



C3-BIOECONOMY

Circular and Sustainable Bioeconomy

ISSN: 2660-9126

International Journal of Circular and Sustainable Bioeconomy

Funded by
(ceiA3)

Published by

 **UCOPress**
Editorial Universidad de Córdoba

Nº 6 (2025)



Índice

| | |
|--|-----|
| EDITORIAL | 3 |
| Polinización y seguridad alimentaria: una exploración desde la mirada de productores agrícolas del departamento de Itapúa-Paraguay | 11 |
| Obtención de Biogás a partir de la fermentación de los residuos del procesamiento de Physalis Peruviana L. (Aguaymanto)* | 29 |
| Evaluación del efecto bioestimulante sobre plantas con extractos de microalgas obtenidos a partir de un proceso de economía circular | 49 |
| MONOGRÁFICO: Bioemprendimiento en América Latina y el Caribe: aportes del Centro de Agrobioemprendimientos e Inversiones del IICA | 69 |
| Combatir la pérdida y desperdicio de alimentos sin dejar a nadie atrás: Propuestas en el marco del proyecto ZeroW | 85 |
| Planta de Carbonización Hidrotermal de la Ciudad de México: | 103 |



EDITORIAL



Antonio Arenas Casas

Vicerrector de Formación continua, Empleabilidad y Emprendimiento

Con gran satisfacción, presentamos el sexto número de la Revista C3-BIOECONOMY, Circular and Sustainable Bioeconomy, una edición que consolida la trayectoria de esta plataforma en la difusión de conocimiento científico-técnico y en el impulso de la Bioeconomía Circular. Al igual que en números anteriores, mantenemos nuestro enfoque en la innovación, prestando especial atención al sector agroalimentario y forestal, sin perder nuestra clara vocación multisectorial. A través de estos años, C3-BIOECONOMY se ha convertido en un instrumento indispensable para promover reflexiones e intercambios, actuando como un puente esencial entre continentes, especialmente entre Europa e Iberoamérica.

En el actual escenario global, marcado por desafíos ambientales y económicos cada vez más complejos, la investigación se erige como la herramienta crucial para abordar los problemas de la sociedad moderna y buscar caminos hacia soluciones innovadoras y sostenibles. Este sexto número sigue esta misión, ofreciendo una visión profunda y esclarecedora sobre cuestiones clave para el futuro.

El contenido del sexto número ofrece una visión profunda y esclarecedora, estructurada en tres artículos científicos, un monográfico especializado y dos casos de éxito prácticos. En la sección de artículos, se aborda la interconexión esencial entre la ciencia, la economía y el medio ambiente. Un primer estudio explora la relación crítica entre la polinización y la seguridad alimentaria a través de la perspectiva de productores agrícolas en Itapúa, Paraguay. La revista sigue demostrando su compromiso con la Economía Circular al incluir un artículo centrado en la valorización de residuos mediante la obtención de Biogás a partir de la fermentación de los subproductos generados en el procesamiento de *Physalis Peruviana L.* (Aguaymanto). Este tipo de estudios de valorización de subproductos se alinea con investigaciones previas de la revista enfocadas en la biomasa de olivar, el suero de leche o los residuos de mataderos. Además, se presenta una evaluación del efecto bioestimulante sobre plantas utilizando extractos de microalgas obtenidos a partir de un proceso de economía circular.

Complementando esta investigación, el número incluye un monográfico dedicado al Bioemprendimiento en América Latina y el Caribe, destacando los aportes del Centro de Agrobioemprendimientos e Inversiones del IICA. Este enfoque reconoce la importancia de los modelos de negocio empresariales, del capital humano y del desarrollo territorial, subrayando la necesidad de la sensibilización social, la formación y la investigación para impulsar modelos sostenibles en las zonas rurales.

Para finalizar, se presentan dos casos de éxito que ilustran cómo la colaboración y la aplicación práctica transforman el conocimiento en acciones concretas. El primero de ellos aborda un reto global ya identificado en la revista: la pérdida y el desperdicio de alimentos (PDA), con propuestas concretas en el marco del proyecto ZEROW. El segundo caso de éxito muestra el uso de tecnologías alternativas para el manejo de residuos orgánicos en países en vías de desarrollo, a través del ejemplo de la Planta de Carbonización Hidrotermal de la Ciudad de México. Estos ejemplos demuestran cómo la reutilización de recursos y la innovación práctica brindan soluciones a problemas sectoriales,

similar a iniciativas previas que utilizaron microalgas y bacterias como materia prima de valor o gestionaron residuos de la agricultura protegida andaluza. La colaboración interdisciplinaria y la aplicación práctica de estos hallazgos son esenciales para transformar el conocimiento en acciones concretas que impulsen un cambio positivo hacia un modelo más sostenible y regenerativo.

Reciban un cordial saludo.

Antonio Arenas Casas

Vicerrector de Formación continua, Empleabilidad y Emprendimiento



C3-BIOECONOMY
Circular and Sustainable Bioeconomy



EDITORIAL



Antonio Arenas Casas

Vice-Chancellor for Continuing Education, Employability and Entrepreneurship

We are delighted to present the sixth issue of C3-BIOECONOMY Magazine: 'Circular and Sustainable Bioeconomy'. This edition further establishes the magazine's reputation for disseminating scientific and technical knowledge, and promoting the circular bioeconomy. As in previous issues, our focus remains on innovation, with a particular emphasis on the agri-food and forestry sectors, while maintaining our clear multi-sectoral vocation. Over the years, C3-BIOECONOMY has become an invaluable resource for fostering dialogue and collaboration, bridging the gap between continents, particularly between Europe and Latin America.

In the current global scenario, which is characterised by increasingly complex environmental and economic challenges, research is the key to addressing the problems of modern society and finding innovative, sustainable solutions. This sixth issue continues this mission, offering an in-depth and enlightening perspective on critical issues for the future.

The sixth issue provides a comprehensive and enlightening overview, organised around three scientific articles, a specialised monograph, and two practical case studies. The articles section explores the vital connection between science,

economics and the environment. One study examines the critical relationship between pollination and food security from the perspective of agricultural producers in Itapúa, Paraguay. Demonstrating its ongoing commitment to the circular economy, the journal includes an article focusing on waste recovery through the production of biogas from the fermentation of by-products generated in the processing of *Physalis peruviana* L. (aguaymanto). Studies on the recovery of by-products such as this one are in line with previous research published in the journal, which has focused on olive biomass, whey and slaughterhouse waste. Additionally, the issue presents an evaluation of the biostimulant effect on plants using microalgae extracts obtained from a circular economy process.

To complement this research, the issue features a monograph on bioentrepreneurship in Latin America and the Caribbean, which highlights the contributions of the IICA Centre for Agribusiness and Investment. This approach recognises the importance of business models, human capital, and territorial development, emphasising the need for social awareness, training, and research to promote sustainable rural development.

Finally, two success cases are presented to illustrate how collaboration and practical application can transform knowledge into concrete action. The first story addresses the global issue of food loss and waste (FLW), as previously discussed in the journal, and presents concrete proposals within the framework of the ZEROW project. The second success story demonstrates the use of alternative technologies for managing organic waste in developing countries, using the Hydrothermal Carbonisation Plant in Mexico City as an example. These examples demonstrate how resource reuse and practical innovation can solve sectoral problems. Similar solutions have previously been achieved using microalgae and bacteria as valuable raw materials, or by managing waste from protected agriculture in Andalusia. Interdisciplinary collaboration and the practical application of these findings are essential for transforming knowledge into actions that drive positive change towards a more sustainable and regenerative model.

Kind regards.

Antonio Arenas Casas

Vice-Chancellor for Continuing Education, Employability and Entrepreneurship

Polinización y seguridad alimentaria: una exploración desde la mirada de productores agrícolas del departamento de Itapúa-Paraguay

Lorena Selent Chaparro¹, Gladys Romero Encina², Silvia Liliana Amarilla²,
Lilian Mabel Casco Chamorro² y Analía Verónica Benítez Miranda²

Autor de Correspondencia: loreselent@hotmail.com

Resumen

La seguridad alimentaria depende de factores ecológicos como la polinización, servicio esencial para la fecundación de cultivos y la calidad nutricional. Este estudio analiza conocimientos y percepciones de productores agrícolas de Itapúa (Paraguay) sobre la relación entre polinización y producción alimentaria, reconociendo los saberes campesinos como formas legítimas de conocimiento. Se empleó un enfoque exploratorio-descriptivo mediante encuesta semiestructurada virtual, aplicada entre junio y julio de 2025 a 20 productores de granos y hortalizas de Nueva Alborada, Capitán Miranda y Obligado, seleccionados por conveniencia. Los resultados revelan una valoración positiva generalizada del papel de los polinizadores, especialmente las abejas, en la disponibilidad y calidad de los alimentos. Sin embargo, se identifican vacíos conceptuales y una desconexión entre el conocimiento teórico y las prácticas agrícolas, como la fumigación en horarios críticos para los polinizadores. El estudio destaca la importancia de los saberes campesinos como forma legítima de conocimiento, y propone fortalecerlos mediante procesos de capacitación agroecológica, educación rural contextualizada y diálogo de saberes.

Palabras clave: apicultura, agroecología, práctica agrícola.

Pollination and food security: an exploration from the point of view of agricultural producers in the department of Itapúa-Paraguay

Lorena Selent Chaparro¹, Gladys Romero Encina², Silvia Liliana Amarilla²,
Lilian Mabel Casco Chamorro² y Analía Verónica Benítez Miranda²

Abstract

Food security depends on ecological factors such as pollination, an essential service for crop fertilization and nutritional quality. This study analyzes the knowledge and perceptions of agricultural producers in Itapúa (Paraguay) regarding the relationship

¹ Universidad de Córdoba (España)

² Universidad Nacional de Itapúa (Paraguay)

between pollination and food production, recognizing farmers' knowledge as a legitimate form of understanding. An exploratory-descriptive approach was used through a virtual semi-structured survey, applied between June and July 2025 to 20 grain and vegetable producers from Nueva Alborada, Capitán Miranda, and Obligado, selected by convenience. The results reveal a widespread positive appreciation of the role of pollinators, especially bees, in food availability and quality. However, conceptual gaps and a disconnection between theoretical knowledge and agricultural practices, such as spraying during critical hours for pollinators, were identified. The study highlights the importance of farmers' knowledge as a legitimate form of understanding and proposes strengthening it through agroecological training, context-based rural education, and knowledge dialogue.

Keywords: beekeeping, agroecology, agricultural practice.

1. INTRODUCCIÓN

La seguridad alimentaria es un derecho humano fundamental y un componente esencial del desarrollo sostenible. Según la FAO (2014), implica que todas las personas tengan acceso físico, social y económico a alimentos suficientes, inocuos y nutritivos en todo momento. Este concepto ha evolucionado para incluir dimensiones como la calidad nutricional, la estabilidad de los sistemas agroalimentarios y la resiliencia frente al cambio climático (Banco Mundial, 2022). En este contexto, la producción agrícola enfrenta desafíos crecientes: degradación de suelos, pérdida de biodiversidad, escasez hídrica, fenómenos meteorológicos extremos y presión sobre los ecosistemas productivos (FAO, 2023).

