: el modelo ECO-3. *Informador Técnico* (Colombia), 78(1).
- INFORS HT. (2023). minifors2. <https://www.infors-ht.com/es/biorreactores/biorreactor-de-sobremesa/minifors2/>
- Khanal, S. Kumar. (2008). *Anaerobic biotechnology for bioenergy production : principles and applications*. Wiley-Blackwell.
- Marín-Peña, O., Alvarado-Lassman, A., Vallejo-Cantú, N. A., Juárez-Barojas, I., Rodríguez-Jarquín, J. P., & Martínez-Sibaja, A. (2020). Electrical conductivity for monitoring the expansion of the support material in an anaerobic biofilm reactor. *Processes*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/pr8010077>
- Mateus, S., Carvalheira, M., Cassidy, J., Freitas, E., Oehmen, A., & Reis, M. A. M. (2020). Two-stage anaerobic digestion system treating different seasonal fruit pulp wastes: Impact on biogas and hydrogen production and total energy recovery potential. *Biomass and Bioenergy*, 141, 105694. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105694>
- Ntaikou, I. (2021). Microbial production of hydrogen. In *Sustainable Fuel Technologies Handbook*. INC. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822989-7.00011-1>
- Rosato, M. A. (2018). *Managing Biogas Plants “A practical Guide”* (CRS Press, Ed.; 1st ed.). Taylor & Francis Group.
- Ruggeri, B., Tommasi, T., Sanfilippo Bioh, S., & Bioch, &. (2015). *Green Energy and Technology Through Anaerobic Digestion From Research to Full-scale Applications*. <http://www.springer.com/series/8059>
- Vera Romero, I., Estrada Jaramillo, M., González Vera, C., & Tejeda Jiménez, M. (2016). Biogás como una fuente alternativa de energía primaria para el Estado de Jalisco, México. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XVIII(3), 307–320.

Sistemas productivos sostenibles a nivel territorial mediante la contribución local. Estudio de caso: Unidad productiva BioVida

*Zulay Maribel Cueva Jiménez¹
Patricia Marlene Aguirre Mejía²
Belkis Sulbarán Rangel³*

<https://doi.org/10.61728/AE20251680>



¹ Magister en Desarrollo Local con mención en Proyectos de Economía Social y Solidaria por la Universidad Técnica del Norte (UTN) – Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1967-0886>

² Doctora en ciencias naturales Dr.rer.nat (PhD) en Ecología del paisaje de la Universidad Georg August de Gotinga Alemania. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0218-2197>

³ Doctora en Ciencia de Materiales. Universidad de Guadalajara (UDG), Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería - México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5758-6140>

Resumen

La agroecología promueve sistemas productivos sostenibles y equitativos, combinando los principios de la ecología con las prácticas agrícolas tradicionales a través de unidades productivas locales. En este capítulo se analiza la contribución de la unidad productiva local BioVida del cantón Cayambe de la provincia de Pichincha en Ecuador en el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) a nivel territorial. Esto se realizó mediante la identificación de los vínculos entre los ODS y las actividades de la unidad productiva a partir de observación directa y entrevistas con actores clave y, finalmente, la propuesta de estrategias para fortalecer la unidad productiva. Las actividades productivas identificadas fueron: la preparación del suelo, siembra, fertilización, conservación de semillas, crianza de animales, prácticas fitosanitarias y conservación del suelo. Se identificaron vínculos entre los ODS 2 (hambre cero), ODS 8 (trabajo decente y crecimiento económico) y ODS 12 (producción y consumo responsables). Las estrategias para el fortalecimiento de la unidad productiva, mejorando las capacidades empresariales y el acceso a mercados y recursos financieros. Las actividades productivas de la asociación agroecológica BioVida representan un modelo de desarrollo sostenible y responsable que va más allá de la producción agrícola, promueve la armonía entre la actividad humana y los ecosistemas, generando beneficios tanto ambientales como sociales.

Introducción

Los ODS se remontan a la década de 1980, cuando la comunidad internacional comenzó a reconocer la necesidad de un enfoque más integrado del desarrollo; específicamente, en 1987, cuando la Comisión Brundtland publicó el informe “Nuestro futuro común”, que acuñó el término “desarrollo sostenible” y propuso un marco para un desarrollo

que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras (CEPAL, 2020). En el año 2000, los líderes mundiales adoptaron los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), un conjunto de ocho objetivos con el fin de reducir la pobreza extrema, el hambre, las enfermedades, la mortalidad infantil y materna, la desigualdad de género, la degradación ambiental y la falta de acceso a la educación; los cuales tuvieron un impacto significativo en la reducción de la pobreza extrema, pero también se reconoció que eran insuficientes para abordar los desafíos interconectados del mundo actual (Naciones Unidas, 2015). En 2012, la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible, celebrada en Río de Janeiro, Brasil, marcó el inicio de un proceso de diálogo y negociación para la creación de una nueva agenda de desarrollo global, que contó con la participación de gobiernos, organizaciones internacionales, sociedad civil y el sector privado (CEPAL, 2012). En 2015, los líderes mundiales adoptaron la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que incluyó 17 ODS, los cuales son un conjunto de objetivos globales que abarcan las esferas económica, social, ambiental y de gobernanza, con el fin de promover un desarrollo sostenible que beneficie a todas las personas y al planeta, creando un mundo más justo, equitativo y sostenible; donde su éxito dependerá del compromiso de todos los actores, desde los gobiernos hasta los individuos (CEPAL, 2018).

Por otro lado, el cantón Cayambe de la provincia de Pichincha en Ecuador, posee una historia de notable activismo social y económico, impulsado por organizaciones comunitarias indígenas, y que enfrenta hoy el desafío de compatibilizar su herencia a través de los sistemas agropecuarios, lo que genera una serie de problemas y tensiones en el territorio; donde, por ejemplo, la concentración del agua en pocas manos es un problema histórico que ha afectado a las comunidades rurales: el 86 % de los usuarios comunales, que representan a la mayoría de las comunidades, solo tienen acceso al 22 % del área regada y al 13 % del caudal disponible, y el 1 % de los usuarios privados concentra el 67 % del caudal; sin embargo, las organizaciones sociales están trabajando para promover la producción agroecológica, que es una forma de producción más sostenible (SEDAL, 2019).

La Asociación BioVida es un ejemplo destacado de unidad productiva local dentro de la economía popular y solidaria. Reúne a 13 grupos de distintas comunidades de Cayambe y obtuvo personería jurídica en 2015 con el objetivo de impulsar la agricultura sostenible. Se trata de una organización de productores agroecológicos que busca asegurar el acceso a alimentos sanos, nutritivos y accesibles, mediante prácticas que cuidan el ambiente, la salud y promueven principios de finanzas solidarias y consumo responsable. Entre sus productos se encuentran frutas, verduras, hortalizas, cereales, legumbres y tubérculos. La experiencia de BioVida muestra cómo las unidades productivas locales pueden contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) desde lo territorial, a través del trabajo colectivo y la colaboración comunitaria.

Sin embargo, la escasa información sobre la contribución de las unidades productivas al logro de los ODS dificulta su análisis. En ese sentido, se realizó esta investigación entre las actividades de BioVida y la vinculación que tiene con los ODS para proponer estrategias que fortalezcan a la asociación, a través de un enfoque territorial. El presente estudio se apoyó en la Constitución ecuatoriana (2008), que afirma que toda persona tiene derecho a residir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, garantizando condiciones de buena calidad de vida y sostenibilidad.

La Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales (2016) establece la obligación del Estado de proporcionar asistencia a los agricultores y comunidades rurales para la conservación del suelo. El suelo es un recurso natural esencial para la producción de alimentos y la sostenibilidad del medio ambiente, y su protección es fundamental para garantizar la soberanía alimentaria. Por consiguiente, las comunidades locales son fundamentales para el logro de los ODS en el territorio, a través de las unidades productivas locales como BioVida. Esto se debe a que las comunidades locales contribuyen a la producción orgánica, la conservación del suelo y la biodiversidad, trabajando bajo los principios del desarrollo sostenible, que integran las dimensiones económicas, sociales, ecológicas, culturales y políticas. En este sentido, en el presente capítulo se muestran los resultados del análisis de la contribución de la unidad productiva local BioVida en el logro de los ODS, a nivel territorial, mediante la comprensión de las actividades de la unidad pro-

ductiva, además de la identificación de los vínculos entre los ODS y las actividades de la unidad productiva y la propuesta de estrategias para fortalecer la unidad productiva.

Unidad Productiva BioVida al logro de los ODS

La unidad productiva local BioVida se localiza en el norte de Ecuador, en la provincia de Pichincha, cantón Cayambe (Figura 1); se encuentra conformada por varias comunidades de la zona como Cariacu, Paquiestancia, San José de Ayora, Buena Esperanza y El Quinche. Las integrantes de esta asociación producen alimentos frescos y libres de químicos, cuyos productos comercializan asociativamente en la Plaza Dominical de Cayambe todos los días miércoles desde las 07:00.

Figura 1. Mapa del área de estudio en la provincia de Pichincha, cantón Cayambe, Ecuador.



Fuente: Elaboración propia

El estudio tuvo un enfoque cualitativo sistemático, el cual es un método de investigación que utiliza datos cualitativos para comprender la realidad social. Los datos cualitativos se recopilaron mediante entrevistas,

observación participante y análisis de documentos. En la Figura 2 se muestra un esquema general de los objetivos y metodología aplicada. El enfoque cualitativo sistemático es un método riguroso y sistemático que permite a los investigadores comprender los significados y experiencias de los participantes. El enfoque también es abierto a la interpretación, lo que permite a los investigadores explorar diferentes perspectivas y significados de los datos (Cohen y Gómez, 2019).

Figura 2. Esquema general de la metodología



Fuente: Elaboración propia

El análisis bibliográfico se realizó a partir de una revisión de los derechos de las comunidades rurales sobre la tierra en Ecuador están establecidos y protegidos por varias leyes e instituciones. La Constitución de la República del Ecuador establece el marco legal para la economía popular y solidaria en el país. Las normas de la Superintendencia de Economía Popular y Solidaria regulan el funcionamiento del sector financiero popular y solidario. La Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales establece los derechos de las comunidades rurales sobre la tierra. La Ley Orgánica de Economía Popular y Solidaria define los principios y objetivos de la economía popular y solidaria. Además, documentos de

la Fundación SEDAL, CEPAL y ONU proporcionan información sobre la economía popular y solidaria en la región.

De igual forma, se realizaron entrevistas a informantes claves, según Zanotto y Gaeta (2018), que tuvieron conocimientos profundos y específicos de un tema, y que proporcionaron información valiosa por su experiencia, conocimiento o posición en la comunidad. De esta manera, las informantes son socias de BioVida, garantizando la confiabilidad de los resultados: la administradora de BioVida, la Sra. Virginia Tipanluisa (entrevista en línea), y la Sra. María Guacán (in situ). También se realizó observación directa. Estos datos permitieron analizar las actividades de la asociación. Para identificar la vinculación, entre los ODS y BioVida, se realizó una lista de chequeo. Esta herramienta, de acuerdo con Salamanca (2019), es una lista de elementos que aparecen agrupados con el fin de verificar su cumplimiento y alcanzar un objetivo específico. Finalmente, para la formulación de las propuestas estratégicas se contó con la participación de los informantes claves de la unidad productiva local, a través de las actividades mencionadas anteriormente.