Uno de los servicios ecosistémicos clave para garantizar la seguridad alimentaria es la polinización, proceso mediante el cual se transfiere el polen entre flores, permitiendo la fecundación y la formación de frutos y semillas. Se estima que más del 75% de los cultivos alimentarios del mundo dependen en alguna medida de los polinizadores (IPBES, 2016). Estos incluyen abejas, mariposas, aves, murciélagos y otros insectos, cuya actividad mejora no solo el rendimiento de los cultivos, sino también su calidad nutricional, forma, tamaño, valor comercial y vida útil (Bartomeus & Allen-Perkins, 2024). Estudios recientes han demostrado que la falta de polinizadores puede limitar la producción de alimentos ricos en nutrientes como frutas, verduras, frutos secos y legumbres, afectando directamente la dieta humana y la salud pública (Winfrey et al., 2024).

A pesar de su importancia, los polinizadores enfrentan múltiples amenazas: pérdida de hábitats, uso intensivo de pesticidas, cambio climático, enfermedades, especies invasoras y prácticas agrícolas no sostenibles (MITECO, 2020). Estas presiones han provocado una disminución alarmante en la diversidad y abundancia de polinizadores, especialmente en regiones agrícolas intensivas. En América Latina, se estima que hasta el 40 % de las especies de abejas están en riesgo de extinción (IUCN, 2024).

En este escenario, se ha identificado una brecha de conocimiento significativa entre los pequeños y medianos productores rurales respecto al papel de los polinizadores en la producción agrícola y la seguridad alimentaria (UNCiencia, 2019; Flores Mayal, 2022). Esta brecha se manifiesta en la escasa incorporación de prácticas amigables con los polinizadores, la falta de formación técnica, la desconexión entre saberes tradicionales y científicos, y la limitada percepción del vínculo entre biodiversidad y calidad alimentaria (Ambientum, 2019; Servindi, 2023). Aunque muchas comunidades indígenas y campesinas poseen conocimientos ancestrales sobre el manejo de ecosistemas y la conservación de polinizadores, estos saberes suelen estar subvalorados o excluidos de las políticas agrícolas convencionales (Gomel-Apaza *et al.*, 2023).

La polinización constituye un proceso ecológico esencial para la producción de alimentos, especialmente en cultivos entomófilos. Sin embargo, en contextos rurales como el departamento de Itapúa, persisten vacíos en el conocimiento de los productores sobre su vínculo con la disponibilidad y calidad alimentaria. Este estudio se justifica por la necesidad de identificar dichas brechas y comprender las percepciones locales, con el fin de orientar estrategias de sensibilización y promover prácticas agrícolas compatibles con la conservación de polinizadores. La generación de evidencia situada permitirá fortalecer la sostenibilidad productiva y contribuir a la seguridad alimentaria regional. A través de una encuesta aplicada en distintos distritos, se busca comprender el nivel de conciencia sobre el papel de los polinizadores en la producción agrícola, las prácticas que favorecen o limitan su presencia, y las implicancias de estos factores en la seguridad alimentaria local. Este enfoque permitirá visibilizar saberes locales, detectar vacíos de información y proponer estrategias

de sensibilización y formación que fortalezcan la sostenibilidad agroalimentaria en la región.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Polinización como servicio ecosistémico multifuncional.

La polinización es fundamental para preservar el balance de nuestros ecosistemas naturales y agroecosistemas, siendo un componente indispensable en la producción agrícola. Este proceso consiste en la transferencia de polen desde las anteras hacia los estigmas, ya sea dentro de la misma flor o entre flores de la misma especie, posibilitando la fecundación y posterior formación de frutos y semillas (Ollerton, 1999). Si bien existen plantas que pueden ser polinizadas por agentes abióticos, alrededor del 90% de las angiospermas dependen de la polinización mediada por animales, en particular insectos (Ollerton, 1999). En el contexto de los agroecosistemas, la polinización biótica es vital. Cerca del 70% de los cultivos destinados al consumo humano, entre los que se incluyen verduras, frutas, semillas, "frutos secos" y especias, necesitan de este servicio ecosistémico para mejorar tanto la cantidad como la calidad de su producción (Klein *et al.*, 2007). Los cultivos dependientes de polinización son especialmente relevantes debido a su aporte significativo de vitaminas y minerales esenciales para la alimentación diaria (Agostini *et al.*, 2022). Sin embargo, a nivel mundial, diversos estudios han evidenciado una disminución notable en la abundancia y diversidad de polinizadores, un fenómeno estrechamente vinculado al deterioro ambiental y a los impactos del cambio climático (González-Varo *et al.*, 2013). Esta reducción en la población de polinizadores plantea riesgos importantes para la producción agrícola y la seguridad alimentaria, destacando la necesidad de estrategias de manejo sostenible que protejan estos servicios ecosistémicos.

Seguridad alimentaria y soberanía agroalimentaria

El acceso a alimentos inocuos y nutritivos para llevar una vida activa y sana, son los rasgos que definen la seguridad alimentaria. Se habla también de este concepto cuando se aseguran alimentos sanos al alcance de todos (Martín y AA. VV, 2009).

La seguridad alimentaria, tradicionalmente asociada con el acceso físico y económico a alimentos suficientes y adecuados (FAO, 1996), debe ser reinterpretada desde un marco agroecológico. Altieri (2009) propone incorporar el concepto de soberanía alimentaria, que aboga por el derecho de los pueblos a definir sus propios sistemas productivos, priorizando la sostenibilidad ecológica y el saber local.

De las 100 especies vegetales que abastecen el 90 % de los alimentos en 146 países, 71 dependen de la polinización por abejas. Además, el 80 % de las plantas silvestres requieren insectos para su fecundación. La ausencia de polinizadores compromete la formación de semillas, la producción de frutos y la seguridad alimentaria global (Yangari, 2008). Asimismo, la diversidad de polinizadores contribuye a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas, al fortalecer su capacidad de adaptación frente a variaciones climáticas y reducir la dependencia de insumos químicos, favoreciendo así una producción más estable y ecológicamente equilibrada (Romero, Li, & Albrecht, 2022).

2.2 Conocimiento de los productores

El conocimiento de los productores agrícolas constituye una forma legítima y profundamente contextualizada de comprender y gestionar el entorno natural (Santos, 2010). Estos saberes, construidos a partir de la experiencia, la observación y la memoria colectiva, integran elementos técnicos, culturales y simbólicos que orientan las prácticas productivas en el territorio

Autores como Toledo y Barrera-Bassols (2008) han conceptualizado estos saberes como parte de una “memoria biocultural”, que articula conocimientos sobre biodiversidad, manejo de recursos y conservación ecológica. Desde las epistemologías del Sur, de Sousa Santos (2014) propone un diálogo horizontal entre saberes científicos y tradicionales, reconociendo su complementariedad. Este enfoque permite superar la violencia epistémica que ha marginado los saberes indígenas y campesinos (Spivak, 2004), y construir modelos agrícolas más inclusivos, resilientes y sostenibles.

La agroecología, como ciencia y movimiento social, se nutre de este diálogo de saberes. Altieri y Toledo (2011) destacan que no puede desarrollarse

plenamente sin incorporar los conocimientos locales. Las escuelas campesinas de agroecología han promovido metodologías participativas como el “campesino a campesino”, que valoran el saber empírico y la transmisión oral como formas legítimas de aprendizaje (Minga, 2016). Estas experiencias fortalecen la identidad rural, la soberanía alimentaria y la capacidad de adaptación frente al cambio climático.

En Paraguay, las capacitaciones técnicas agrícolas se han consolidado como herramientas clave para fortalecer el conocimiento de los productores rurales y mejorar la sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios. Estas instancias formativas permiten actualizar prácticas productivas, incorporar criterios ecológicos y promover el uso responsable de insumos, especialmente en lo que respecta a la conservación de polinizadores. En Paraguay, instituciones como la Dirección de Extensión Agraria (DEAg) y el Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria (IPTA) ofrecen cursos gratuitos y virtuales sobre buenas prácticas agrícolas, manejo de cultivos, sanidad vegetal y agroecología, dirigidos a técnicos y productores de todo el país (DEAg, 2025; IPTA, 2025). A nivel regional, la FAO Campus ha desarrollado trayectos de formación en agroecología, agricultura familiar y conservación de polinizadores, con enfoque territorial y metodologías participativas adaptadas a las realidades locales (FAO, 2025). Estas iniciativas contribuyen a cerrar brechas de conocimiento, reducir impactos ambientales y empoderar a los agricultores como agentes del desarrollo sostenible.

3. METODOLOGÍA

En el presente estudio se empleó un muestreo no probabilístico de tipo conveniencia, adecuado para enfoques exploratorio-descriptivos que buscan comprender percepciones situadas más que establecer inferencias estadísticas (Hernández *et al.*, 2014; Flick, 2015). La selección de los participantes respondió a criterios de accesibilidad, disposición para participar y pertinencia temática, considerando productores de granos y hortalizas con experiencia productiva en tres municipios del departamento de Itapúa: Nueva Alborada, Capitán Miranda y Obligado. Se aplicaron 20 encuestas virtuales a través de Google forms, entre

junio y julio de 2025, priorizando la diversidad de cultivos y contextos ecológicos locales. Si bien este tipo de muestreo presenta limitaciones en cuanto a representatividad estadística, permite captar saberes campesinos contextualizados y generar insumos valiosos para futuras investigaciones (Patton, 2015). La muestra se conformó a partir de redes institucionales y contactos técnicos locales, lo que facilitó la participación voluntaria de productores con conocimientos relevantes sobre prácticas agrícolas y polinización. Esta estrategia se considera pertinente para estudios que priorizan la comprensión cualitativa y el diálogo de saberes en territorios rurales (Altieri & Toledo, 2011; De Sousa Santos, 2014). Se realizó un análisis cuantitativo mediante el cálculo de frecuencias absolutas y relativas para las variables cerradas. Paralelamente, se aplicó un análisis cualitativo de contenido a las respuestas abiertas, identificando patrones semánticos, niveles de conocimiento y categorías emergentes (Lopezosa *et al.*, 2022; ATLAS.ti, 2025).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La encuesta realizada a 20 productores agrícolas de Itapúa proporciona una visión integral sobre su perfil sociodemográfico (tabla 1), prácticas productivas y nivel de conocimiento sobre polinización.

| Tabla de frecuencias | | | | |
|--|--------------------|------------------------|------------------------|--|
| Variable | Categoría | Frecuencia absoluta | Frecuencia relativa | |
| Edad del productor | Menos de 30 años | 6 | 30% | |
| | Entre 31 y 40 años | 3 | 15% | |
| | Entre 41 y 50 años | 5 | 25% | |
| | Mas de 50 años | 6 | 30% | |
| Nivel Educativo | Primaria | 7 | 35% | |
| | Secundaria | 8 | 40% | |
| | Universitaria | 5 | 25% | |
| Rubro cultivado | Granos | 13 | 65% | |
| | Hortalizas | 7 | 35% | |
| Horario de fumigación | Mañana | 1 | 50% | |
| | Tarde | 3 | 15% | |
| | Cualquier horario | 16 | 80% | |
| Conocimiento sobre la presencia de colmenas cerca de su cultivo | Si | 4 | 20% | |
| | No | 1 | 5% | |
| | No sabe | 15 | 75% | |
| Disponibilidad de alimentos: | Si | 20 | 100% | |
| ¿Dependen de los polinizadores? | No | | | |

Tabla 1: Elaboración propia

4.1 Perfil sociodemográfico

Se observa una distribución equilibrada entre productores menores de 30 años (30 %), mayores de 50 años (30 %), y aquellos entre 41 y 50 años (25 %), indicando coexistencia generacional en el sector. Respecto a la formación educativa, predomina tanto la educación primaria como secundaria (35% y 40 % respectivamente), seguido por educación universitaria (25 %).

4.2 Localización y tipos de cultivo

La mayoría reside en Nueva Alborada (55 %), seguido por Capitán Miranda (35 %) y Obligado (10 %). En cuanto al rubro cultivado, las verduras u hortalizas representan el 65 %, y los granos que normalmente son soja, maíz o trigo corresponden el 35 %, lo que señala una inclinación hacia cultivos hortícolas posiblemente más dependientes de la polinización.

4.3 Prácticas de fumigación

El 70 % de los productores fumiga en cualquier horario, sin tener en cuenta la actividad de los polinizadores. Este patrón podría deberse a falta de formación técnica, escasa planificación o simplemente hábitos establecidos. Solo el 5 % lo hace de mañana, y el 10% al atardecer/noche, que son los horarios recomendados para reducir el impacto sobre abejas.

4.4 Colmenas y conocimiento sobre la importancia de la polinización

Aunque el 70 % puede atribuir importancia a la polinización, el 60 % no sabe si hay colmenas cerca de sus cultivos. Esta incongruencia refleja una brecha crítica entre conocimiento teórico y observación práctica. Esto es especialmente preocupante si consideramos que el 100 % de los productores cree que los polinizadores influyen en la disponibilidad de alimentos, y el 95 % también en su calidad. Todos los productores encuestados atribuyen a las abejas un nivel de importancia alto en la producción agrícola. Esta percepción se encuentra generalizada en el conjunto de participantes, independientemente de su edad, nivel educativo o tipo de cultivo. La afirmación de "alta importancia" aparece de manera consistente en las respuestas cerradas, lo que indica una conciencia extendida sobre el rol de los polinizadores en los sistemas productivos.

Análisis cualitativo de patrones

4.5 Conciencia sobre los polinizadores en la producción agrícola

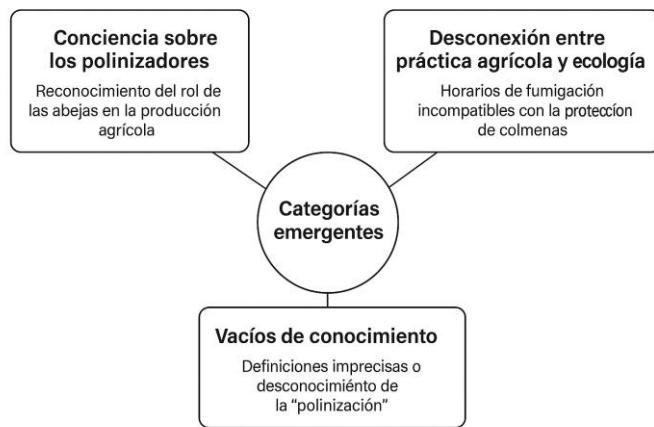


Figura 1: Elaboración propia. Categorías emergentes sobre conciencia sobre los polinizadores

La mayoría de los productores expresa una valoración positiva y activa del papel que cumplen los polinizadores, especialmente las abejas, en el proceso productivo. Se identifica una idea o noción general de que sin polinización no hay producción, lo cual refleja una apropiación significativa del vínculo entre biodiversidad y agricultura.

- Frases como "Toda la producción depende de una buena polinización" o "Asegura la fecundación de las flores para mayor producción" revelan una comprensión funcional de este servicio ecosistémico.
- Muchos mencionan que "el 100% de la producción depende de los polinizadores", lo que posiciona este proceso como clave dentro del imaginario agrícola.

Este nivel de conciencia sugiere que, más allá de conocimientos técnicos, existe una experiencia empírica que permite a los productores reconocer la correlación entre presencia de abejas y aumento de rendimiento, lo que puede ser un punto de partida valioso para iniciativas agroecológicas.

4.6 Vacíos de conocimiento específico sobre polinización

Pese al reconocimiento general, una proporción significativa de participantes presenta definiciones incompletas, simplificadas o erróneas del concepto de polinización. Muchos respondieron “no sabe”, o asociaron el proceso a ideas vagas como “es importante” o “garantiza la producción”, sin describir cómo sucede o qué agentes intervienen.

- Definiciones como “Que ayuda a fecundar las flores” o “La fecundación de la flor” aparecen de forma reiterada.
- Algunos participantes dejaron en blanco las preguntas abiertas, lo que puede asociarse a inseguridad o desconocimiento del término.

Este vacío cognitivo pone de manifiesto la necesidad de intervenciones educativas más estructuradas. La alta frecuencia de respuestas difusas puede deberse a la falta de articulación entre saber técnico y saber práctico en contextos rurales, y representa una barrera para adoptar estrategias de conservación integradas.

4.7 Desconexión entre práctica agrícola y conciencia ecológica

Una constante observada fue la afirmación “fumiga en cualquier horario”, sin consideración por la presencia de colmenas o la actividad diaria de los polinizadores. Esta práctica entra en conflicto con la conservación de especies como las abejas, que son altamente sensibles a agroquímicos, sobre todo durante sus horas activas de forrajeo.

- Solo dos productores mencionan que hay colmenas cercanas, y menos aún especifican la distancia.
- La mayoría no relaciona el horario de fumigación con efectos sobre los polinizadores.
- No se reportan medidas de manejo para proteger colmenas o minimizar impactos ecológicos.

Los resultados de esta encuesta evidencian que los productores agrícolas de Itapúa reconocen ampliamente la importancia de la polinización en la

producción de alimentos. Sin embargo, se observa una desconexión entre el conocimiento conceptual y las prácticas agrícolas cotidianas, especialmente en lo que respecta al horario de fumigación y la presencia de colmenas en el entorno productivo. Este hallazgo coincide con estudios realizados en otras regiones agrícolas. Por ejemplo, Hevia *et al.* (2021) encontraron que, aunque el 92.7 % de los agricultores españoles reconocen la necesidad de los polinizadores para sus cultivos, menos del 55 % aplica prácticas concretas para protegerlos, como reducir el uso de insecticidas o diversificar los cultivos. Asimismo, Tarakini, Chemura y Musundire (2020) reportaron que, en Zimbabue, el 67 % de los agricultores afirmaban conocer el concepto de polinización, pero la mayoría no podía identificar correctamente a las abejas ni describir sus beneficios ecológicos, lo que limita su capacidad de conservación.

Además, estudios como el de Graham y Hageman (2025) en EE. UU. han demostrado que el momento de aplicación de insecticidas tiene un impacto directo en la seguridad de los polinizadores, recomendando fumigaciones en horarios de baja actividad (tarde o noche) para minimizar el riesgo. En contraste, en Itapúa, el 69.2 % de los productores fumiga en cualquier horario, lo que podría afectar negativamente a las poblaciones de abejas locales.

Estos paralelismos sugieren que el fenómeno observado en Itapúa no es aislado, sino parte de una tendencia global donde el conocimiento sobre la importancia de los polinizadores no siempre se traduce en acciones concretas de protección.

5. CONCLUSIONES

El estudio reveló una valoración generalizada del papel de los polinizadores, especialmente las abejas, en la producción agrícola de Itapúa. Los productores reconocen que todos los cultivos dependen de la polinización y afirman que influye tanto en la cantidad como en la calidad de los alimentos. Sin embargo, esta conciencia convive con vacíos de conocimiento técnico, lo que se refleja en definiciones incompletas o imprecisas del proceso de polinización. Además, las prácticas agrícolas actuales, como la fumigación sin horario determinado,

evidencian una desconexión entre el saber ecológico y el manejo práctico en los espacios productivos rurales.

5.1 Líneas futuras de investigación

- Investigaciones participativas que incorporen saberes campesinos y apícolas en el diseño de estrategias de manejo agroecológico.
- Evaluación de políticas públicas relacionadas con biodiversidad agrícola y su implementación en comunidades rurales de Itapúa.

REFERENCIAS

- AGOSTINI, K., GALETTO, L., VIELI, L., MURÚA, M., CHACOFF, N. P., & FRANCOY, T. (2022). Polinización: un servicio ecosistémico completo.
- ALTIERI, M. A. (2009). Agroecology, small farms, and food sovereignty. *Monthly Review*, 61(3), 102–113.
- AMBIENTUM. (2019, 27 de febrero). La biodiversidad está gravemente amenazada. Portal Ambiental. <https://www.ambientum.com/ambientum/biodiversidad/biodiversidad-amenazada.asp>.
- AMBIENTUM. (2025). La importancia de los polinizadores en la seguridad alimentaria y la biodiversidad. <https://www.ambientum.com>
- ATLAS.ti. (2025). El software n.º 1 para el análisis cualitativo de datos. <https://atlasti.com/es>.
- Banco Mundial. (2022, 17 de octubre). Lo que debe saber sobre la seguridad alimentaria y el cambio climático. <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2022/10/17/what-you-need-to-know-about-food-security-and-climate-change>.
- BARTOMEUS, I., & ALLEN-PERKINS, A. (2024). Wild insects and honey bees are equally important to crop yields in a global analysis. *Global Ecology and Biogeography*, 33(7), e13843. <https://doi.org/10.1111/geb.13843>.
- DE SOUSA SANTOS, B., & Meneses, M. P. (Eds.). (2014). *Epistemologías del Sur: Perspectivas*. Editorial Akal.
- Dirección de Extensión Agraria (DEAg). (2025, 14 de julio). Catálogo de cursos en línea 2025. Ministerio de Agricultura y Ganadería de Paraguay.

- <http://conocimiento.mag.gov.py/recursos-para-el-aprendizaje/index.php/author/capacitacion/>.
- FAO & OCDE. (2023). Perspectivas agrícolas 2023–2032. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. https://www.oecd.org/es/publications/ocde-fao-perspectivas-agricolas-2023-2032_2ad6c3ab-es.html.
- FAO. (1996). Cumbre Mundial sobre la Alimentación: Declaración de Roma.
- FAO. (2014). Principios y avances sobre polinización como servicio ambiental para la agricultura sostenible en América Latina y el Caribe. Santiago, Chile.
- FAO. (2023). El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2023. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. https://www.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/35648/1/El_estado_mundial_de_la_agricultura_y_la_alimentacion_2023_FA_O_AP_y_AL.pdf
- FAO. (2025). Polinizadores y uso sostenible de plaguicidas [Curso de autoaprendizaje]. FAO Campus. <https://www.fao.org/in-action/fao-campus/training-activities/self-paced-courses/polinizadores-y-uso-sostenible-de-plaguicidas/es>
- FLORES MAYAL, H. M. (2022). El declive de los polinizadores: causas, consecuencias y percepción (Trabajo Fin de Grado inédito). Universidad de Sevilla. <https://idus.us.es/handle/11441/159140>
- GOMEL-APAZA, Z. P., Ishizawa-Oba, J., Granados-Carballo, R. E., & Gamwell, A. (2023). Usos de conocimientos tradicionales de conservación de la agrobiodiversidad en adaptación al cambio climático en comunidades indígenas de Puno, Perú. Revista Espiga, 22(46), 140–163. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/re/v22n46/2215-454X-re-22-46-140.pdf>

GONZÁLEZ-VARO, J. P., Biesmeijer, J. C., Bommarco, R., Potts, S. G., Schweiger, O., & Smith, H. G. (2013). Combined effects of global change pressures on animal-mediated pollination. *Trends in Ecology and Evolution*, 28, 524–530.

GRAHAM, K., & HAGEMAN, K. (2025). Timing insecticide applications for pollinator preservation. *Hay & Forage Grower*, 12–13. <https://alfalfa.org>

HEVIA, V., GARCÍA-LLORENTE, M., MARTÍNEZ-SASTRE, R., et al. (2021). Do farmers care about pollinators? A cross-site comparison of farmers' perceptions, knowledge, and management practices for pollinator-dependent crops. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 19(1), 1–15. <https://doi.org/10.1080/14735903.2020.1807892>

Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria (IPTA). (2025). Cursos y capacitaciones técnicas en agroecología y agricultura sostenible. <https://www.ippta.gov.py/>

IPBES. (2016). Assessment report on pollinators, pollination and food production. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.