Actividades de la unidad productiva BioVida

Una Unidad Productiva Local (UPL) es una empresa, organización o emprendimiento que realiza una actividad económica en un territorio local. Las UPL pueden ser de diverso tamaño, desde microempresas hasta grandes empresas, y pueden dedicarse a una amplia gama de actividades, como la producción, el comercio, los servicios o el turismo; desempeñando un papel importante en la economía ecuatoriana, ya que generan empleo, contribuyen al crecimiento económico y contribuyen a la riqueza y el bienestar de la comunidad, además de ayudar a conservar el medio ambiente y promover la sostenibilidad (SEPS, 2018)..

Los productores de la asociación BioVida tienen la posibilidad de generar sus propios insumos, como semillas y abonos, a través de prácticas agroecológicas. La agroecología es un enfoque agrícola que busca promover sistemas productivos sostenibles y equitativos, combinando los principios de la ecología con las prácticas agrícolas tradicionales, cuyos principios fundamentales son i) la subsistencia de la biodiversidad,

promoviendo la diversidad de cultivos, de animales y de organismos polinizadores; ii) la sostenibilidad de los recursos naturales, utilizando prácticas que protegen el suelo, el agua y el aire; iii) la eficiencia en el uso de los recursos, utilizando los recursos de manera eficiente, minimizando los desperdicios; e iv) la equidad social, promoviendo, además, la justicia ambiental (Intriago y Gortaire, 2016). Estas prácticas se basan en el entendimiento del suelo como un ser vivo al que hay que alimentar y dar de beber. Un suelo sano da productos sanos; por ello, los productores de BioVida realizan las siguientes prácticas

- Preparación del suelo: Algunos de los agricultores lo realizan manualmente con el azadón y en otros casos se apoyaron en yunta de bueyes
- Siembra: La siembra se realizó colocando semillas en los surcos por donde sale el sol; también se apoyaron en el calendario lunar para la siembra (es parte de la sabiduría familiar).
- Fertilización: utilizaron todo lo que disponen en su granja, como el rastrojo, el abono del animal, la preparación de los bioles, la asociación y rotación de cultivos y el descanso del suelo, que son técnicas que aplican las familias agroecológicas.
- Conservación de semillas: El intercambio de productos es una forma de conservar la semilla, por lo que los agricultores, al menos, sembraron un surco por semilla; de ahí eligieron las mejores semillas para conservar y volver a sembrar.
- Crianza de animales: El estiércol de los animales (vaca, caballos, borregos, cuyes y gallinas) se utiliza para mejorar la fertilidad del suelo y nutrir las plantas. Este estiércol, considerado un fertilizante natural, contiene elementos fundamentales para el crecimiento vegetal, tales como nitrógeno, fósforo y potasio. La aplicación de este abono al suelo contribuye a mejorar su estructura, incrementar la humedad del agua y favorece el desarrollo de las plantas.
- Prácticas fitosanitarias: En el campo, se observaron algunas prácticas fitosanitarias, como la rotación de cultivos, el uso de semillas nativas, la siembra en surcos elevados y el uso de bioinsecticidas; son algunas prácticas que se observaron en campo.
- Conservación del suelo: El uso de cercas vivas es una forma de manejo para reducir la erosión del suelo provocada por los fuertes vientos,

sirviendo para dar sombra a los cultivos y utilizando las hojas como abono y protección para los cultivos, mejorando el microclima del suelo. No sembraron a favor de la pendiente para conservar sus nutrientes y evitar el arrastre de la capa del suelo; no se excedieron con el riego por varias horas, que lo hacen mediante un sistema de riego por goteo, indicando que, también, aprovechan las aguas lluvias.

Todo esto se realizó con la participación de toda la familia, de tal modo que las unidades productivas locales se caracterizaron por la alta participación de la mano de obra familiar. No obstante, la que lidera la granja es la madre de familia debido a que los hijos son estudiantes, el esposo se emplea en construcción y los fines de semana se dedican a las actividades de la agricultura familiar. Gracias a las instituciones de apoyo, las mujeres se han empoderado de las administraciones de las granjas y se han organizado para sacar sus productos agroecológicos en las ferias solidarias. Sin embargo, el ingreso mensual aproximadamente es de USD 300, por lo que también se dedican a otras actividades como la venta de leche, ganado, etc.

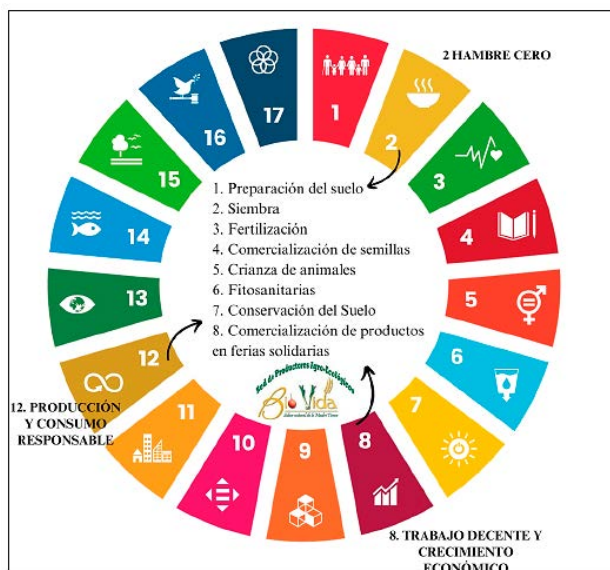
Una característica de este sistema agroecológico es que las viviendas de los agricultores están junto a los terrenos donde cultivan hortalizas, plantas medicinales y pequeños corrales de animales menores, demostrando que la alimentación de la familia incluye una diversidad de alimentos. Asimismo, se evidenció que las actividades agrícolas tienen el objetivo de alimentar a las familias o el intercambio de productos, mientras que la producción pecuaria la ven como ahorro (solo venden cuando lo necesitan). De esta forma garantizan la seguridad alimentaria.

Identificación de los vínculos entre los ODS y las actividades de la unidad productiva BioVida

Los ODS presentaron varios desafíos en territorio, entre los que destacan la falta de un proceso formalizado y bien estructurado, el monitoreo y la evaluación deficiente, y la generalización de los objetivos y sus metas. Y al no contar con suficiente información el verdadero problema es la articulación de los ODS con la asociación BioVida. Por tal motivo, se consideró los objetivos de los ODS y no los indicadores para llevar a cabo

este estudio de caso. En las Figuras 3 y 4 se evidencia la vinculación de los ODS en una unidad productiva a nivel territorial.

Figura 3. Vinculación entre los ODS y BioVida



Fuente: Elaboración propia.

La asociación BioVida contribuye al logro de los siguientes ODS:

- ODS 2: Hambre cero: La asociación agroecológica contribuye a la seguridad alimentaria, ya que produce alimentos sanos y nutritivos de manera sostenible.
- ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico: La agroecología y la comercialización de productos agroecológicos generan empleo en el sector agrícola.
- ODS 12: Producción y consumo responsables: BioVida produce alimentos sostenibles para promover un consumo responsable.

Figura 4. Vínculos de actividades BioVida y las metas de los ODS 2, 8, y 12



Fuente: Elaboración propia.

Contrastando con Agudo (2016), alude a que los Objetivos de Desarrollo Sostenible a nivel local son un desafío, pues no existen procesos formalizados y estructurados para adaptarlos a las necesidades específicas de cada territorio. Además, los ODS son objetivos universales que todos los países deben alcanzar, sin importar su nivel de riqueza o desarrollo. Los países desarrollados tienen más recursos y oportunidades para cumplir los ODS que los países en desarrollo, lo que les da una ventaja en el logro de estas metas.

Por otro lado, Montoya (2023) menciona que la mayoría de los gobiernos locales no cuentan con recursos ni las herramientas necesarias para incorporar los ODS a sus planes de gobierno, debido a la complejidad de los objetivos, la falta de coordinación con el gobierno central y la escasez de recursos. Sin embargo, la Organización de Gobiernos Locales y Regionales (Global Taskforce of Local and Regional Governments) ha elaborado una guía con acciones para la implementación de la Agenda 2030 a nivel local, pero esta guía no es lo suficientemente específica.

Propuesta de estrategias para fortalecer la unidad productiva BioVida

- Fortalecimiento de las capacidades empresariales: Las unidades productivas locales pueden mejorar su desempeño fortaleciendo las capacidades empresariales de sus integrantes. Esto implica brindar formación en temas como gestión, comercialización, finanzas y administración. Algunas estrategias para lograrlo incluyen:
 - Ofrecer cursos gratuitos o subsidiados para productores y trabajadores.
 - Fomentar redes de apoyo entre unidades productivas para compartir experiencias.
 - Impulsar la colaboración con instituciones académicas y centros de investigación.
- Acceso a mercados y recursos financieros: Ampliar el acceso a mercados y recursos financieros también es clave para fortalecer a las unidades productivas locales, ya que mejora sus posibilidades de venta y competitividad. Entre las estrategias que pueden aplicarse se encuentran:
 - Fomentar la creación de cooperativas o asociaciones de productores.
 - Apoyar su participación en ferias y eventos comerciales.
 - Facilitar el acceso a créditos u otras fuentes de financiamiento.

La selección de estrategias debe responder a las condiciones y necesidades particulares de cada unidad productiva y su contexto territorial.

Conclusiones

Las actividades productivas de la asociación agroecológica BioVida constituyen un ejemplo de desarrollo sostenible que trasciende la producción agrícola. Su modelo promueve el equilibrio entre el trabajo humano y el entorno natural, con beneficios tanto sociales como ambientales.

El impulso a la producción de alimentos sanos, el respeto al medio ambiente y la equidad social son algunas de las formas en que estas prácticas agroecológicas contribuyen al desarrollo de las comunidades. La integración de actividades como la preparación del suelo, siembra,

fertilización, conservación de semillas, crianza de animales, control fitosanitario y comercialización de productos, permite abordar de manera conjunta los desafíos agrícolas, económicos y ambientales del territorio.

Estas acciones están directamente vinculadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), al reflejar la necesidad de enfoques integrales que articulen metas sociales, económicas y ecológicas. Adoptar prácticas agrícolas responsables fortalece la resiliencia alimentaria, fomenta un crecimiento económico inclusivo y favorece el uso sostenible de los recursos naturales.

Para consolidar el impacto de BioVida, es necesario implementar estrategias eficaces. Dos elementos clave son el fortalecimiento de las capacidades empresariales y el acceso a mercados y financiamiento. Estas acciones permiten mejorar la eficiencia interna, aumentar la competitividad y adaptarse mejor a los cambios del entorno económico. La combinación de ambas fortalezas incrementa la resiliencia de la unidad productiva y su capacidad de contribuir activamente al desarrollo territorial sostenible.

La experiencia de BioVida demuestra la importancia de enfoques integrados, tanto en lo agrícola como en lo organizacional, para construir un futuro más justo, resiliente y sostenible. Sus resultados pueden servir como referencia para otras comunidades y organizaciones interesadas en avanzar hacia modelos de desarrollo basados en la agroecología y la economía solidaria. En resumen, BioVida representa una propuesta concreta de transformación local con impacto en los ODS, basada en el trabajo colectivo, el respeto por el entorno y la justicia social.