KLEIN, A. M., VAISSIÈRE, B. E., Cane, J. H., STEFFAN-DEWENTER, I., CUNNINGHAM, S. A., KREMEN, C., & TSCHARNTKE, T. (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274(1608), 303–313. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3721>

LOPEZOSA, C., CODINA, L., & FREIXA, P. (2022). ATLAS.ti para entrevistas semiestructuradas: Guía de uso para un análisis cualitativo eficaz. DigiDoc Research Group.

MARTÍN, O. P., & AA.VV. (2009). Cuadernos del OSE sobre políticas de salud en la UE. Número 5: Seguridad Alimentaria. Observatorio de Salud en Europa, Escuela Andaluza de Salud Pública.

MINGA OCHOA, N. (2016). Aportes de la agroecología campesina: Casos en la Sierra Sur de Ecuador. Revista LEISA, 32(Especial), 36–46. <https://leisa-al.org/web/revista/volumen-32-edicion-especial/aportes-de-la-agroecologia-campesina-casos-en-la-sierra-sur-de-ecuador>

MITECO. (2020). Estrategia Nacional para la Conservación de los Polinizadores. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

OLLERTON, J., WINFREE, R., & TARRANT, S. (2011). How many flowering plants are pollinated by animals? *Oikos*, 120(3), 321–326.

ROMERO, P., Li, L., & ALBRECHT, P. Diversidad de polinizadores y seguridad alimentaria.

SANTOS, B. de S. (2010). Epistemologías del Sur. Siglo XXI.

SERVINDI. (2023, 19 de julio). Ciencia y saberes tradicionales: Brecha aún por superar. Servicios de Comunicación Intercultural. <https://www.servindi.org/actualidad-reportaje/19/07/2023/ciencia-y-saberes-tradicionales-brecha-aun-por-superar>

SPIVAK, G. C. (2004). Can the subaltern speak? En R. Morris (Ed.), *Can the Subaltern Speak? Reflections on the History of an Idea* (pp. 21–78). Columbia University Press.

TARAKINI, G., CHEMURA, A., & MUSUNDIRE, R. (2020). Farmers' knowledge and attitudes toward pollination and bees in a maize-producing region of Zimbabwe: Implications for pollinator conservation. *Tropical Conservation Science*, 13, 1–1. <https://doi.org/10.1177/1940082920918534>

TOLEDO, V. M., & BARRERA-BASSOLS, N. (2008). La memoria biocultural: La importancia ecológica de las sabidurías tradicionales. Icaria Editorial.

UNCIENCIA. (2019, 13 de marzo). Advierten que la disminución de las poblaciones silvestres de polinizadores tiene un impacto negativo en la producción agrícola. Universidad Nacional de Córdoba. <https://uncuencia.unc.edu.ar/biologia/advierten-que-la-disminucion-de-las-poblaciones-silvestres-de-polinizadores-tiene-un-impacto-negativo-en-la-produccion-agricola>

VARGAS FERNÁNDEZ, A. M., et al. (2024). Pérdida de colonias de abejas en América Latina: Implicancias para la biodiversidad y la seguridad alimentaria. *Nature Scientific Reports*. <https://uchile.cl/noticias/220884/estudio-pionero-uchile-revela-perdidas-de-colonias-de-abejas-en-latam->

WINFREE, R., BARTOMEUS, I., & CARIVEAU, D. P. (2018). Native pollinators in anthropogenic habitats. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 49, 1–22. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110617-062503>

YANGARI, B. (2008). El ocaso de las abejas alarma a los científicos. Ed. CENSA. Red de Desastres: redesastres@censa.edu.cu

YANGARI, M. M. (2008). Apicultura y seguridad alimentaria. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 42(2), 25–31. <https://www.redalyc.org/pdf/1930/193030122008.pdf>



Obtención de Biogás a partir de la fermentación de los residuos del procesamiento de *Physalis Peruviana L.* (Aguaymanto)*

Claudia F. Loarte Ruiz¹

*Investigación realizada dentro del estudio “Aprovechamiento energético de desechos de la industrialización de especies nativas”, convenio entre AGRORET y UNC.

Autor de Correspondencia: claudiaflr@yahoo.es

Resumen:

La industrialización de especies agrícolas autóctonas y orgánicas en Perú se ha incrementado y diversificado rápido últimamente, permitiendo que especies de alto valor nutricional y poco conocidas, como la *Physalis Peruviana L.* puedan llegar a ser accesibles en los mercados nacional e internacional. En consecuencia, es de interés el adecuado manejo y aprovechamiento de sus residuos agroindustriales, que se incrementan también, para conservar la calidad medioambiental y conseguir una economía circular.

La presente investigación experimental a nivel de laboratorio buscó determinar la capacidad que poseen los residuos sólidos provenientes de la industrialización del aguaymanto para generar biogás, obtener la fermentación y medición del biogás producido, comparando muestras pretratados y pre-inoculados, con muestras sin tratamientos previos. Mediante análisis fisicoquímicos iniciales se pudo reconocer los cambios estructurales en la biomasa y su potencial fermentativo, con pretratamiento de ác. acético a diferentes concentraciones comparativamente a ác. sulfúrico. Los análisis estadísticos evaluaron la significancia del pretratamiento, la pre-inoculación y las fermentaciones. Los resultados concluyeron que poseen potencial para producir biogás, que la concentración de ac. acético al 0,2 M brinda mayor ventaja frente a otras concentraciones y a un ác. mineral, y que las fermentaciones con pre-inóculo generan biogás en similar cantidad y calidad.

Palabras clave: Residuos agroindustriales, Aguaymanto, Biogás, Fermentación

Obtaining biogas from the fermentation of waste from the processing of *Physalis Peruviana L.* (Aguaymanto)*

Claudia F. Loarte Ruiz³

*Research conducted as part of the study 'Energy use of waste from the industrialisation of native species', an agreement between AGRORET and UNC.

Abstract:

¹ Mg.Sc. Ecología Aplicada, Mg. Proyectos, Mg. Gestión Estratégica, Ingeniera y docente universitaria.

The industrialisation of native and organic agricultural species in Peru has increased and diversified rapidly, making lesser-known species with high nutritional value, such as *Physalis peruviana* L., accessible in national and international markets. Consequently, proper management and use of the increasing amount of agro-industrial waste is important in order to preserve environmental quality and achieve a circular economy.

This experimental, laboratory-level research aimed to establish the potential of using solid waste from the production of aguaymanto to generate biogas and to measure fermentation and biogas production, comparing pre-treated and pre-inoculated samples with untreated samples. Initial physicochemical analyses revealed structural changes in the biomass and its fermentation potential when treated with acetic acid at different concentrations compared to sulphuric acid. Statistical analyses evaluated the significance of pretreatment, pre-inoculation and fermentation. The results concluded that the waste has the potential to produce biogas, that a 0.2 M acetic acid concentration offers greater advantages than other concentrations and mineral acids, and that fermentations with pre-inoculum generate biogas of a similar quantity and quality.

Key Words: Agro-industrial waste, Aguaymanto, Biogas, Fermentation

1. INTRODUCCIÓN

El fruto de la planta perenne ***Physalis Peruviana* L.**, conocida como aguaymanto o capulí, posee gran valor nutricional (altos índices en vitaminas A y C, potasio, fosforo y calcio) y propiedades organolépticas singulares (PUENTE, 2011). Estas características han impulsado su consumo e industrialización en el Perú, permitiendo el crecimiento en producción, cosecha, y rendimiento del 19%, 18%, y 10% respectivamente, en los últimos años. Asimismo, su comercialización, industrialización y exportación (principalmente en deshidratado y de tipo orgánico) ha presentado crecimiento de 12%, 15% y 8% respectivamente, durante el período 2015–2020. Simultáneamente, los residuos de su industrialización también se han incrementado, pero sin una data actualizada. (MIDAGRI, 2020). Sin embargo, se conoce que el rendimiento actual es de 10/12 Tn/Has. en la zona norte del país, obteniendo aproximadamente una tercera parte de residuos del procesamiento del fruto y este está compuesto por frutos no aptos, cáliz, cáscara, hojas y bagazo (según tratamiento industrial).

Se conoce que los residuos agroindustriales pueden llegar a generar problemas ambientales y sociales si no son manejados de manera adecuada. Este manejo no siempre es fácil por tratarse de residuos muy diversos y variables, tanto en

forma como en la localización de su generación. (ZAINUDIN et al., 2022). Dentro de las alternativas de un adecuado manejo y aprovechamiento de estos residuos se propone la generación de bioenergía, aprovechable por la propia agroindustria para el consumo energético de sus operaciones, supliendo la demanda energética de las fuentes tradicionales. (ZAINUDIN et al., 2022). Por ejemplo, el biogás que se obtiene de una fermentación metanogénica que es una digestión anaerobia, en donde bacterias transforman la biomasa en una mezcla de gases de alta capacidad calorífica y su rendimiento depende de la relación C/N de la biomasa (LEE, 2022). El proceso fermentativo considera cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis; en la primera se transforman los compuestos de alto peso molecular en sustancias que puedan ser utilizadas como fuente energética por los microorganismos y se obtienen compuestos de bajo peso molecular, como el ácido acético, mientras se generan gases como el metano y el hidrógeno, en un medio ácido. También, se tienen mayores valores de conductividad, para la demanda química de oxígeno (DQO) para oxidar los compuestos y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) requerida por los microorganismos para metabolizar compuestos orgánicos. Por otro lado, en la fase acetogénica comienzan a actuar los microorganismos metanogénicos, que convierten el ácido acético y el hidrógeno en metano y dióxido de carbono, generando la neutralización del medio y disminuyendo los valores de conductividad, DQO y DBO. En la etapa de metanogénesis se termina de producir el metano a partir de material biodegradable que no estaba disponible anteriormente (AMBIENTUM, 2015). Estos procesos bacterianos y enzimáticos requieren de azúcares presentes (HERNÁNDEZ, 2012) y siempre es un desafío la accesibilidad de la mayor cantidad de azúcares en la biomasa por sus complejas estructuras poliméricas; por tanto, se investigan diversas estrategias de pretratamiento para liberarlas. (YANG, 2008). Diferentes ácidos (como sulfúrico, clorhídrico, fluorhídrico, etc.) y sus derivados se investigan activamente como catalizadores para valorizar residuos agroindustriales, especialmente para producir biocombustibles; entre estos, el ác. acético que comparativamente es débil (pK_a : 4,75) pero es un

adecuado agente en biomasas con bajo contenido de lignina. (OROZCO et al, 2014).

El presente trabajo se desarrolló buscando el aprovechamiento de residuos provenientes de la industrialización de la *Physalis Peruviana L.* en las regiones Cajamarca y Ancash (zona norte del país) mediante la obtención de biogás como alternativa energética aprovechable por las mismas agroindustrias. La investigación experimental se centró en determinar su capacidad de generar biogás, definir un pretratamiento adecuado con un ác., obtener la fermentación comparando muestras con o sin pre-inóculo y medir el biogás producido.

2. MATERIALES y MÉTODO

Desarrollo de muestras, pretratamiento y los análisis respectivos:

2.1. Preparación de muestras

Se obtuvieron residuos de las empresas industrializadoras de aguaymanto de las regiones Cajamarca y Ancash. Se cortaron de manera uniforme (entre 3 - 5 mm), para homogeneizar los tamaños de las partículas para sus posteriores tratamientos. Se secó esta biomasa a 45°C durante 30 horas mediante convección forzada y posteriormente se utilizó un desecador para reducir su temperatura que facilite los procesos de molienda y tamizado, con el uso de mallas 75 #/pulg. lineal y 15 #/pulg. lineal. Después de esta preparación, las muestras se mantuvieron almacenadas en bolsas selladas a no más de 4°C hasta su uso.