Referencias

- Agudo A. (26 de 02 de 2016). Ya tenemos 17 Objetivos, ¿y ahora qué? *El País*: <https://goo.su/jqHrcih>
- CEPAL. (28 de 12 de 2012). *Rio+20 - Eventos del Sistema de las Naciones Unidas. CEPAL y Desarrollo Sostenible*. CEPAL y Desarrollo Sostenible: <https://goo.su/kFEE>
- CEPAL. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Santiago:

- Naciones Unidas. <https://goo.su/x2IEO>
- CEPAL. (28 de 12 de 2020). *Acerca de Desarrollo Sostenible*. <https://goo.su/kzlS5g>
- Cohen, N; y Gómez, G. (2019). *Metodología de la Investigación, ¿Para qué?: La producción de los datos y los diseños*. Argentina: Teseo. <https://goo.su/1mhnP8>
- Constitución de la República del Ecuador. (2008). Constitución del Ecuador. Registro Oficial N° 449, del 20 de Octubre de 2008. Obtenido de <https://goo.su/71rvn>
- Intriago, R; y Gortaire, R. (2016). Agroecología en el Ecuador. Proceso histórico, logros y desafíos. *Agroecología*, 95-103. <https://goo.su/imQXOAK>
- Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales. (2016). Asamblea Nacional. Ecuador: Registro Oficial N° 711, De 14 de marzo de 2016. Obtenido de <https://goo.su/enUWB0>
- LOEPS. (2023). Segundo Suplemento del Registro Oficial No.254, 22 de Febrero 2023. Quito: Constitución de la República. Obtenido de <https://goo.su/Lkw4>
- Montoya. (04 de 02 de 2023). *Desarrollo Sustentable*. Los problemas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): <https://goo.su/2RCc39l>
- Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de Desarrollo del Milenio*. Nueva York: ONU. Obtenido de <https://goo.su/zvdZ>
- Naciones Unidas Ecuador. (2022). *Marco de Cooperación de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible 2022 - 2026*. Quito: Naciones Unidas en Ecuador. <https://goo.su/BHat>
- PNUD. (2023). *Los ODS en Acción*. <https://www.undp.org/es/ecuador:PNUD>.
- Salamanca, A. (2019). Checklist para autores y checklist para lectores: diferentes herramientas con diferentes objetivos. *Nure*, 1- 4. Obtenido de <https://goo.su/Whgiz>
- SEDAL. (2019). *Mujeres en resistencia y territorios agroecológicos*. Quito: Universitaria Abya-Yala / UPS. <https://goo.su/QSC5>
- SEPS. (2018). *La Economía Popular y Solidaria: Un modelo viable de desarrollo económico*. Quito: SEPS. Obtenido de <https://goo.su/4ozC3H>
- Superintendencia de Economía Popular y Solidaria (SEPS). (2023).

Conoce qué es la Economía Popular y Solidaria (EPS). Quito: SEPS.
Obtenido de <https://goo.su/tfeEYL>

Zanotto, M; y Gaeta, L. (2018). Epistemología personal y aprendizaje en la formación de investigadores. *Redalyc*, 27-51. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/132/13258437011/>

Capítulo 9

Uso de las microalgas *Scenedesmus* para la producción de biodiesel bajo un enfoque de economía circular

*Tania Yamel Navarro Díaz*¹

*Belén Esmeralda Vázquez González*²

*Jesús Barrera Rojas*³

*Belkis Sulbarán Rangel*⁴

<https://doi.org/10.61728/AE20251697>



¹ Estudiante de Ingeniería en Nanotecnología. Universidad de Guadalajara (UDG), Centro Universitario de Tonalá (CUTonalá) México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9003-1617>

² Estudiante de Ingeniería en Nanotecnología. Universidad de Guadalajara (UDG), Centro Universitario de Tonalá (CUTonalá), México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4515-9069>

³ Doctor en Ciencia con la especialidad en Bioquímica del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV)-México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5244-9879>

⁴ Doctora en Ciencia de Materiales. Universidad de Guadalajara (UDG), Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5758-6140>

Resumen

El presente artículo explora el uso de las microalgas del género *Scenedesmus* para la producción de biodiésel dentro de un enfoque de economía circular. Se discuten las limitaciones ambientales de los combustibles fósiles y se propone el biodiésel, producido a partir de microalgas, como una alternativa sostenible. A diferencia de los biocombustibles de primera y segunda generación, las microalgas no compiten con la producción de alimentos y pueden crecer en medios acuáticos improductivos, lo que las convierte en una opción eficiente y de bajo impacto ambiental. Las microalgas *Scenedesmus* se destacan por su capacidad de capturar CO₂ y crecer en aguas residuales, lo que permite no solo la producción de biocombustibles, sino también la mejora de la calidad del agua. Además, se estudia el aprovechamiento de los residuos de biomasa de microalgas a través de la digestión anaerobia para la generación de biogás, incrementando la eficiencia energética del proceso. Los coproductos derivados de la biomasa, como proteínas, carbohidratos y pigmentos naturales, tienen aplicaciones industriales en sectores alimentarios, farmacéuticos y cosméticos. Se concluye que el uso de microalgas para la producción de biodiésel, junto con la valorización de sus coproductos, se alinea con los principios de la economía circular, ofreciendo una vía para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y minimizar los impactos ambientales.

Introducción

El consumo energético mundial está mayoritariamente sustentado en el uso de combustibles fósiles, los cuales, debido a su naturaleza no renovable y a la alta emisión de gases de efecto invernadero durante su combustión, no son sustentables. Estos combustibles contribuyen significativamente al cambio climático y a la degradación ambiental,

además de que su extracción y utilización impactan negativamente los ecosistemas y la salud pública. Ante esta problemática, los biocombustibles de tercera generación han surgido como una alternativa prometedora y sostenible para satisfacer las demandas energéticas. A diferencia de los biocombustibles de primera y segunda generación, que dependen de cultivos alimentarios y residuos agrícolas, respectivamente, los de tercera generación utilizan organismos fotosintéticos como algas, los cuales no compiten con la producción de alimentos y pueden cultivarse en aguas y tierras improductivas no aptas para la agricultura. Estas características hacen que la producción de biocombustibles sea más eficiente, con menos impactos ambientales y una notable disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, se reduce la competencia con la agricultura tradicional, y contribuye en la captura y asimilación del CO₂ atmosférico junto con las diferentes especies que realizan fotosíntesis oxidoreductora.

Al estudiar los microorganismos, organismos vivos de dimensiones microscópicas que incluyen bacterias, arqueas, virus, hongos, protozoos y microalgas, la microbiología es una vía de generación de conocimiento con potencial aplicación tecnológica. Las investigaciones recientes incluyen aspectos relacionados con su estructura, fisiología, metabolismo, genética, ecología y su interacción con otros organismos y el medio ambiente. Esta disciplina es fundamental para comprender cómo los microorganismos afectan la salud humana, animal y vegetal, así como para desarrollar estrategias para prevenir enfermedades infecciosas, controlar la contaminación y promover la salud pública. Desde una perspectiva biotecnológica, estas investigaciones tienen numerosas implicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica, ambiental y de materias primas. Su capacidad metabólica ha sido aprovechada en la fermentación de alimentos, la síntesis de compuestos bioactivos, la remediación de entornos contaminados y la obtención de biocombustibles y precursores químicos de origen renovable.

En este contexto, las microalgas, particularmente aquellas del género *Scenedesmus*, destacan por su capacidad fotosintética y elevada producción de biomasa. Como organismos autótrofos acuáticos, su estudio abarca aspectos fisiológicos, bioquímicos, genéticos y ecológicos, lo que

ha permitido ampliar su uso potencial en procesos industriales sostenibles. Su incorporación en esquemas de economía circular se justifica por su alta eficiencia en la conversión de recursos y la generación de coproductos valiosos, superando en algunos casos el rendimiento de fuentes tradicionales de biomasa (García Cuenca, 2015).

Además, la utilización de microalgas en el tratamiento de aguas residuales representa una estrategia dual: por un lado, permite reducir contaminantes y recuperar nutrientes; por otro, genera biomasa que puede ser transformada en productos de valor añadido. Este enfoque contribuye tanto a la sostenibilidad ambiental como a la eficiencia de procesos en la gestión del recurso hídrico. Por otro lado, el uso de microalgas en el tratamiento de aguas residuales representa una solución innovadora y eficiente para mejorar la calidad del efluente y aprovechar algunos nutrientes que de otro modo serían desechados. Este campo de estudio posibilita la comprensión más profunda de las perspectivas y potencialidades de las microalgas en la economía circular, lo que podría conducir a la implementación de políticas, tecnologías y estrategias más efectivas para promover la transición hacia una economía más sostenible. Este capítulo tiene como objetivo determinar la viabilidad del aprovechamiento de las microalgas del género *Scenedesmus* y sus residuos para la producción de biocombustibles y coproductos.

Productividad microalgal a través de la fotosíntesis y la digestión anaerobia

Las microalgas son organismos de una sola célula que tienen la habilidad de llevar a cabo la fotosíntesis y pueden existir tanto en colonias como en forma individual (Williams y Laurens, 2010). Las microalgas son microorganismos unicelulares de tamaño diminuto (2-200 μm), pertenecientes a distintas filogenias. Su metabolismo puede ser autótrofo o heterótrofo y, aunque la mayoría son eucariotas, las cianobacterias, siendo procariotas, a menudo se clasifican como microalgas (Greenwell et al., 2009). Varios tipos de microalgas pueden crecer utilizando fuentes orgánicas de carbono, lo que los convierte en cultivos heterótrofos, pero estas condiciones pueden propiciar la contaminación, la insaturación de ácidos grasos y aumentar los costos. Sin embargo, existen microalgas

autótrofas que solo necesitan compuestos inorgánicos como CO_2 , minerales, agua y luz para su desarrollo (Huang et al., 2010).

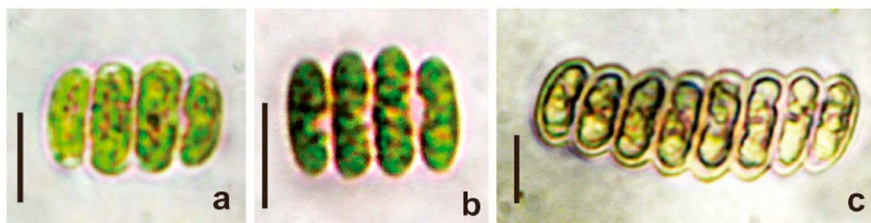
Existen tres clases principales de microorganismos que aprovechan la energía lumínica de diversas maneras: a) Las cianobacterias y algas, realizan la fotosíntesis oxidoreductora, produciendo oxígeno y utilizando fotosistemas I, II y la enzima RubisCO para fijar el CO_2 , b) Eubacterias fotosintéticas, que llevan a cabo la fotosíntesis oxidoreductora anaerobia, sin producción de oxígeno y solo con el fotosistema I o II (dependiendo del phylum) y c) Halobacterias, que no cuentan con clorofila ni con un sistema de transporte de electrones fotosintético, en su lugar, poseen una bomba de protones dependiente de la luz para generar energía (fotosíntesis no oxidoreductora), aunque no producen poder reductor y requieren una fuente orgánica de carbono. Las cianobacterias y otras bacterias fotosintéticas pertenecen al dominio Bacteria, mientras que las algas verdes, rojas y cafés pertenecen al dominio Eukarya, y las halobacterias pertenecen al dominio Archaea. Así, la habilidad de transducción de energía solar en energía química se encuentra en los tres dominios de la vida, evolucionando y apareciendo con distintos mecanismos moleculares.

La heterotrofia es un proceso biológico en el cual los organismos obtienen su energía y nutrientes a partir de la materia orgánica, en lugar de producir su propio alimento a través de la fotosíntesis o la quimiosíntesis. Los organismos heterótrofos, como muchos tipos de bacterias, hongos, animales y algunos protozoos, dependen de la degradación de compuestos orgánicos complejos, provenientes de otros seres vivos, para su supervivencia. El proceso de degradación anaerobia no puede ser realizado por un único tipo de bacteria; en cambio, implica un ecosistema complejo en el que diversos grupos bacterianos cooperan de manera sinérgica para transformar la materia orgánica en metano y dióxido de carbono (Anderson et al., 2003). La digestión anaerobia es un conjunto de procesos biológicos donde existen distintos microorganismos que descomponen la materia orgánica sin la presencia de oxígeno (Ramos, J., 2014). Este método se utiliza para gestionar residuos de origen orgánico y como una técnica de generación de energía renovable a partir de diversos materiales orgánicos, excluyendo a la madera (AEBIOM, 2009).

Características generales de las microalgas del género *scenedesmus*

La microalga *Scenedesmus* pertenece a la división *Chlorophyta*, clase *Chlorophyceae*, orden *Chlorococcales*, familia *Scenedesmaceae* y puede encontrarse solitaria o en parejas formando cenobios (Villasmil et al., 2004). *Scenedesmus* se destaca por su capacidad de tolerar altas concentraciones de nutrientes presentes en las aguas residuales, su elevada actividad metabólica y su resistencia a las fluctuaciones ambientales, factores que contribuyen a su prevalencia en estos entornos. El género *Scenedesmus* alberga un total de 456 especies, aunque solo 72 han sido oficialmente reconocidas desde el punto de vista taxonómico. Estas microalgas, típicamente, se encuentran de manera individual o formando colonias, dispuestas longitudinalmente en grupos que pueden contener de 2 a 32 células, con una media de 4 a 8 células por grupo. En ocasiones, estas colonias están envueltas por una matriz mucilaginosa. Las células de *Scenedesmus* suelen tener dimensiones que oscilan entre 3 y 78 μm de largo y de 2 a 10 μm de ancho, adoptando formas que van desde casi esféricas hasta elipsoidales o alargadas. Su pared celular está compuesta por una capa hemicelulósica, que en algunas especies puede contener esporopoleninos. *Scenedesmus* se desarrolla en aguas dulces ricas en nutrientes y muestra una notable resistencia a la contaminación. Por esta razón, es común encontrarla en plantas de tratamiento de aguas residuales, donde contribuye a oxigenar el ambiente, acelerando así el proceso de depuración y beneficiando a las bacterias aerobias (Rawat et al., 2011).

Figura 1. Imágenes de microalgas: a) *Scenedesmus acunae*, b) *Scenedesmus ecornis* and c) *Scenedesmus ellipticus*. La barra corresponde a 10 μm



Fuente: modificado de Peixoto et al., 2015.

La producción de microalgas implica la cultivación controlada de estos diminutos organismos en medios adecuados, optimizando condiciones como la luz, la temperatura, el pH y los nutrientes para maximizar la biomasa y la productividad. Una vez obtenida la biomasa microalgal, se procede a los procesos de transformación, que incluyen la extracción de componentes valiosos como lípidos, que pueden ser utilizados en la producción de biocombustibles; proteínas, que encuentran aplicación en la alimentación animal y humana; pigmentos como la clorofila, carotenoides y ficobiliproteínas, utilizados en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica; y compuestos bioactivos, como antioxidantes, ácidos grasos omega-3 y polisacáridos, que tienen potencial en aplicaciones nutraceuticas y terapéuticas (Rawat et al., 2011). En la Tabla 1 se muestra una composición nutricional porcentual y másica del género *Scenedesmus*.

Tabla 1. Composición fisicoquímica de la biomasa *Scenedesmus* (Andrade et al., 2019)

Contenido (%)						Producción (g/L)
H	CEN	PT	EE	FC	NTD	
7.85	28.13	33.15	2.97	11.83	56.13	0.31

H: Humedad; CEN: Cenizas; PT: Proteína verdadera; EE: Extracto etéreo; FC: Fibra cruda; NTD: Nutrientes digeribles totales.

Implementación del cultivo de microalgas

Se han explorado diversas fuentes de nutrientes y sustratos para el cultivo eficiente de microalgas, con el objetivo de maximizar la producción de biomasa y compuestos de interés. Entre estas fuentes, se ha investigado el uso de sustratos orgánicos, aguas residuales y nutrientes comerciales para promover el crecimiento óptimo de las microalgas (Andrade et al., 2009).

Además, se ha explorado el uso de agua residual de pescadería como medio de cultivo para la producción de biomasa de la microalga *Scenedesmus* sp. Esta agua residual se preparó mediante la mezcla de restos de pescado con agua potable, seguida de un proceso de biodegradación aeróbica inducida durante tres días a temperatura ambiente. Los resultados demostraron que *Scenedesmus* sp. logró adaptarse a las condiciones

externas de cultivo, mostrando un crecimiento unialgal y exhibiendo ventajas competitivas en comparación con otros tipos de cultivos a escala piloto. Asimismo, se resaltó la viabilidad de utilizar residuos de pescadería como una fuente de nutrientes para la producción de biomasa de microalgas. Estudios anteriores han demostrado que otras microalgas, como *Chlorella* sp., también pueden ser cultivadas a cielo abierto utilizando efluentes pesqueros, lo que sugiere un potencial para el tratamiento de aguas residuales y la producción de biomasa microalgal con aplicaciones en diversos sectores industriales. Estos hallazgos subrayan la importancia de investigar y desarrollar métodos de cultivo sostenibles y eficientes para aprovechar los recursos naturales y reducir los impactos ambientales asociados con la producción de biomasa microalgal.

Figura 2. Vista aérea de un sistema de cultivo de microalgas en aguas residuales. Las microalgas cumplen una doble función: biorremediación y producción de biomasa.

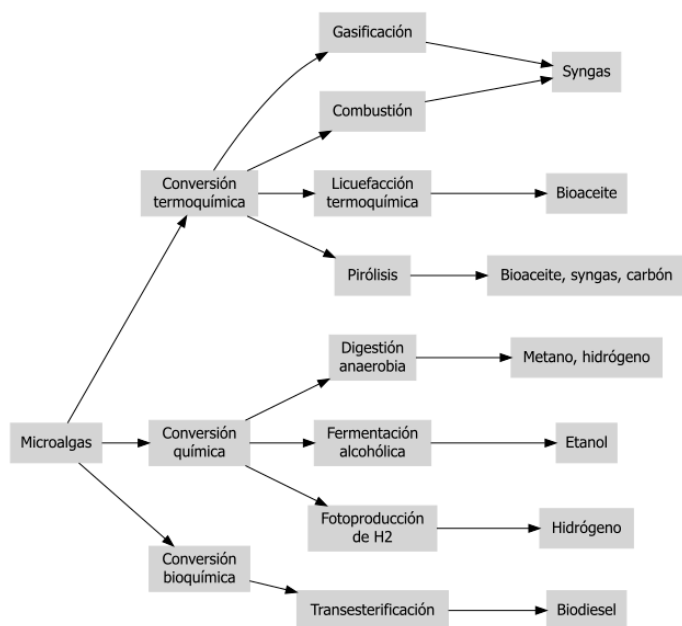


Fuente: Acuicola, M., A. P. Y. D. (s. f.).

Usos potenciales de cultivos microalgales para la generación de energía

El uso de energías renovables se ha convertido en una prioridad para enfrentar los desafíos energéticos y ambientales actuales. Según la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE), estas fuentes son prácticamente inagotables y técnicamente viables. Entre estas energías se encuentran la solar, eólica, hidráulica, biomasa, geotérmica y oceánica. A partir de su biomasa e incluso sus rutas metabólicas, es posible obtener diferentes tipos de biocombustible, tanto líquidos como el bioetanol (a partir de los hidratos de carbono), gaseosos como el biometano y el biohidrógeno, además del syngas (obtenidos a partir de cualquier componente orgánico) o sólidos. Todos los anteriores poseen potencialidades para su combustión para la generación de electricidad (Brennan et al., 2009).

Figura 3. Procesos de conversión de las microalgas a biocombustibles.



Fuente: Modificada de Ramos, 2014.

Además de las vías convencionales de conversión termoquímica, como la gasificación para la producción de syngas, la licuefacción termoquímica para obtener bioaceites y la pirólisis para la generación de carbón, existen rutas bioquímicas significativas. Estas incluyen la producción de biogás mediante digestión anaerobia (CH_4); la obtención de bioetanol a través de fermentación; la generación de biohidrógeno mediante procesos de digestión anaerobia acidogénica y mediante la producción fotobiológica; la producción de biodiésel a partir de la transesterificación de los lípidos, todas ellas ampliamente estudiadas para aprovechar su potencial energético.

Biodiesel como alternativa energética

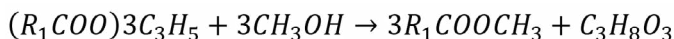
La alternativa más importante a los combustibles fósiles convencionales en la actualidad es el biodiésel. Este se refiere a cualquier tipo de combustible similar al diésel que se obtiene a partir de materiales biológicos renovables y que generalmente necesita un proceso especial para convertirse en combustible (Ahmad et al., 2011). El biodiésel se ha convertido en una opción factible para reemplazar el diésel proveniente del petróleo (Taher et al., 2014). Esto se debe a sus múltiples beneficios, como su capacidad de biodegradarse y su baja toxicidad. Además, su quema genera menos emisiones de sulfatos, compuestos aromáticos, dióxido de carbono, monóxido de carbono y humo. Al contener más oxígeno, se logra una combustión más completa y una reducción en las emisiones (Atabani et al., 2012).

El biodiésel es un combustible alternativo al diésel tradicional, generalmente caracterizado como ésteres monoalquílicos derivados de aceites vegetales, grasas animales e incluso aceites usados, como los provenientes de la fritura (Knothe y Dunn 2001). La producción de biodiésel implica la reacción de aceite o grasa con un alcohol monohídrico en presencia de un catalizador, comúnmente una base como hidróxidos o metanolatos de sodio o potasio. El metanol es el alcohol más utilizado en la fabricación de biodiésel debido a su menor costo, haciéndolo competitivo en comparación con el diésel convencional derivado del petróleo (petrodiesel) en varios aspectos técnicos. Las ventajas técnicas del biodiésel incluyen

su biodegradabilidad, un alto punto de inflamación (lo que aumenta su seguridad en el manejo y almacenamiento), la reducción de la mayoría de las emisiones y una excelente capacidad de lubricación.

Para un triglicérido genérico con la estructura $R_1\text{-COO-CH}_2\text{-COO-CH-COO-CH}_2$, donde R_1 , R_2 , y R_3 son cadenas alquílicas, la reacción específica utilizando metanol (CH_3OH) se describe de la siguiente manera:

Ec. 1



Donde:

- $(R_1\text{COO})3C_3H_5$ es un triglicérido
- $3R_1\text{COOCH}_3$ es el metil éster de ácido graso (biodiesel)
- $C_3H_8O_3$ es glicerol

En el ámbito de la biorrefinería, se utiliza el concepto de biorrefinación, de manera similar a las refinerías de petróleo, para procesar biomasa sostenible y generar energía, biocombustibles y productos de alto valor. Esto incluye el fraccionamiento de la biomasa de microalgas para obtener compuestos de alto valor agregado y lípidos destinados a la producción de biodiésel. La viabilidad económica de producir biodiésel se puede lograr al integrar la producción con otros coproductos de la biomasa, como proteínas, carbohidratos y compuestos funcionales valiosos.

En este contexto, los sistemas de doble propósito se han conceptualizado para reincorporar componentes nutritivos en aguas residuales en la generación de biomasa. Estos sistemas permiten obtener productos de alto valor y biocombustibles mediante procesos como la biorremediación, la obtención de biogás a través de la digestión anaerobia de residuos y la recuperación de biomasa con métodos mecánicos y fisicoquímicos. Este enfoque modular integra diferentes etapas, desde el pretratamiento de efluentes residuales hasta la obtención de productos finales, optimizando así la producción y transformación de las microalgas en una biorrefinería.