2.2. Pretratamiento con ácido

Se utilizaron tubos de vidrio borosilicato de tipo I de alta calidad para colocar las muestras con diferentes concentraciones (0,2, 0,4 y 0,7 M) de ác. acético, con una relación de sustrato al 10 % (p/v). Las muestras se incubaron a 25°, 50° y 100°C durante 24h, 12h y 1h respectivamente, con ayuda de una autoclave Priorclave, para determinar condiciones óptimas de este pretratamiento. La

solución obtenida se filtró por succión, aspirando la fase líquida con ác. acético a través del filtro hacia un matraz conectado a una bomba de vacío y separándolo del residuo tratado con este. Los filtrados se almacenaron a 4°C para un análisis posterior y los residuos sólidos se secaron a 65 °C durante 2 h y se almacenaron en bolsas de polietileno. Para comparar la eficiencia de hidrólisis se usó ác. sulfúrico (0,2 M) como agente de pretratamiento a 100°C por 1h. Se seleccionó el ác. sulfúrico para esta parte, ya que su acción ya ha sido bien establecido en las últimas décadas (MOSSIER, et al. 2005)

2.3. Análisis Composicional

Siguiendo normas de la AOAC International, se realizaron las pruebas fisicoquímicas para analizar las muestras con y sin pre- tratamiento.

- 2.3.1. Sólidos totales: Las muestras se secaron en un horno a 100°C durante 24 h. Los sólidos volátiles y el contenido de cenizas de las muestras se lograron mediante un procedimiento seguido donde la biomasa seca obtenida se quemó completamente a 550°C por 16 h en un horno de mufla (Muffle Furnace) y para calcular el carbono fijado se utilizó: **Peso total Carbono fijado (%) = 100 – (sól. Volátiles (%) + Ceniza (%))**
- 2.3.2. Poder calorífico de cada muestra se calculó respecto al carbono fijado hallado: **Valor Calorífico (MJ kg-1) = (0.196 x Carbono Fijado) + 14.12**
- 2.3.3. El pH inicial de cada muestra se halló con un medidor de pH Mettler y se midió de la muestra seca (5 g) reconstituida con agua destilada (1:5).
- 2.3.4. Análisis de azúcares reductores totales y carbohidratos: Se evaluaron los hidrolizados obtenidos del pretratamiento a través del método colorimétrico de ácido dinitrosalicílico, donde el ácido 3,5-dinitrosalicílico se reduce a ácido 3-amino-5-nitrosalicílico, en presencia de pentosas y hexosas. Se tomaron 0,3 ml de muestra hidrolizada, se mezcló con 0,3 ml del ácido y se hirvió por 15 min en un baño de agua. La mezcla obtenida de color rojo anaranjado oscuro

se enfrió a temperatura ambiente antes de ser medida en un espectrofotómetro Thermo Fisher Scientific a 540 nm.

Para el contenido total de carbohidratos de las muestras se usó el método colorimétrico de fenol-ácido sulfúrico, donde el ác. sulfúrico concentrado transforma los polis/oligosacáridos en monosacáridos, las pentosas en furfural y las hexosas en 5-hidroximetil furfural, dando un color amarillo dorado por sus reacciones con el fenol. Se procedió mezclando en tubos de ensayo las muestras secas (25 mg) con 2 ml de agua destilada y se agregaron 5ml de ácido sulfúrico (98%) y 1ml de fenol (5%) y se agitó durante 25 min hasta obtener el color. Se midió la absorbancia a 490 nm. Se realizaron estos análisis a las muestras con y sin pretratamientos.

2.4. Análisis de los efectos catalíticos

Los efectos catalíticos de las diversas condiciones de pretratamiento se cuantificaron en función del tiempo de tratamiento t , la temperatura T y el pH a temperatura ambiente de los agentes de pretratamiento (CHUM, et al. 1990). Es así como se calculó un factor de severidad combinada de los tratamientos con ácidos usando las condiciones pre- estandarizadas para cada tratamiento: ác. acético: 1h, 100°C y pH - 2,61, y ác. sulfúrico: 1h, 100°C y pH - 1,21 y según: $CS = (\log t \times e^{(t-100/14.75)}) - pH$; (factores a T.a.)

2.5. Evaluación de la eficiencia de la hidrólisis con ácido acético

Se realizó para muestras con y sin pretratamiento y se prepararon colocando en un pulverizador catódico en frío, FEI Company, las muestras deshidratadas en una plataforma con cinta conductora de carbono y recubiertas con platino por 2 min. Se uso un microscopio electrónico de barrido Thermo Fisher Scientific, para la visualizaron los cambios morfológicos con un voltaje de aceleración de 5,00 kV en una atmósfera de bajo vacío.

2.6. Caracterización de los cambios en las composiciones químicas de la biomasa

Se prepararon pellets con mezclas de 1mg de muestra (con y sin pretratamiento) con KBr espectroscópicamente puro en una proporción de 5:95 para el análisis espectroscópico infrarrojo por transformada de Fourier (Thermo Fischer Scientific). Se usó un rango de longitud de onda infrarrojo medio de 4000 – 400 cm^{-1} y con una velocidad de escaneo de 64 a una resolución de 2 cm^{-1} para obtener grupos funcionales que indiquen los componentes estructurales como celulosa, hemicelulosa y lignina.

2.7. Análisis para determinar los cambios en la composición de la biomasa

Se colocaron muestras con y sin pretratamiento, 10mg de cada una, en una bandeja de aluminio en el horno en un analizador simultáneo termogravimétrico Thermostep de ELTRA hasta 600°C (desde los 20°C) en una atmósfera de nitrógeno (100 ml/min⁻¹) para determinar la pérdida de peso de ambas muestras para determinar sus perfiles térmicos y la degradación de diferentes componentes.

2.8. Desarrollo de Fermentación Anaeróbica

Se inocularon muestras pretratadas con ác. acético (0.2M) y sin pretratamiento, se hizo seguimiento y medición.

2.9. Pre-inoculación

Se trabajó el medio nutritivo con extracto de levadura (ST), cloruro de sodio y peptona bacteriológica en una proporción de 1-1-2 con agua caliente y homogeneizando dicha solución en un Erlenmeyer que se selló posteriormente para evitar la contaminación del inóculo.

La muestra de inóculo en el medio se preparó en una concentración 1% p/v (1g de cada muestra/100ml de medio), el día 0 (primer día experimental) y los 5 días siguientes se tomaron muestra del medio preparado. La experimentación se

realizó en la cámara UV, con el soplador de aire y el mechero encendidos, y donde se incorporó el residuo de la industrialización del aguaymanto y el medio inoculado en un tubo falcón, en una relación de 5mg/5ml. Los tubos de experimentación se sellaron con parafina, se les marcaron los volúmenes iniciales y permanecieron en la incubadora por 7 días a una temperatura de 37 °C. Al 8vo día se reconoció el volumen desplazado de parafina determinando la mayor producción de biogás.

Se utilizó como esterilizante el alcohol isopropílico al 70% (IPA) para la cámara UV y en ella se procedió a la esterilización de todos los materiales (tubos, micropipetas completas y guantes) por 15 min., antes de iniciar.

2.10. Fermentación

Para esta fase se prepararon 6 fermentadores para: 2 controles del residuo con pretratamiento y sin pretratamiento, 2 para el residuo sin pretratamiento con su réplica y 2 para el residuo pretratado con su respectiva réplica. Entre los materiales utilizados se tuvieron frascos para centrifuga Nalgene de 750 ml, como fermentadores, con tapones de caucho de tornillo en medio y rosca plástica aseguradora; una incubadora rotatoria para laboratorio con control térmico preciso Memmert, para llevar a cabo la fermentación.

Para cada frasco fermentador la carga fue de 15% de sólidos totales, (90% de sustrato y 10% de medio nutritivo preparados en 20ml del líquido de pre-inoculación en adición de peptona bacteriológica, extracto de levadura y cloruro de sodio). Para completar el sustrato se adicionaron 50 ml de agua desoxigenada y durante 27 días se mantuvo en la incubadora a 37°C. Para garantizar condiciones anaeróbicas controladas, se utilizó gas nitrógeno bombeado a un flujo de 3L/min y se realizaron mediciones semanales de ph.

2.11. Volumetría del biogás

La cuantificación fue mediante la técnica de captura de gas utilizando una columna con solución de NaOH (0.2M) como fase dispersa, conectada a otra columna de agua y ambas conectadas a una bomba al vacío para medir el

desplazamiento del agua de la última columna, por parte del biogás producido. Los gases ácidos reaccionan con la solución de NaOH, según la ecuación:

$$\text{CO}_2 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$$

Mediante una doble titulación se calculó el volumen de CO₂ presente en el biogás generado. La primera titulación de la solución de hidróxido de sodio de la primera columna se realizó con HCl (0.15M) como solución valorante y fenolftaleína como marcador y con una alícuota de 25mL de la solución. Según las ecuaciones: $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{HCl} \rightarrow \text{NaCl} + \text{NaHCO}_3$ y $\text{NaOH} + \text{HCl} \rightarrow \text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$

La segunda titulación se realizó con el indicador anaranjado de metilo, según la siguiente reacción: $\text{NaHCO}_3 + \text{HCl} \rightarrow \text{NaCl} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

El gas metano que no reacciona con la solución NaOH llega a la columna de agua y la desplaza, por su insolubilidad (moléculas no polares) y menor densidad respecto al agua (más ligero que el agua) por esta razón, las burbujas de metano que se forman tienden a subir, desplazando el agua y permitiendo registrar el volumen de metano generado (NEILSON, et al, 1987).

Las mediciones de control inicialmente fueron diarias y después inter diarias.

2.12. Análisis Estadístico

Se realizaron análisis estadísticos de varianza (ANOVA), unidireccional, seguido de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey, para examinar las diferencias entre tratamientos individuales y condiciones óptimas de los pretratamientos, para evaluar la significancia de la pre-inoculación en la producción de biogás (considerando un análisis por factor) y la significancia del pretratamiento para la producción de metano en las fermentaciones producidas. Las diferencias entre las variables se consideraron significativas con un nivel de confianza de $p < 0,05$.

3. RESULTADOS

- Sobre la Caracterización fisicoquímica: indicó existencia significativa de sustratos fermentables (Tabla N°1), con alto contenido orgánico (92%), adecuada cantidad de humedad (76%). Adecuado para fermentación en estado sólido (sólidos totales >15%). Bajo rango de cenizas (1.97%), que brindaría poca eficiencia en la fermentación. Presencia de celulosa y hemicelulosa como carbohidratos fermentables, un alto contenido de carbono y un bajo contenido de nitrógeno (<1%) Los valores caloríficos fueron casi tan grandes como los de los azúcares estándar, lo que proporciona más evidencia de relaciones C/N altas. Se encontró que el pH inicial era ácido (2.95).