Digestión anaerobia de residuos de microalgas y la transesterificación de lípidos

Los residuos generados en los procesos relacionados con la biomasa de microalgas pueden ser aprovechados para producir biogás, lo cual podría incrementar la producción energética dentro del proceso o disminuir los requerimientos energéticos de una planta de producción y procesamiento de microalgas como se observa en la Figura 4. Esta estrategia contribuye a cerrar el ciclo de los recursos y a optimizar la eficiencia energética en la producción de biocombustibles a partir de microalgas. Las investigaciones indican que la extracción de lípidos puede servir como un pretratamiento autónomo. En todas las comparaciones entre biomasa residual y biomasa no tratada, se observó una mejora en la tasa de digestión y un incremento en la producción de metano en los primeros días del proceso (Ehimen et al., 2009). Las microalgas ofrecen una opción viable para tratar aguas residuales debido a su habilidad para eliminar nutrientes y el elevado valor comercial de la biomasa que generan.

Por otro lado, el biodiésel normalmente se produce mediante transesterificación de lípidos (principalmente triglicéridos, TG) utilizando un alcohol como aceptor de acilo y un catalizador (Khan et al. 2009). A menudo se utilizan alcoholes de cadena corta primarios o secundarios, como metanol, etanol o isopropanol (Ghadge y Raheman 2006). La extracción de lípidos de microalgas generalmente se realiza utilizando solventes. La extracción Soxhlet con hexano y el método de extracción Blight and Dyer utilizando una mezcla de solventes (cloroformo/metanol) son las técnicas más utilizadas para la extracción de lípidos de microalgas (Lee et al., 2010), donde la eficiencia de extracción disminuye con el incremento del contenido de agua en la biomasa. La transesterificación de lípidos para la producción de biodiésel a partir de microalgas se realiza mediante catálisis homogénea y heterogénea, cada una con rutas ácidas y alcalinas, que presentan características distintivas. En el caso de la catálisis alcalina homogénea, se ha reportado una alta velocidad de reacción y un alto rendimiento de conversión. Esta ruta es popular debido a su bajo costo y la amplia disponibilidad de los catalizadores alcalinos, como el hidróxido de sodio (NaOH) o el hidróxido de potasio (KOH).

No obstante, los catalizadores alcalinos homogéneos presentan una limitación importante: su sensibilidad a la presencia de agua y ácidos grasos libres, ya que bajo estas condiciones puede producirse saponificación, dificultando la separación del biodiésel y reduciendo el rendimiento del proceso. Una alternativa con mejores perspectivas en términos de sostenibilidad es la catálisis alcalina heterogénea. Este tipo de catalizadores, como los óxidos metálicos sólidos, ofrece una alta actividad catalítica y, además, puede ser reutilizado en múltiples ciclos. Su menor susceptibilidad a contaminantes como el agua o los ácidos grasos libres contribuye a reducir la formación de jabones, facilitando la purificación del biodiésel. En cambio, la catálisis ácida homogénea, si bien es adecuada para procesar materias primas de baja calidad con alto contenido de impurezas, presenta tasas de reacción considerablemente más bajas—hasta 4000 veces inferiores— en comparación con sus equivalentes alcalinos. Esto limita su aplicación en procesos de gran escala debido a su baja eficiencia (Maheshwari et al. 2022).

Por otro lado, la catálisis ácida heterogénea enfrenta obstáculos adicionales, como la lixiviación del catalizador, que compromete su estabilidad y puede generar residuos contaminantes en el producto final. Además, esta ruta requiere condiciones de operación más exigentes, como temperaturas elevadas, relaciones molares alcohol/aceite altas y tiempos de reacción prolongados, factores que incrementan el consumo energético y los costos globales del proceso. La selección del sistema catalítico óptimo dependerá, en última instancia, de variables como la composición del aceite extraído de microalgas, la disponibilidad de recursos, las metas de sostenibilidad y las condiciones específicas del proceso de producción de biodiésel (Zavala, 2024).

Transesterificación directa en microalgas

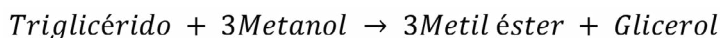
La producción de biodiésel se basa principalmente en el uso de lípidos refinados como materia prima, que contribuyen hasta el 70% de los costos totales del biodiésel. Por lo tanto, reducir los pasos de extracción y purificación de lípidos podría ser una forma útil de disminuir los costos de producción de biodiésel a partir de microalgas. Una alternativa al

proceso convencional es la transesterificación directa, donde la extracción de lípidos y la transesterificación se llevan a cabo en un solo paso, con una reacción directa de la biomasa a biodiésel.

En el proceso de transesterificación directa, el alcohol desempeña un papel vital en la reacción, actuando como disolvente (extrayendo los lípidos de las células) y como aceptor de acilo (convirtiendo los lípidos en ésteres alquílicos de ácidos grasos) (Wahlen et al. 2011). El metanol (MeOH) ha sido el alcohol más utilizado en el proceso de transesterificación directa, aunque puede extraer menos TG de la biomasa de microalgas en comparación con otros alcoholes en un proceso de transesterificación directa, en este tipo de reacciones el efecto del alcohol es complementario al tipo de catalizador. Normalmente, las relaciones molares MeOH/lípidos utilizados para la transesterificación directa son mucho más altas que el valor estequiométrico para favorecer la formación de productos, ya que la transesterificación es una reacción de equilibrio.

Para una reacción de esterificación común, podemos realizar un balance energético en términos de la energía de formación estándar de los productos menos los reactivos, como se describe a continuación.

Ec. 2



Por ejemplo, para obtener metil palmitato a partir de tripalmitina, la diferencia de energía entre productos y reactivos es exotérmica:

Ec. 3

$$\Delta H_{\text{reacción}} = \sum \Delta H_{\text{productos}} - \sum \Delta H_{\text{reactivos}}$$

Ec. 4

$$\Delta H_{\text{reacción}} = \left[3 \left(-762.4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) + \left(-710 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) \right] - \left[\left(-2150 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) + 3 \left(-201 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right) \right] = -244.2 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

Si consideramos el cambio de entropía típico (ΔS) como $+0.1 \frac{\text{kJ}}{(\text{mol} * \text{K})}$ a 298.15 K la energía libre de Gibbs sería:

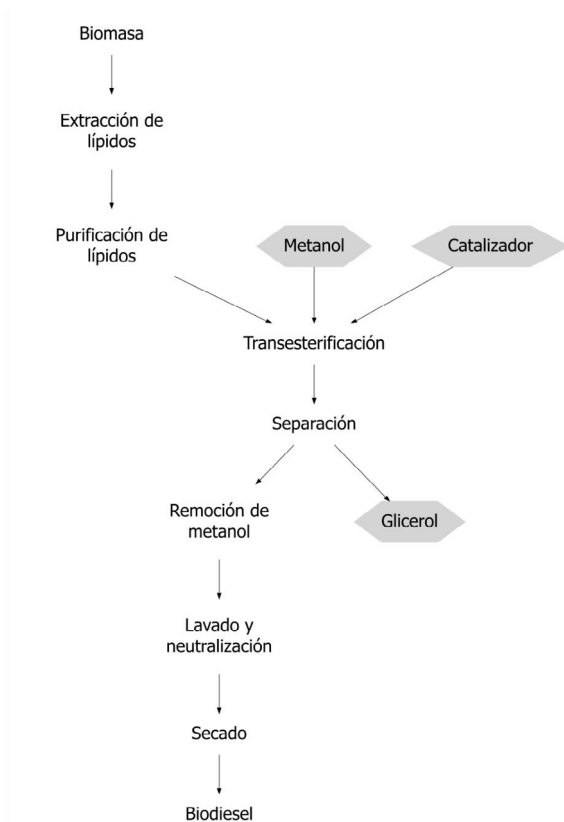
Ec. 5

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Ec. 6

$$\Delta G = -244.2 \frac{kJ}{mol} - \left(298.15 K * + 0.1 \frac{kJ}{(mol * K)} \right) = -274.015 \frac{kJ}{mol}$$

Figura 4. Proceso convencional de producción de biodiesel



Fuente: Modificado de Ghadge y Rahman, 2006.

Lo anterior denota que la reacción de transesterificación procederá de manera espontánea, favoreciendo la formación de biodiésel sin necesidad de aporte energético.

Rol de la temperatura, tiempo de reacción y co-solventes en la producción de biodiesel

Estudios previos de transesterificación convencional y directa han demostrado que al aumentar la temperatura, el tiempo necesario para alcanzar el máximo rendimiento de biodiesel disminuye. Este efecto se ha reportado principalmente para reacciones de transesterificación catalizadas por ácido (Wahlen et al. 2011). Este incremento puede atribuirse a una mayor miscibilidad entre las especies que reaccionan. La temperatura es fundamental en el proceso de transesterificación y tiene un efecto positivo en el rendimiento de extracción de lípidos debido al incremento en la solubilidad de los lípidos. Además, las altas temperaturas pueden aumentar el rendimiento de la producción de biodiésel, pero también inducir la degradación de los lípidos (Canakci y Van Gerpen 2003).

En el proceso de transesterificación directa de biomasa de microalgas, la selección del alcohol es fundamental, ya que cumple una doble función: actúa como agente extractante de los lípidos de la biomasa y como aceptor de acilo en la reacción de transesterificación para la producción de biodiésel. Sin embargo, los alcoholes alifáticos como el metanol, aunque populares por su bajo costo y alta reactividad, muestran un rendimiento limitado cuando se utilizan solos para la extracción de lípidos. Una estrategia empleada para superar las limitaciones en la extracción y conversión de lípidos es la incorporación de co-solventes en el medio de reacción. Esta adición favorece la solubilización de los lípidos presentes en la biomasa microalgal, lo que mejora la transferencia de masa entre fases y puede acelerar significativamente tanto la extracción como la transesterificación, reduciendo los tiempos de reacción y aumentando el rendimiento de biodiesel (Pérez-Bravo et al., 2022).

Entre los cosolventes más utilizados se encuentra el hexano, un compuesto no polar con alta afinidad por lípidos, que ha mostrado buenos resultados al emplearse en combinación con metanol, al facilitar la disolución de triglicéridos y favorecer su conversión. La acetona, por su parte, al ser un disolvente polar, puede desestabilizar la membrana celular de las microalgas, permitiendo una liberación más eficiente de lípidos, además de mejorar la miscibilidad entre los componentes de la

reacción. En matrices celulares más complejas o resistentes, el tolueno ha resultado útil como medio de extracción por su carácter no polar y su capacidad de penetración. Asimismo, el tetrahidrofurano (THF), solvente polar aprotónico, ha sido empleado con éxito para mejorar la solubilidad de lípidos y otros compuestos orgánicos, promoviendo una interacción más eficiente entre los reactivos en la mezcla de reacción y facilitando la conversión a biodiésel (Rodríguez Bustamante et al., 2022).

Producción de biogás y su valorización

Durante la digestión anaerobia, la materia orgánica es degradada por consorcios microbianos en ausencia de oxígeno, generando como producto principal una mezcla gaseosa conocida como biogás. Esta mezcla está compuesta principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), aunque también pueden encontrarse trazas de nitrógeno (N_2), hidrógeno (H_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), vapor de agua, amoníaco (NH_3) y otros compuestos, cuya presencia varía según el tipo y la composición del sustrato utilizado. La valorización energética del biogás consiste en su transformación en una fuente de energía útil, lo cual puede realizarse mediante cogeneración para la obtención simultánea de electricidad y calor, o bien a través del proceso de purificación para la producción de biometano. Este último puede ser inyectado a la red de gas natural o empleado como combustible en el sector transporte (Chripim et al., 2021).