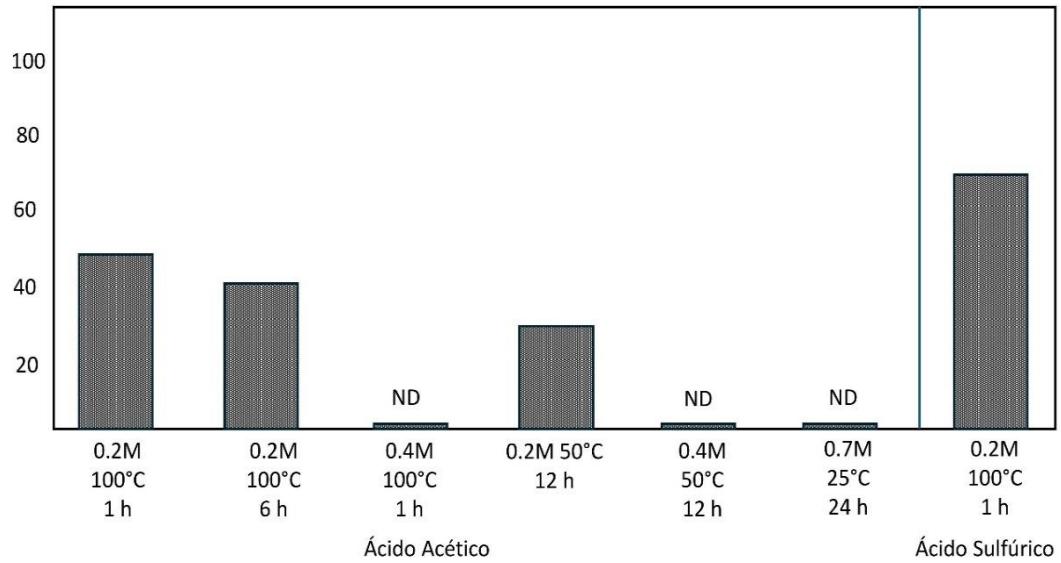
Tabla N°1: Análisis Composicional

| Análisis Aproximado | Residuos de Aguaymanto |
|---|------------------------|
| Sólidos Totales (%) | 23.74 ± 0.87 |
| Sólidos Volátiles (%) | 92.06 ± 0.42 |
| Ceniza (%) | 1.97 ± 0.10 |
| Carbono fijo (%) | 5.64 ± 0.21 |
| Carbohidratos Totales (mg g ⁻¹) | 573 ± 6.94 |
| Análisis Final | |
| Carbono Total (%) | 41.07 ± 0.30 |
| Nitrógeno Total (%) | 0.87 ± 0.10 |
| Hidrógeno Total (%) | 3.90 ± 0.10 |
| S Total (%) | ND |
| O Total (%) * | 47.91 ± 0.33 |
| C/N | 47.21 |
| Propiedades Físicas | |
| pH | 2.95 ± 0.01 |
| Valor Calorífico (MJ kg ⁻¹) | 14.99 ± 0.04 |

Nota: Se expresan como media± error estándar de resultados triplicados. ND: no determinado. * Por diferencia.

Tabla 1. Análisis composicional

- Sobre el Pretratamiento: El contenido de azúcares liberados en los hidrolizados varió según las diversas condiciones de pretratamiento. Entre todas las condiciones probadas con ác. acético, el pretratamiento con ác. acético 0.2 M a 100°C por 1h mostró mayor liberación de azúcares reductores solubles, produciendo 42.9 mg g⁻¹ de azúcares reductores.

Figura N°1: PRETRATAMIENTO - CONTENIDO TOTAL DE AZÚCARES REDUCTORES (mg g⁻¹)**Figura 1.** Pretratamiento – Contenido total de azúcares reductores (mg g⁻¹)

Al incrementar el tratamiento a 6h para ác. acético 0,2 M, el azúcar reductor en el hidrolizado disminuyó (2.4%) con respecto al tratamiento de 1h. Al incrementar el tiempo de tratamiento a 12h, incluso disminuyendo la temperatura a 50°C, continúo la disminución de azúcares reductores. El aumento de la concentración de ácido a 0.7M y el aumento del tiempo de tratamiento a 24h a baja temperatura dieron como resultado la eliminación completa del azúcar reductor soluble. También se observó que la alta temperatura fue perjudicial para el contenido de azúcar liberado, ya que los azúcares en los hidrolizados se deterioraron totalmente a 100°C en presencia de ác. acético al 0.4M en 1h de tratamiento. El aumento de la concentración de ác. acético de 0.4 a 0.7M influyó significativamente en el contenido de carbohidratos después de 24 h de pretratamiento, con temperatura de 25°C. Los cambios en el contenido de carbohidratos fueron proporcionales a la pérdida de azúcares reductores en todos los métodos de tratamiento y el tiempo de tratamiento afectó solo al azúcar reductor liberado y no al contenido de carbohidratos restante. Sin embargo, entre todos los tratamientos realizados, fue con el ác. sulfúrico 0.2 M, donde se dio la mayor liberación de azúcar reductor, azúcar no necesariamente fermentable, ($72,32 \pm 1,52$ mg g⁻¹)

dejando solo el 34 % de carbohidratos intactos en los residuos sólidos. La recuperación total de azúcar fermentable fue más del doble cuando se utilizó el tratamiento con ác. acético 0.2 M ($566 \text{ mg g}^{-1} \approx 97.6 \%$) en lugar del tratamiento con ác. sulfúrico (234 mg g^{-1}).

- *Sobre el Análisis de los efectos catalíticos de los agentes de pretratamiento:* Se observó que el tratamiento con ác. sulfúrico diluido fue de +0.59, el mayor índice obtenido lo que indica su fuerte efecto catalítico en la destrucción de la biomasa (valores cercanos a 1 o mayores indican alto efecto catalítico).
- *Sobre la eficiencia de la hidrólisis del ác. acético:* Se evaluó comparando la concentración de azúcar reductor liberado con el pretratamiento con ác. sulfúrico convencional en iguales condiciones. Con ác sulfúrico mostró una mayor liberación de azúcar reductor soluble ($72.32 \pm 1.52 \text{ mg g}^{-1}$).
- *Sobre el análisis FTIR:* El pretratamiento con ác. acético fue el más adecuado porque mostró que la mayoría de los grupos funcionales presentes en las muestras sin tratar se encontraron intactos posterior al pretratamiento, indicando una alteración menor de los grupos funcionales, mayor protección de las porciones fermentables de la biomasa y la mejora de su biodisponibilidad para la fermentación.

Figura N°2: Espectros FTIR

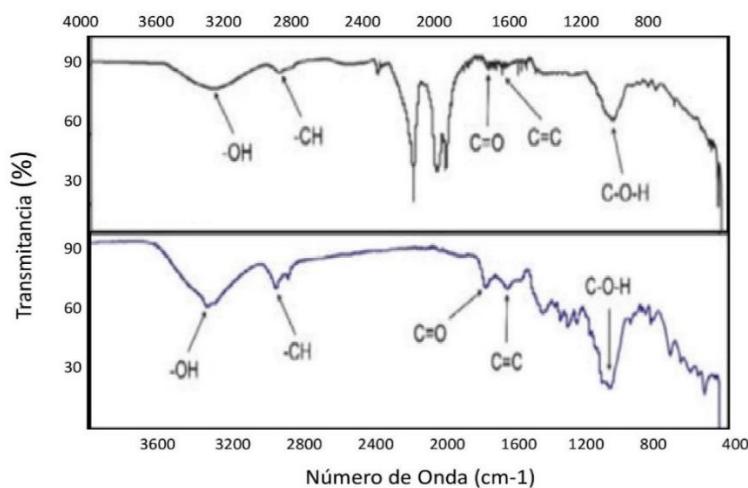
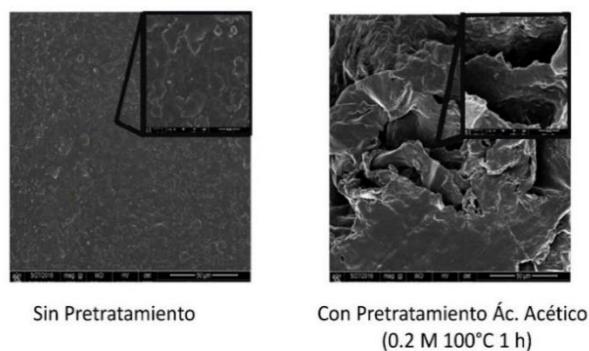


Figura 2. Espectros FTIR

- **Sobre la caracterización SEM:** En la comparación de las micrografías SEM de muestras tratadas y no tratadas se obtuvo que el pretratamiento con ác. acético alteró la integridad estructural y aumentó la rugosidad superficial. (Fig. N°3). Sin embargo, durante el pretratamiento con ác. sulfúrico diluido las alteraciones fueron mayores. La integridad estructural de la muestra se vio alterada a manera de formación de poros en la superficie, que evidenció la severidad del tratamiento y mostró que el realizado con ác. acético era suficiente para aumentar la biodisponibilidad con poca pérdida de azúcares fermentables.

Figura N°3: MICROGRAFÍAS ELECTRÓNICAS DE BARRIDO DE MUESTRAS DE BIOMASA



Nota: Las originales muestran una ampliación de 700 μm . Las superpuestas una ampliación de 5000 μm de regiones de 5 μm

Figura 3. Micrografías electrónicas de barrido de muestras de biomasa.

- **Sobre el tratamiento de Pre-inóculo en las fermentaciones:** Del análisis estadístico de los resultados en laboratorio, se obtuvo que la pre-inoculación fue significativa en la producción de biogás, con un Valor p de 0,024, con una definición de $\alpha= 0.05$, por lo cual se puede rechazar la hipótesis nula. Con lo que se obtiene que es un factor significativo el tiempo de pre-inoculación.
- **Sobre la Producción de metano producido en las fermentaciones:** Se observó una producción de biogás ligeramente mayor en los fermentadores con muestras con pretratamiento, respecto a aquellas sin pretratamiento de ácido acético. Mientras que, las menores producciones de biogás, en comparación al resto de las muestras, se han dado en los fermentadores con muestras sin pre-

inóculo. También, se comprueba que la máxima producción de biogás en los fermentadores se presenta durante los primeros días de la fermentación. Los valores obtenidos fueron: para los blancos entre 95-108 mL/g_{VS}, los de aguaymanto sin pre-inóculo fueron entre 140-144 mL/g_{VS} y los de aguaymanto con preinóculo estuvieron entre 143-147 mL/g_{VS}.

Figura No. 4: RESUMEN DEL VOLUMEN ACUMULADO DEL BIOGÁS PRODUCIDO

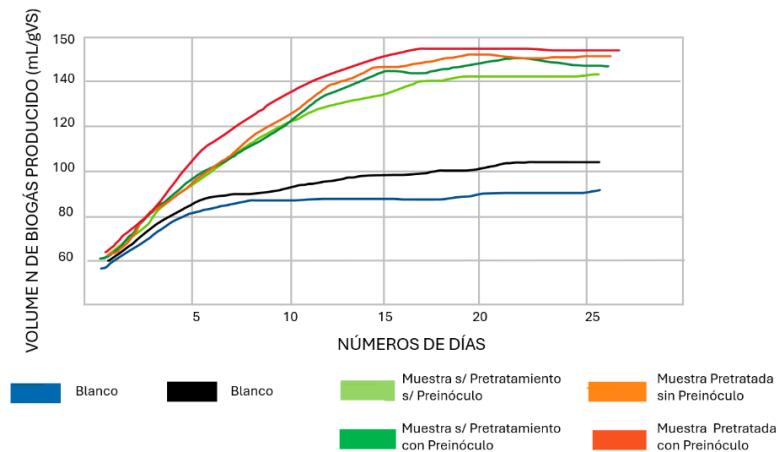


Figura 4. Resumen del volumen acumulado del biogás producido.