Además de su contribución al aprovechamiento energético de residuos orgánicos, el uso del biogás representa una estrategia efectiva para reducir emisiones de gases de efecto invernadero, diversificar la matriz energética y disminuir la dependencia de combustibles fósiles. Su implementación en contextos rurales o aislados permite también generar soluciones energéticas descentralizadas, con impacto directo en la seguridad energética y el desarrollo local. La integración del biogás en sistemas energéticos sostenibles se alinea con políticas de economía circular y transición energética, posicionándolo como una alternativa viable para avanzar hacia modelos más resilientes y ambientalmente responsables.

Coproductos de la biomasa de *Scenedesmus*

La biomasa de *Scenedesmus* genera coproductos con alto valor agregado que pueden ser aprovechados en múltiples sectores industriales, lo que refuerza su papel dentro de esquemas de biorrefinería integrales. Más allá de los lípidos empleados en la producción de biodiésel, estas microalgas son fuentes relevantes de proteínas de calidad, carbohidratos fermentables, pigmentos naturales y compuestos bioactivos. Las proteínas extraídas de *Scenedesmus* poseen un perfil de aminoácidos equilibrado y buena digestibilidad, lo que las hace aptas para su incorporación en formulaciones alimentarias, suplementos nutricionales e incluso alimentos balanceados para animales. Su potencial como ingrediente funcional ha sido ampliamente documentado, especialmente en el contexto de dietas sostenibles (Balan et al., 2023). En cuanto a los carbohidratos presentes en la biomasa, estos pueden ser utilizados como materia prima para la obtención de biocombustibles de segunda generación, precursores químicos y materiales biodegradables. Esta versatilidad convierte a *Scenedesmus* en una plataforma atractiva para el desarrollo de procesos bioeconómicos (Kruger et al., 2022).

Asimismo, los pigmentos naturales como la clorofila, carotenoides y ficobiliproteínas extraídos de estas microalgas han mostrado aplicaciones prometedoras como colorantes naturales en alimentos, además de su uso en productos cosméticos y farmacéuticos debido a sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y fotoprotectoras. Estos pigmentos pueden ser extraídos y purificados para su uso en una variedad de productos, desde alimentos y bebidas hasta cremas solares y productos para el cuidado de la piel. Además, la biomasa de *Scenedesmus* contiene una variedad de compuestos bioactivos, como antioxidantes, vitaminas y ácidos grasos omega-3, que ofrecen beneficios para la salud humana y animal. Estos compuestos pueden ser utilizados en la formulación de suplementos nutricionales, productos farmacéuticos y alimentos funcionales, contribuyendo así a mejorar la salud y el bienestar de las personas y los animales (Magro et al., 2021).

Integración de la economía circular en la producción de biodiesel a partir de microalgas

La economía circular es un modelo de producción y consumo que busca extender el ciclo de vida de los productos, reduciendo al mínimo el desperdicio mediante la reutilización, reparación, reciclaje y valorización de los recursos. Este enfoque contrasta con el modelo lineal tradicional de “tomar, hacer, desechar”, promoviendo en su lugar un sistema regenerativo donde los materiales y la energía circulan en la economía durante el mayor tiempo posible. En el contexto de la bioenergía, la economía circular se presenta como una estrategia esencial para la sostenibilidad, especialmente en la producción de biocombustibles a partir de biomasa.

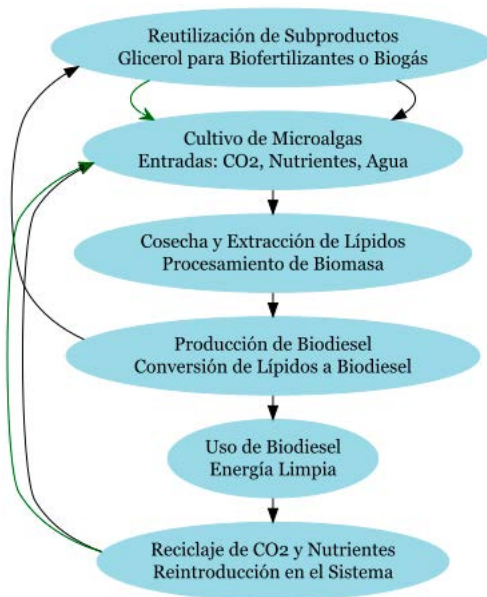
El ciclo de la economía circular aplicado a la producción de biodiésel a partir de microalgas se muestra en la Figura 5. El proceso se inicia con la cultivación de microalgas, donde se utilizan insumos fundamentales como dióxido de carbono (CO_2), nutrientes y agua. Las microalgas, al captar CO_2 de la atmósfera o de fuentes industriales, desempeñan un papel crucial en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Este paso inicial es crítico para asegurar la acumulación de biomasa rica en lípidos, que servirá como materia prima en etapas posteriores.

Tras la fase de cultivo, se procede a la cosecha y extracción de lípidos, donde la biomasa obtenida es procesada para extraer los lípidos, los cuales son los precursores del biodiésel. Este proceso de extracción es vital para maximizar la eficiencia del sistema, asegurando la obtención de la mayor cantidad de lípidos posible a partir de la biomasa disponible. A continuación, la producción de biodiésel se lleva a cabo mediante la transesterificación de los lípidos extraídos, transformándolos en biodiésel y generando glicerol como subproducto. Este biodiésel representa una fuente de energía renovable y de baja emisión de carbono, alineada con los objetivos de sostenibilidad.

La utilización del biodiésel es la fase donde el biocombustible se emplea como energía limpia, sustituyendo a los combustibles fósiles convencionales y contribuyendo a la reducción de la huella de carbono en el sector energético. Esta etapa demuestra el impacto positivo del biodiésel en la mitigación del cambio climático. Para cerrar el ciclo, el

diagrama incluye dos procesos fundamentales: el Reciclaje de CO₂ y Nutrientes y la Reutilización de Subproductos. El CO₂ y los nutrientes, que se generan como residuos en etapas anteriores, son capturados y reintroducidos en el sistema de cultivo de microalgas, promoviendo la autosuficiencia y sostenibilidad del proceso. Por su parte, el glicerol, un subproducto de la producción de biodiésel, es valorizado mediante su conversión en biofertilizantes o biogás, integrando aún más el ciclo productivo en un marco de economía circular.

Figura 5. Diagrama conceptual de la economía circular en la producción de biodiesel a partir de microalgas.



Conclusiones

Las microalgas del género *Scenedesmus* se han consolidado como una alternativa prometedora dentro de esquemas de economía circular, debido a su eficiencia en la producción de biocombustibles y en la generación de compuestos con alto valor agregado. Su capacidad para desarrollarse en aguas residuales y entornos no aptos para cultivos agrícolas permite integrar procesos de tratamiento de efluentes con la producción de bio-

masa, reduciendo simultáneamente impactos ambientales y demandas energéticas asociadas al uso de recursos fósiles. La elevada concentración de lípidos y la favorable composición de ácidos grasos en *Scenedesmus* permiten obtener un biodiésel de calidad técnica comparable —e incluso superior— al derivado de fuentes convencionales. Esta característica, junto con la posibilidad de implementar sistemas acoplados para el cultivo de microalgas y el tratamiento de aguas residuales, evidencia la viabilidad de modelos sostenibles basados en el aprovechamiento integral de la biomasa.

Además, los coproductos obtenidos, como proteínas, carbohidratos y pigmentos naturales, amplían el rango de aplicaciones industriales, con usos potenciales en los sectores alimentario, farmacéutico y cosmético. La valorización de estos compuestos no solo mejora la rentabilidad del proceso, sino que refuerza su sustentabilidad al diversificar los productos obtenidos y minimizar la generación de residuos. El cultivo y estudio del género de microalgas *Scenedesmus* ofrece una oportunidad para avanzar hacia un modelo energético y económico más sostenible. Su integración en la economía circular no solo promueve un uso más eficiente de los recursos naturales, sino que también contribuye a la creación de una sociedad más resiliente y preparada para enfrentar los desafíos ambientales del siglo XXI. La capacidad de estas microalgas para transformar residuos en recursos y su potencial para ser un componente clave en la biorrefinería del futuro subrayan su relevancia en la transición hacia una economía más verde y circular.

Referencias

- Acuicola, M. A. P. Y. D. (s. f.). Un gran futuro por delante en la biotecnología de microalgas para remediar aguas residuales. *MisPeces*. <https://www.mispecies.com/noticias/Un-gran-futuro-por-delante-en-la-biotecnologia-de-microalgas-para-remediar-aguas-residuales/>
- Ahmad, A. L., Mat Yasin, N. H., Derek, C. J. C., Lim, J. K. 2011. Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 15, 584–593. Recuperado en 01 de mayo de 2024, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/>

- pii/S1364032110003059
- Allen, M. (s. f.). *Scenedesmus quadricauda* [Imagen de microscopía electrónica de barrido coloreada]. Cortesía de Plymouth Marine Laboratory. *Scenedesmus Quadricauda #1 Photograph by Steve Gschmeissner/science Photo Library - Fine Art America*
- Andrade, R., Charity, E., Vera, B., Alexandra, L., Cárdenas, L., Carmen, H., & Morales, A., Ever, D. (2009). Producción de biomasa de la microalga *Scenedesmus* sp. utilizando aguas residuales de pescadería. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 32(2).
- Balat, M. (2011). Potential alternatives to edible oils for biodiesel production: A review. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 1479-1492.
- Canakci, M., & Van Gerpen, J. (2003). Una planta piloto para producir biodiesel a partir de materias primas con alto contenido de ácidos grasos libres. *Trans Am Soc Agric Eng*, 46(4), 945-954. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=13949>
- Castillo, O. S., Torres-Badajoz, S. G., Núñez-Colín, C. A., Peña-Caballero, V., Herrera Méndez, C. H., & Rodríguez-Núñez, J. R. (2017). Producción de biodiésel a partir de microalgas: avances y perspectivas biotecnológicas. *Hidrobiológica*, 27(3), 337-352.
- Castro, J. (2011). Perspectivas de la demanda energética global. *Petrotecnia*, 1, 54-70. <https://www.petrotecnia.com.ar/abril11/sin/Demanda.pdf>
- Chasquibol Calongos, S. D. (2021). *Revisión de las técnicas de producción de biocombustibles a partir de microalgas*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/60819>
- Chia, S. R., Ling, J., Chia, W. Y., Nomanbhay, S., Kurniawan, T. A., & Chew, K. W. (2023). Future bioenergy source by microalgae-bacteria consortia: a circular economy approach. *Green Chemistry*, 25(22), 8935-8949.
- Chrispim, M. C., Scholz, M., & Nolasco, M. A. (2021). Biogas recovery for sustainable cities: A critical review of enhancement techniques and key local conditions for implementation. *Sustainable Cities and Society*, 72, 103033.
- Crean empresa en NL para producir biocombustibles. (2013, 3 de septiembre). *El Financiero*. <https://www.elfinanciero.com.mx/empresas/>

- crean-empresa-en-nl-para-producir-biocombustibles/
- Figge, F., Thorpe, A. S., & Gutberlet, M. (2023). Definitions of the circular economy: Circularity matters. *Ecological Economics*, 208, 107823
- Ghadge, S., & Raheman, H. (2006). Optimización de procesos para la producción de biodiesel a partir de aceite de mahua (*Madhuca indica*) utilizando la metodología de superficie de respuesta. *Tecnología de biorrecursos*, 97(3), 379–384.
- García Cuenca, H. (2015). *Sistemas de cultivo de microalgas para la depuración de aguas residuales y producción de biocombustibles*. <https://dspace.umh.es/handle/11000/2710>
- Greenwell, H. C., Laurens, M. L., Shields, R. J., Lovitt, R. W., & Flynn, K. J. (2009). *Placing microalgae on the biofuels priority list: a review of the technological challenges*.
- Hernández-Pérez, A., & Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de biología marina y oceanografía*, 49(2), 157-173.
- Hidalgo, P., Toro, C., Ciudad, G., & Navia, R. (2013). Advances in direct transesterification of microalgal biomass for biodiesel production. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 12, 179-199.
- Huang, G. H., Chen, F., Wei, D., Zhang, X. W., & Chen, G. (2010). Biodiesel production by microalgal biotechnology. *Applied Energy*, 87(1), 38-46.
- Johnson, M., & Wen, Z. (2009). Producción de combustible biodiesel a partir de la microalga *Schizochytrium limacinum* mediante transesterificación directa de biomasa de algas. *Combustibles energéticos*, 23(10), 5179–5183.
- Jorge-Luis, S. O., & Jorge-Enrique, L. G. (2023). Microalgas: relación bibliométrica de las biorrefinerías, la economía circular y el medio ambiente. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 21(2), 145-160.
- Kafarov, V., González, A. D., & Guzmán Monsalve, A. (2009). *Desarrollo de métodos de extracción de aceite en la cadena de producción de biodiesel a partir de microalgas*. <http://repositorio.uac.edu.co/handle/11619/1348>
- Khan, S., Rashmi, M. H., Prasad, S., & Banerjee, U. (2009). Perspectivas de la producción de biodiesel a partir de microalgas en la India. *Renovar la energía sostenible Rev*, 13(9), 2361–2372. <https://econpapers.repec>.

- org/article/eeerensus/v_3a13_3ay_3a2009_3ai_3a9_3ap_3a2361-2372.htm
- Kruger, J. S., Wiatrowski, M., Davis, R. E., Dong, T., Knoshaug, E. P., Nagle, N. J., ... & Pienkos, P. T. (2022). Enabling production of algal biofuels by techno-economic optimization of co-product suites. *Frontiers in Chemical Engineering*, 3, 803513.
- Kumar, V., Vangnai, A. S., Sharma, N., Kaur, K., Chakraborty, P., Umesh, M., ... & Taherzadeh, M. J. (2023). Bioengineering of biowaste to recover bioproducts and bioenergy: a circular economy approach towards sustainable zero-waste environment. *Chemosphere*, 319, 138005.
- Lee, J., Yoo, C., Jun, S., Ahn, C., & Oh, H. (2010). Comparación de varios métodos para la extracción eficaz de lípidos de microalgas. *Tecnología de biorrecursos*, 101(1), 575–577.
- Magro, F. G., Freitag, J. F., Bergoli, A., Cavanhi, V. A. F., & Colla, L. M. (2021). Microalgae consortia cultivation using effluents for bioproduct manufacture. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 20(3), 865-886.
- Maheshwari, P., Haider, M. B., Yusuf, M., et al. (2022). A review on latest trends in cleaner biodiesel production: Role of feedstock, production methods, and catalysts. *Journal of Cleaner Production*, 355, 131588.
- Parra Huertas, R. A. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción + Limpia*, 10(2), 142-159.
- Pérez-Bravo, S. G., Aguilera-Vázquez, L., Castañeda-Chávez, M. D. R., & Gallardo-Rivas, N. V. (2022). Condiciones del proceso de transesterificación en la producción de biodiésel y sus distintos mecanismos de reacción. *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 25.
- Ramos, F. D., Díaz, M. S., & Villar, M. A. (2016). *Biocombustibles*. Recuperado en 23 de junio de 2024, de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/25791>
- Ramos Suárez, J. L. (2014). *Producción de biogás a partir de biomasa de la microalga Scenedesmus sp. procedente de diferentes procesos* [Tesis doctoral, E.T.S.I. Agrónomos (UPM)]. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica de Madrid. <https://doi.org/10.20868/>

UPM.thesis.28957

- Rawat, I., Kumar, R., Mutanda, T., & Bux, F. (2011). Dual role of microalgae: phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Applied Energy*, 88, 3411-3424.
- Rodríguez Bustamante, J. I., Meza Gago, D. J., & Gutiérrez Rodríguez, I. D. C. (2022). Rendimiento de producción de biodiesel por transesterificación a partir de aceite de soja usado. *Fides et Ratio-Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia*, 23(23), 149-176.
- Servicios – BioLets. (s.f.). <https://biolets.com/servicios/>
- Stephanopoulos, G., Fischer, C. R., & Klein-Marcuschamer, D. (2008). Selection and optimization of microbial hosts for biofuels production. *Metabolic Engineering*, 10(6), 295-304.
- Villasmil, T. (2004). *Aislamiento, Identificación y cultivo de cianobacterias presentes en la Laguna Gato Negro, Municipio Maracaibo, Estado Zulia*. La Universidad del Zulia. Recuperado el 29 de abril de 2024, de [Enlace no proporcionado]
- Wahlen, B., Willis, R., & Seefeldt, L. (2011). Producción de biodiesel mediante extracción y conversión simultánea de lípidos totales de microalgas, cianobacterias y cultivos mixtos silvestres. *Tecnología de biorrecursos*, 102(3), 2724-2730.
- Zavala, J. R. S. (2024). *Estudio de la catálisis heterogénea en la esterificación de ácido acético con etanol*. (Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México).

Sobre los autores

Patricia Marlene Aguirre Mejía

Doctora en Ciencias Naturales, Dr. rer. nat. (PhD) en Ecología del paisaje y Master of Sciences (MSc). Agr. En Agricultura Tropical y Subtropical Internacional de la Universidad Georg August de Gotinga, Alemania; con más de 10 años de experiencia docente, investigadora y coordinadora de proyectos internacionales. Entre sus principales líneas de investigación están: Desarrollo sustentable, gestión del desarrollo rural y educación para un desarrollo sustentable, cambio climático, agricultura sostenible, turismo sustentable. Actualmente es profesora de la Facultad de Posgrado de la Universidad Técnica del Norte UTN. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0218-2197>

Jesús Barrera Rojas

Doctor en Ciencia con la especialidad en Bioquímica y Maestro en Ciencias con especialidad en Bioquímica del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV)-México. Posee el título de Ingeniería Ambiental del Tecnológico de Estudios Superiores del Oriente del Estado de México. Realizó una estancia posdoctoral en la UDG. Actualmente, es profesor e investigador de la UDG en el CUTonalá. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores en México (SNI) nivel I. Sus intereses de investigación son sobre el desarrollo de tecnologías innovadoras para mejorar la calidad del agua y la eficiencia de los procesos de tratamiento de aguas y seguimiento ómico del fenómeno de eutrofización y su relación con la calidad de agua en cuerpos de aguas. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5244-9879>

Lourdes Graciela Cabrera Chavarría

Ingeniera Química con Maestría en Análisis de Sistemas Industriales y Doctora en Agua y Energía por la Universidad de Guadalajara. Cuenta con experiencia en procesos productivos de la industria lechera, así como en implementación de sistemas de calidad y certificación bajo la norma ISO 9000, en desarrollo de procesos para levaduras, fermentación y optimización de procesos en la industria tequilera. Adicionalmente, como ingeniera de procesos en la industria automotriz, ha participado en transferencias de proyectos de optimización y en desarrollo e implementación de nuevas tecnologías a lo largo de su formación, como Green Belt Six Sigma.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5223-0295>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Lourdes-Cabrera-3>

Fanny Mabel Carhuanchó León

Doctora en Tecnologías Agroambientales para una Agricultura Sostenible por la Universidad Politécnica de Madrid, con maestría en Tecnologías Agroambientales e Ingeniería Ambiental. Actualmente, es profesora asociada en el Departamento de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú. Posee una sólida experiencia en la implementación de proyectos de energías renovables en zonas altoandinas, así como en el estudio del potencial y valorización de biomasa residual. Sus investigaciones se centran en la valorización de biomasa residual y su aplicación para la producción de biogás, con especial interés en el aprovechamiento de especies como *Typha* para biorrefinerías. Entre sus publicaciones más recientes, destacan: “Design Improvements and Best Practices in Small-Scale Biodigesters for Sustainable Biogas Production: A Case Study in the Chillon Valley, Perú” (Álvarez et al., *Energies*, 2025), “Exploring the potential of *Typha* populations for biorefineries: “Opportunities in Peru” (Carhuanchó & Ramírez-Candia, *Journal of Physics: Conference Series*, 2024) y “The energy potential of different biomass fractions of *Typha domingensis* grown in green floating filters” (Carhuanchó, Aguado &

Curt, 30th European Biomass Conference and Exhibition, 2022). Su ORCID es <https://orcid.org/0000-0003-4910-1745>.

Samuel Horacio Cantú Munguía

Maestro en Ingeniería de Proyectos por la Universidad de Guadalajara e Ingeniero Mecánico Eléctrico por la misma universidad. Tiene 30 años de experiencia en la iniciativa privada, en el sector hidráulico, en la realización, construcción y supervisión de proyectos de agua potable, alcantarillado sanitario, tratamiento y potabilización de agua, alcantarillado pluvial y protección a centros de población por fenómenos hidrometeorológicos.

Zulay Maribel Cueva Jiménez

Magíster en Desarrollo Local con mención en Proyectos de Economía Social y Solidaria por la Universidad Técnica del Norte (UTN) - Ibarra. Ingeniera en Recursos Naturales Renovables por la UTN. Especialista en cartografía y manejo de bases de datos multipropósito con sistemas de información geográfica. Experiencia en proyectos de inversión e investigación en el ex Instituto Espacial Ecuatoriano. Actualmente trabaja en el Instituto Geográfico Militar en el proyecto “Determinación de la Capacidad de Acogida del Territorio con fines de desarrollo urbano mediante la generación de geoinformación temática a escala 1: 5 000”. Se destaca por su compromiso con el desarrollo sostenible y su capacidad para aplicar sus conocimientos y habilidades en proyectos que generan un impacto positivo en las comunidades.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1967-0886>

Luis Abraham Díaz Alcalá

Ingeniero en Energía, egresado de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. Especializado en energía nuclear e instrumentación electrónica. Actualmente estudiante de la Maestría en Ciencias en Ingeniería del Agua y la Energía en el Centro Universitario de

Tonalá, de la Universidad de Guadalajara. Es además coordinador de la administración de riesgos en una empresa privada de corretaje de seguros, donde se desempeña como inspector de industria conforme a normativa oficial mexicana e internacional en el caso de auditorías bajo el estándar ISO 9001-2015. Asesor de empresas del giro alimenticio, textil, transporte de mercancías, entre otras, en temas de control interno y seguridad industrial.