Del análisis estadístico se determinó que el pretratamiento es significativo en la producción de biogás, con un Valor - p obtenido de 0,0483. Posteriormente, la prueba HSD de Tukey corrobora el análisis de varianza y determina que las muestras pretratadas y sin pretratamientos son significativamente diferentes. Por tanto, es factible realizar el pretratamiento con ác. acético 0.2M por 1h.

- *Sobre la Concentración de CO₂ en el biogás producido:* Se obtuvieron mayores concentraciones de dióxido de carbono en los fermentadores con pretratamiento, con valores entre el 16 – 18%, respecto a los fermentadores sin pretratamiento donde se obtuvieron valores entre el 8 -12%.

Figura No. 5: Resumen de Producción CO₂ y de Metano en las Fermentaciones(%)

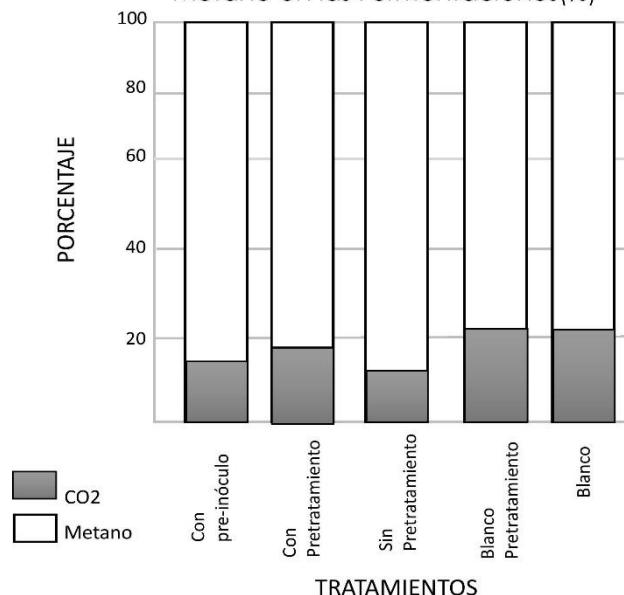


Figura 5. Resumen de producción CO₂ y de metano en las fermentaciones (%).

4. DISCUSIÓN

Los análisis mostraron que los residuos de la industrialización del aguaymanto poseen bajo contenido de nitrógeno para mantener estable el proceso de digestión anaerobia a largo plazo; el desarrollo de una codigestión, mezclando ese residuo pobre en nitrógeno con otro rico en él (como estiércol o lodos) para balancear la relación Carbono/Nitrógeno (C/N), podría optimizar la actividad microbiana, aumentando la producción de biogás y estabilizando el proceso para una operación continua y eficiente en la implementación del proceso. (Borowski et al., 2013).

Para obtener sustento sobre los cambios en las muestras mediante los pretratamientos se consideraron diferentes análisis. El análisis de los efectos catalíticos de los agentes de pretratamiento es un indicador importante que determina la degradabilidad de la biomasa lignocelulósica (CHUM, et al. 1990); en el estudio, determinó que el ac. sulfúrico tuvo un efecto fuerte, inadecuado, sobre la biomasa que no presenta un contenido de lignina alto, afectando negativamente a los azúcares fermentables. Mediante el análisis SEM se indicó

la eficacia del pretratamiento con ác. acético diluido para esta biomasa con contenido de lignina. El ác. acético permitió que se liberaran cantidades notorias de azúcares reductores en los hidrolizados debido a la alteración estructural y la pérdida de integridad de la biomasa. Esta alteración de la estructura celular con mayor porosidad mejora la vulnerabilidad de la biomasa permitiendo mejor accesibilidad microbiana para su fermentación. Las micrografías mostraron la adecuada y suficiente severidad del tratamiento con este ácido, que incrementó el área superficial promoviendo la adhesión microbiana, con menor pérdida de azúcares fermentables. (SAHA, et al., 2016)

A través del análisis FTIR se identificó la estructura molecular, donde los picos en la región de alta energía ($3500\text{--}3200\text{ cm}^{-1}$) mostraron la presencia de grupos hidroxilo (OH) provenientes de carbohidratos; los picos a $2920\text{--}2916\text{ cm}^{-1}$ mostraron enlaces simples (CH); los picos a $1735\text{--}1726\text{ cm}^{-1}$ presentaron grupos carbonilo aldehído (C=O). Las marcaciones 1605 , 1604 y 1599 cm^{-1} corresponden a lignina (C=C) y en la región $1412\text{--}1275\text{ cm}^{-1}$ se marcaron las cadenas alifáticas estructurales de los carbohidratos. La región de $1033\text{--}1011\text{ cm}^{-1}$ mostró monómeros de azúcar y compuestos fenólicos (C-O-H), en este rango los picos fueron los más anchos y fuertes indicando el predominio de los grupos C-O. El valor calorífico indicó la riqueza de carbohidratos proveniente de azúcares comunes post pretratamiento con ác. acético. (OROZCO, et al., 2014).

De los resultados obtenidos de los análisis, corroboramos que su composición previa y post pretratamiento con ác. acético (0.2M, 100°C 1h) definiría a la biomasa como un sustrato óptimo para la producción de biogás. (LI, et al., 2011).

El pretratamiento con ác. acético de concentración más diluida mostró resultados favorables en la producción del biogás para estos ensayos. Podría deberse a que implicó una degradación de la celulosa poco significativa durante el pretratamiento y permitió obtener resultados composicionales similares entre los residuos con pretratamiento y sin este. (SAHA, et al., 2016). Por tanto, en el caso de la producción de biogás mediante fermentación de

residuos industriales de aguaymanto, un pretratamiento de los residuos generaría mayor producción de biogás.

El pre-inóculo utilizado en las fermentaciones realizadas se mostró que fue favorable para la producción de metano, según los resultados de los volúmenes obtenidos frente a las fermentaciones no inoculadas. (SPANGHERO, et al. 2009).

La concentración de CO₂ en el biogás producido fue mayor y mejor en las fermentaciones de muestras pretratadas. Sin embargo, podría tenerse en consideración alguna alteración producida por el nitrógeno adicionado en las fermentaciones realizadas, porque durante las mediciones periódicas de ph habría surgido una ligera variación frente a los días en donde se medía solo la producción de biogás, pudiendo deberse a que el uso de nitrógeno que no reacciona con la solución alcalina NaOH permitiría que aumentara el desplazamiento del biogás producido que se mide en la segunda columna. (PAEZ, 2017). Cabe resaltar que se utilizó una columna lo suficientemente grande para el desplazamiento del gas producido y su dispersión en la solución alcalina y un sensor que permitió conocer la composición de CO₂ en el biogás y permitieron una mayor exactitud en los datos. (GARCÍA, et. al., 2016).

REFERENCIAS

- AMBIENTUM. (2015). Suelos y residuos. Mecanismos de la fermentación anaerobia.http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/suelos/mecanismos_fermentacion_anaerobia.asp
- AOAC. (2006). Official Methods of Analysis. Gaithersburg: AOAC International
- BOROWSKI, S. y WEATHERLEY, L. (2013). Co-digestion of solid poultry manure with municipal sewage sludge. *Bioresource Technol.*, 142(1), 345-352. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.05.047>.
- CHUM, H. L., JOHNSON, D. K. y BLACK, S. K. (1990) Organosolv pretreatment for enzymic hydrolysis of poplars. 2. Catalyst effects and the combined severity parameter. *Ind Eng Chem Res*, 29(1), 156–62. doi: <http://dx.doi.org/10.1021/ie00098a003>.
- GARCÍA, M. A. y GÓMEZ, J.D. (2016). Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos de Bogotá mediante digestión anaerobia. Recuperado de: <https://repository.uamerica.edu.co/items/46778e23-2085-48c8-a7ef-b8fc700c791b>
- HERNÁNDEZ, H. A. (2012). Diseño de un biodigestor instrumentado electrónicamente para la generación de biogás en casa habitación. Recuperado de: https://repositorio.unam.mx/contenidos/diseno-de-un-biodigestor-instrumentado-electronicamente-para-la-generacion-de-biogas-en-casa-habitacion-1?c=Ezg0Qn&d=false&q=*&i=2&v=1&t=search_0&as=0
- LEE, D., NAM, H., WON, M., LEE, V.H., TORMUNZIN, D., WANG, S. y YONG, P. (2022). Recent progress in the catalytic thermochemical conversion process of

biomass for biofuels. *Chemical Engineering Journal*, 447 (1), 137501. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137501>

LI Y. B., PARK S. Y ZHU, J. Y. (2011) Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 821–826. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.042>.

Mosier N., Wyman C., Dale B., Elander R., Lee Y. y Holtzapple M. (2005) Características de las tecnologías prometedoras para el pretratamiento de la biomasa lignocelulósica. *Bioresour Technol*, 96 (1), 673-686. doi: <10.1016/j.biortech.2004.06.025>

NEILSON, R. y THORNTON, R. (1987). *Organic Chemistry*. Boston: Pearson Education.

OROZCO, R. S., HERNANDEZ, P. B., MORALES, G. R., NUNEZ, F. U., VILLAFUERTE, J. O. y LUGO, V. L. (2014). Characterization of lignocellulosic fruit waste as an alternative feedstock for bioethanol production. *BioResources*, 9(1), 1873–1885.

PÁEZ, J.S. (2017). Análisis de la capacidad de fermentación de los residuos de uchuva para la obtención de biogás. Recuperado de: <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/25a3ed32-ba90-48d3-8866-746d075e8208>

PUENTE, L. A., PINTO, C. A., CASTRO, E. S. Y CORTÉS, M. (2011). *Physalis peruviana Linnaeus, the multiple properties of a highly functional fruit: A review*. *Food Research International*, 44(7), 1733-1740. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.09.034>.

SAHA, S., KURADE, M. B., EL-DALATONY M. M., CHATTERJEE, P. K., SUNG, D., y JEON, B. (2016). Improving bioavailability of fruit waste using organic acid: An

exploratory study of biomass pretreatment for fermentation. *Energy Conversion and Management*, 127 (1), 256–264. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.016>

SIERRA Y SELVA EXPORTADORA. (2020). Análisis de Mercado Aguaymanto 2015 - 2020. Lima: MINISTERIO DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO.

SPANGHERO, M., SALEM, A. Z. M. y ROBINSON, P.H. Chemical composition, including secondary metabolites, and rumen fermentability of seeds and pulp of Californian (USA) and Italian grape pomaces. *Animal Feed Science and Technology*. 152(1), 243–255. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2009.04.015>

YANG, B. y WYMAN, C. E. (2008) Pretreatment: the key to unlocking low-cost cellulosic ethanol. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2,26–40. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/bbb.49>.

ZAINUDIN, M. H. M., ZULKARNAIN, A., AZMI, A. S., MUNIANDY, S., S., SAKAI, K., SHIRAI, Y., y HASSAN, M. A. (2022). Enhancement of Agro-Industrial Waste Composting Process via the Microbial Inoculation: A Brief Review. *Agronomy*, 12(1), 198-250. doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy12010198>



Evaluación del efecto bioestimulante sobre plantas con extractos de microalgas obtenidos a partir de un proceso de economía circular

Alicia M^a González Céspedes¹, Alejandro Ayala Doñas¹, José Andrés Alcoser Bonifaz¹, Joaquín Pozo Dengra² y Cristina Carreño Amate²

Autor de Correspondencia: aliciagonzalez@fundacioncajamar.com

Resumen

En este trabajo se evaluó el efecto bioestimulante de siete extractos de microalgas aplicados en plantas de pepino a nivel de maceta pequeña. Los ensayos se realizaron en la Estación Experimental Cajamar "Las Palmerillas" con aplicaciones a nivel radicular de los diferentes extractos de microalgas proporcionados por la empresa Biorizon Biotech y dentro de las actividades del proyecto Alceres. Las microalgas se han perfilado como una alternativa sostenible a los agroquímicos tradicionales, contienen nutrientes esenciales y fitohormonas que promueven el crecimiento vegetal y mejoran la fertilidad del suelo. Los extractos se obtuvieron a partir de 3 cepas de microalgas mediante métodos mecánicos-enzimáticos y solventes biocompatibles. Los resultados mostraron que los extractos correspondientes a los tratamientos ALC1 y ALC3 aplicados en la zona radicular en plantas de pepino, tuvieron un efecto significativo en el crecimiento y desarrollo de las plantas, destacando por un mayor incremento en altura (21,7 y 22,5 cm), numero de hojas (5,4 y 5,3 hojas) y contenido de clorofila (SPAD) (22 ddt, ALC1 42,9 μ moles m^{-2} y ALC3 37,6 μ moles m^{-2}), en comparación con el control y el resto de los tratamientos. La materia seca vegetativa, área foliar y materia seca de raíces también fue significativamente mayor en estos tratamientos (ALC1 y ALC3), con valores superiores al resto de tratamientos.