Fernando Enrique Espinola Portilla

Doctor en ciencias químicas por L'École nationale supérieure de chimie de Paris en Francia y por la Universidad de Guanajuato. Maestro en Ciencias Químicas e Ingeniero Químico por la Universidad de Guanajuato. Posdoctorante en el Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara y profesor de asignatura en la Universidad Tecnológica de México (UNITEC). Perteneció al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores en México (SNII) nivel candidato. Trabaja en la síntesis y caracterización de materiales y nanomateriales para aplicaciones biomédicas en el tratamiento y diagnóstico de enfermedades, así como para aplicaciones de remediación ambiental. Es cofundador de "Innovacarb", empresa dedicada a la recolección y transformación de bagazo de café para su transformación a carbón activado. Sus últimas publicaciones han sido en *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* (2025), *Molecular Pharmaceutics* 2023, *Materials Today Communications* 2022.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6708-4915>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Fernando-Espinola-Portilla>

Google Academic: <https://scholar.google.com.mx/citations?user=QZ-NMLq4AAAAJ&hl=es&oi=ao>

Aída Lucía Fajardo Montiel

Doctora en Ingeniería y Tecnología por la Universidad de Guadalajara. Maestra en Ingeniería de Proyectos por la misma universidad e Ingeniera Química Administrativa por el ITESO. Sus líneas de inves-

tigación están enfocadas en la salud, seguridad y medio ambiente en proyectos con la industria. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras Nivel I.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6523-7477>

Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=uMpu9x-YAAAAJ&hl=es&oi=ao>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Aida-Fajardo-Montiel>

César Alejandro García García

Nació en Guadalajara, México, en 1981. Obtuvo la licenciatura en Ingeniería en Sistemas Computacionales en el ITESM Campus Guadalajara en 2006, la maestría en Tecnologías de la Información por la Universidad de Guadalajara en 2009, y el doctorado en Tecnologías de la Información por la Universidad de Guadalajara en 2014. Asimismo, obtuvo el doctorado en Matemáticas Aplicadas por la Université Toulouse III - Paul Sabatier, en Toulouse, Francia, en 2014. Ha desempeñado diversos cargos en la academia y la industria, incluyendo Analista de Negocios, Asistente de Investigación, Profesor, Profesor Asociado y Coordinador de Programas de Posgrado. Sus publicaciones abarcan una amplia gama de temas que demuestran su experiencia en ciencias computacionales y matemáticas aplicadas. Ha contribuido a los campos de inteligencia artificial, ciencia de datos, eficiencia energética y juegos serios, con un enfoque en modelado, simulación y optimización. Su trabajo ha sido publicado en revistas y conferencias de prestigio, reflejando su compromiso con el avance del conocimiento y la resolución de desafíos del mundo real. El Dr. García-García es Miembro Senior del IEEE, al cual se unió en 2009. También es miembro de la Association for Computing Machinery (ACM) y ha sido reconocido como Candidato del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) en México.

Kelly Joel Gurubel Tun

Doctor en Ciencias por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (Cinvestav). Maestro en Ciencias por el Cinvestav. Licenciado en Ingeniería Química por el Instituto Tecnológico de Mérida. Se ha desempeñado como investigador en el Departamento de Estudios de Agua y la Energía en el Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. Es miembro activo del SNI, nivel I, y participa en los posgrados Ingeniería del Agua y la Energía de la Universidad de Guadalajara, donde forma parte del cuerpo académico de Optimización y Control de Sistemas. Autor de más de 20 artículos y capítulos de libro publicados en revistas científicas internacionales. Cuenta con experiencia de ocho años como líder de laboratorio de metrología en el área de manufactura de componentes automotrices. Es líder y colaborador de proyectos de ciencia básica financiados por el Conacyt. Líneas de investigación: control automático, redes neuronales artificiales y ciencia de datos y sus aplicaciones en sistemas energéticos. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9999-9018>
Google Académico: https://scholar.google.com/citations?view_op=list_works&hl=es&hl=es&user=TS-C408AAAAJ
ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Joel-Gurubel>

Tania Yamel Navarro Díaz

Estudiante de Ingeniería en Nanotecnología en la Universidad de Guadalajara (UDG), con énfasis en Nanotecnología Ambiental. Realizó su servicio social en el Instituto de Energías Renovables del Centro Universitario de Tonalá (CUTonalá), evaluando nanoestructuras utilizando el software Molden en sistemas Linux. Ha participado en el muestreo y análisis de agua en la planta de tratamiento del CUTonalá y en la presa “El Cajón”. Como becaria trabajó en la certificación ambiental del CUTonalá. Realizó estancia de verano Delfín en 2024 en el Centro de Investigaciones en Óptica de León, Guanajuato, evaluando la posible aplicación de iminas aromáticas fluorescentes como sensores de iones metálicos en agua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9003-1617>

Judith Ramirez Candia

Doctora en Tecnología Agroambiental para una Agricultura Sostenible (Universidad Politécnica de Madrid – España), Magister en Ciencias Ambientales e Ingeniera de Energías Renovables. Actualmente, se desempeña como profesora asociada en el Departamento de Ordenamiento Territorial de la Universidad Nacional Agraria La Molina - Perú y como Jefa del Laboratorio de Energías Renovables (LER). Su trayectoria profesional se enfoca en el desarrollo de proyectos relacionados con tecnologías agroambientales y el aprovechamiento de fuentes renovables para el suministro energético. Su unidad de investigación está especializada en el análisis del potencial de la biomasa y en la valorización de residuos agrícolas y forestales con fines energéticos. Forma parte de la Red de Expertos Iberoamericanos en Energía y de la Red de investigación en modelos de sistemas de gestión de energía sostenibles RIMSGES – CYTED. Entre sus publicaciones recientes destacan “Exploring the potential of Typha Populations for biorefineries: Opportunities in Peru” (Carhuacho & Ramírez-Candia, Journal of Physics: Conference Series, 2024), “Understanding the Access to Fuels and Technologies for Cooking in Peru” (Ramírez-Candia, J, Curt, M. D., & Domínguez, J., Energies, 2022) y “Challenges for Access to Energy in Peru” (In, Peru in the 21st Century: Progress, Trends and Challenges, Nova Science Publishers, 2020”. Su ORCID es <https://orcid.org/0000-0002-1521-164X>

Hermes Ulises Ramirez Sanchez

Ingeniero Químico por la Universidad de Guadalajara, Maestro en Geociencias del Medio Ambiente por la Universidad de Aix-Marsella III, Francia, y Doctor en Ciencias, Mención Química, por la Universidad de Niza-Sofia Antipolis, Francia. Sus líneas de investigación están enfocadas al medio ambiente, climatología, cambio climático y contaminación del aire, agua y suelo. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras Nivel I.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2975-5215>

Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=VMO-Yo3oAAAAJ&hl=es>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Hermes-Ramirez-Sanchez>

Carolina Livier Recio Colmenares

Investigadora y miembro del Sistema Nacional de Investigadores en México, reconocida como Candidata a Investigadora Nacional para el período 2022-2025. Su experiencia se centra en el diseño y optimización de materiales avanzados, contribuyendo a las Líneas de Generación y Aplicación del Conocimiento en la Universidad de Guadalajara, específicamente dentro del Departamento de Estudios del Agua y la Energía. Además de su labor investigadora, la Dra. Recio Colmenares se desempeña como Coordinadora del Programa de la Licenciatura en Ingeniería en Energía en la Universidad de Guadalajara. Es licenciada en Ingeniería Química, cuenta con una maestría en Ingeniería en Agua y Energía y un doctorado en Agua y Energía, todos otorgados por la Universidad de Guadalajara. Sus intereses de investigación actuales incluyen la remediación ecológica mediante el uso de materiales avanzados, así como la eficiencia energética.

Roxana Berenice Recio Colmenares

Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) en México, reconocida como Candidata a Investigadora Nacional. Es Ingeniera Industrial con Maestría y Doctorado en Ingeniería en Agua y Energía por la Universidad de Guadalajara, además de una estancia posdoctoral en el CIATEJ en Tecnología Ambiental. Desde 2018, es profesora en el Centro Universitario de Tonalá (Universidad de Guadalajara), en la División de Ingeniería e Innovación Tecnológica. Su investigación se enfoca en la aplicación de redes neuronales artificiales, tecnología y sostenibilidad, desarrollando soluciones innovadoras para procesos agroindustriales y ambientales. Ha contribuido a proyectos de aprovechamiento de energía solar, cuenta con una patente internacional y

publicaciones en revistas científicas y capítulos de libros. Su trabajo promueve la sostenibilidad y la innovación tecnológica, destacándose en la generación de conocimiento aplicado dentro de la Universidad de Guadalajara.

Belkis Sulbarán Rangel

Doctora en Ciencia de Materiales y Maestra en Ciencias de Productos Forestales por la UDG-México. Posee el título de Ingeniero Forestal de la Universidad de los Andes Mérida-Venezuela. Es profesora e investigadora en la UDG en el CUTonalá. Perteneció al Sistema Nacional de Investigadores en México (SNI) nivel II. Realiza proyectos sobre aprovechamiento de residuos agrícolas y forestales con enfoque en biorrefinerías para la obtención de materiales avanzados y biocombustibles. Trabaja con el uso de tecnologías sustentables para el tratamiento de aguas residuales, purificación de agua utilizando materiales a base de celulosa y nanotecnología. Adicionalmente, está realizando un proyecto de análisis de calidad de cuerpos de agua enfocados en contaminantes emergentes, microplásticos y teledetección.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5758-6140>

Belén Esmeralda Vázquez González

Estudiante de Ingeniería en Nanotecnología en la UDG, con énfasis en Nanotecnología Ambiental. Realizó su servicio social en el Programa de Incorporación a la Investigación Temprana del Departamento de Estudios del Agua y la Energía en CUTonalá, donde participó en talleres de mantenimiento y tratamiento de una PTAR. Realizó estancia de verano Delfín en 2024 en el Centro de Investigaciones en Óptica de León, Guanajuato, donde trabajó en un proyecto de fabricación de Eu-MOFs para detectar compuestos organoclorados en el agua.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9987-0146>

Déborah Leticia Villaseñor Basulto

Doctora en Ciencias Químicas por la Universidad de Guanajuato (México) con Estancia de investigación en la Universidad Tecnológica de Dresde (Alemania). Obtuvo la maestría en Ciencias en Ingeniería del Agua y la Energía por la Universidad de Guadalajara (México). Así mismo realizó la Especialidad en Consultoría Ambiental por la Universidad Europea Miguel de Cervantes (España) y la licenciatura en Ingeniería Biomédica en la Universidad de Guadalajara (México). Se ha desempeñado como profesor de diversas asignaturas de licenciatura en la Universidad de Guadalajara y Universidad de Guanajuato (México), y técnico académico en la Universidad de Guadalajara (México); además de asignatura de posgrado en la Universidad Estatal Amazónica (Ecuador). Es co-fundadora de “Innovacarb” star-up de economía circular, aunado a eso trabaja en el manejo de agua y saneamiento para una ONG. Ahora es post-doctorante y miembro del SNII nivel 1 del CONAHCYT, ahora llamado SECIHTI. Donde desarrolla investigaciones sobre reutilización de materiales, tratamiento de agua y generación de amoníaco verde. Sus últimas publicaciones fueron en la revista “Process Safety and Environmental Protection” (2022); en los libros “Sustainable Technologies for Remediation of Emerging Pollutants from Aqueous Environment” (2024); y “Circular Economy Applications for Water Security” (2024). Además, ha participado en movimientos sociales en pro del medio ambiente como el Proyecto Pastita (México) y la red de desarrollo sostenible MX2030 (ONU).
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1410-249X>
ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Deborah-Villaseñor-2?ev=hdr_xprf
Google Academic: <https://scholar.google.com/citations?user=DK-B3eQIAAAAJ&hl=es>

*La economía circular como instrumento transformador para una sociedad
más justa, inclusiva y pacífica*

Se terminó de editar en octubre de 2025
en los talleres de Astra Ediciones

Av. Acueducto No. 829

Colonia Santa Margarita, C. P. 45140

Zapopan, Jalisco, México.

33 38 34 82 36

E-mail: edicion@astraeditorial.com.mx

www.astraeditorialshop.com

Este libro invita a la sociedad civil, los tomadores de decisiones, las empresas, las comunidades rurales y urbanas y las instituciones educativas a repensar el papel que desempeñan en la transición hacia un modelo de desarrollo sostenible. Porque solo a través de la colaboración, la innovación y el compromiso ético con nuestro entorno podremos construir un futuro más equitativo, resiliente y sostenible para todos.

ISBN: 979-13-87837-60-0



9 791387 837600



Consulta y descarga