Palabras clave: microalgas, bioestimulantes, extractos, sostenibilidad, cultivos.

Evaluation of the biostimulant effect on plants with microalgae extracts obtained from a circular economy process

Alicia M^a González Céspedes^{1,3}; Alejandro Ayala Doñas¹; Jose Andrés Alcoser Bonifaz¹; Joaquín Pozo Dengra²; Cristina Carreño Amate²

Abstract

This study evaluated the biostimulant effect of seven microalgae extracts applied to cucumber plants in small pots. The trials were conducted at the Cajamar "Las Palmerillas" Experimental Station, with root applications of different microalgae extracts provided by

¹ Estación Experimental Cajamar Las Palmerillas. Fundación Grupo Cajamar.

² Biorizon Biotech, S.L.

Biorizon Biotech as part of the Alceres project. Microalgae have emerged as a sustainable alternative to traditional agrochemicals. They contain essential nutrients and phytohormones that promote plant growth and improve soil fertility. The extracts were obtained from three microalgae strains using mechanical-enzymatic methods and biocompatible solvents. The results showed that the

extracts corresponding to the ALC1 and ALC3 treatments applied to the root zone of cucumber plants had a significant effect on plant growth and development, highlighting a greater increase in height (21.7 and 22.5 cm), number of leaves (5.4 and 5.3 leaves) and chlorophyll content (SPAD) (22 DDT, ALC1 42.9 μ moles m⁻² and ALC3 37.6 μ moles m⁻²), compared to the control and the rest of the treatments. Vegetative dry matter, leaf area and root dry matter were also significantly higher in these treatments (ALC1 and ALC3), with higher values than the rest of the treatments.

Key Words: microalgae, biostimulants, extracts, sustainability, crops.

1. INTRODUCCIÓN

El continuo crecimiento demográfico y el consiguiente aumento de la demanda de alimentos han generado una presión significativa para obtener mejores rendimientos en las producciones agrícolas (Organization, 2009). La implementación de prácticas agrícolas intensivas y la dependencia de agroquímicos pueden generar una variedad de problemas ambientales y agrícolas (Reyes, 2017). Estos problemas incluyen la degradación edáfica, es decir, la pérdida de calidad del suelo debido a procesos como la erosión y la salinización del agua y suelo; y pérdida de biodiversidad edáfica, lo que afecta negativamente a la salud y fertilidad del suelo (Tadesse et al., 2024).

Hoy en día, el uso de bioestimulantes constituye una de las soluciones ante los factores bióticos y abióticos que causan pérdidas y bajo rendimiento en los diferentes cultivos. Los bioestimulantes son productos biológicos, sin residuos y seguros que actúan sobre la fisiología de la planta de diferentes formas, mejorando el vigor, el rendimiento de los cultivos y calidad de los frutos (Chiaiese et al., 2018).

El uso de microalgas, como biofertilizante y/o bioestimulante se ha convertido en una alternativa prometedora que puede sustituir a los productos químicos

tradicionales (García-Gonzalez y Sommerfeld 2016; Díaz et al., 2024). Las microalgas contienen altos niveles de micronutrientes y macronutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas (Shaaban 2001). Las microalgas son organismos unicelulares eucariotas fotosintéticos, que pueden crecer de modo autotrófico o heterotrófico, esta nos brinda una agricultura productiva, eficiente y sostenible económica, social y medioambientalmente (Renuka et al., 2018). Este producto en pequeñas cantidades optimiza los procesos fisiológicos de las plantas, obteniendo una mejor nutrición, tolerancia al estrés, rendimiento o calidad de los cultivos sin causar daños al medio ambiente, tienen la capacidad de proporcionar nutrientes esenciales y producir fitohormonas que promueven el crecimiento de las plantas. Es así, como las microalgas pueden mejorar la fertilidad del suelo de forma natural y sostenible, reduciendo la necesidad de insumos químicos (Álvarez A et al., 2021).

Desde hace décadas las microalgas se han considerado agentes beneficiosos desde un punto de visto agronómico por contribuir a la mejora del carácter fértil del suelo, y con ello al mayor rendimiento de los cultivos (Singh et al., 2016). De entre los beneficios que aportan, destacan el aumento de la porosidad del suelo, el control del pH, el incremento en la disponibilidad de nutrientes o el aporte de nitrógeno, en el caso de aquellas microalgas capaces de fijar nitrógeno. Además del importante papel que juegan en los ciclos del C y N, se conocen diferentes géneros de microalgas que acumulan y excretan fitohormonas (Lu y Xy, 2015; Singh et al., 2016; Meena et al., 2017), además de vitaminas (especialmente la vitamina B12) y aminoácidos (Singh et al., 2016). Se sabe que la producción de algunas de estas fitohormonas puede implicar de forma indirecta la activación de los mecanismos de resistencia vegetal (Meena et al., 2017). También se ha sugerido que las microalgas pueden mejorar la biodisponibilidad del fósforo en las plantas, al solubilizar y movilizar los fosfatos orgánicos insolubles presentes en el suelo, con la ayuda de enzimas fosfatasa.

Actualmente, el uso de las microalgas como agentes promotores del crecimiento vegetal en cultivos como el arroz, trigo, algodón, legumbres y hortícolas, se considera una alternativa al uso de fertilizantes químicos y plaguicidas, los cuales son mucho más perjudiciales desde el punto de vista ambiental y sanitario (Prasanna et al., 2015).

La integración de microalgas en los sistemas agrícolas no sólo puede mitigar los efectos negativos del uso intensivo de agroquímicos, sino que también puede contribuir a prácticas agrícolas más sostenibles y ambientalmente responsables.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de 7 extractos de microalgas en plantas de pepino a nivel de plántula, obtenidos a partir biomasa de tres cepas de microalgas producidas mediante fuentes de nutrientes residuales y utilizando medios de extracción y preparación de los extractos diferentes.

2.- MATERIAL Y MÉTODOS

2.1.-Localización

El ensayo se realizó en la Estación Experimental Cajamar “Las Palmerillas”, localizada en el término Municipal de El Ejido (Almería), en condiciones de plántula y en maceta, con aplicaciones en la zona radicular. Se utilizó como sustrato de las plantas una mezcla de turba rubia con perlita.

Para realizar este ensayo se dispuso de un invernadero multitúnel dedicado a semillero, con bancadas de 1,2 m de altura donde se colocaron las bandejas con las pequeñas macetas de plantas. El riego fue por aspersión y ventilación mecánica. Las condiciones climáticas fueron las normales para la estación correspondiente sin que se modificará, para asemejarlo a las condiciones reales de producción.

2.2.- PREPARADO DE LOS EXTRACTOS

Durante el desarrollo del proyecto Alceres en etapas anteriores se seleccionaron tres cepas de microalgas, de entre una colección de cepas previamente

aisladas, en base a su capacidad bioestimulante y capacidad de crecimiento en medio de nutrientes formulado a partir de nitrógeno (N) y fósforo (P) residual, proveniente de purines y lixiviados vegetales. Las microalgas proceden de cultivos frescos en condiciones de laboratorio. Estas microalgas fueron suministradas de dos colecciones de cultivo reconocidas: Mosonmagyaróvár Algal culture collection (MACC) y Spanish Bank of Algae (SBA) (Proyecto SABANA). Las especies microalgas seleccionadas fueron *Scenedesmus* sp. y *Chlorella* sp.

Para obtener los extractos se utilizaron diferentes métodos de rotura y extracción. Las técnicas convencionales incluyen el uso de disolventes orgánicos, mientras que los nuevos métodos de extracción en cambio apuestan por la obtención de extractos sin disolventes, en un entorno más seguro tanto para las plantas como para los seres humanos (Michalak et al., 2015).

Un factor importante a tener en cuenta a la hora de seleccionar un método de extracción adecuado es la resistencia a la rotura de la pared celular cuya composición varía mucho entre especies, formas y tamaño celular.

Para esta etapa del proceso y para obtener los extractos se utilizaron varios métodos de naturaleza física, térmica o enzimática para romper la pared celular y poder extraer los compuestos de interés bioestimulante.

Los métodos de extracción que se llevaron a cabo fueron:

1.- Rotura celular e hidrolisis con enzimas proteolíticas, liberando el contenido celular, hasta producir aminoácidos libres. (Patente Biorizon Biotech, 13/12/2018, C05F5/00-C05F3/00).

2.- Rotura de la biomasa mediante métodos mecánicos suaves (sonificación Branson Sonicator 150) y extracción usando solventes biocompatibles como agua, etanol y/o hexano de los extractos sonicados (metodología Proyecto Algae4control).

Se obtuvieron 7 extractos diferentes 4 procedentes de rotura de las células mediante enzimas (ALC1, ALC2, ALC3 y ALC4), y el resto mediante rotura mecánica suave y extracción con solventes como etanol, agua y hexano (ALC5, ALC6 y ALC7). ALC1 y ALC2 proceden de la microalga *Chlorella* sp., obteniendo una vez filtrada la biomasa procesada un extracto filtrado y un extracto residual, lo mismo se hizo con la microalga *Scenedesmus* sp., obteniendo los extractos ALC3 (biomasa residual) y ALC4 (extracto filtrado). ALC5, ALC6 y ALC7 proceden de cultivos vivos de *Scenedesmus* sp., obteniendo 3 extractos diferentes. En la tabla se puede observar para cada extracto el tipo de microalga, biomasa utilizada, método de extracción y concentración del extracto.

| Extracto | Microalga | Tipo biomasa | Método de procesado | Concentración mg L ⁻¹ |
|----------|------------------------|---------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| ALC1 | <i>Chlorella</i> sp. | Extracto biomasa residual | Hidrólisis enzimática | 1 |
| ALC2 | <i>Chlorella</i> sp. | Extracto | Hidrólisis enzimática | 1 |
| ALC3 | <i>Scenedesmus</i> sp. | Extracto biomasa residual | Hidrólisis enzimática | 1 |
| ALC4 | <i>Scenedesmus</i> sp. | Extracto | Hidrólisis enzimática | 1 |
| ALC5 | <i>Scenedesmus</i> sp. | Cultivo vivo | Sonicados/Solventes | 1 |
| ALC6 | <i>Scenedesmus</i> sp. | Cultivo vivo | Sonicados/Solventes | 0,5 |
| ALC7 | <i>Scenedesmus</i> sp. | Cultivo vivo | Sonicados/Solventes | 0,5 |

Tabla 1.- Tipo de microalga, biomasa, método de procesado y concentración en cada uno de los extractos obtenidos.

2.3.- ENSAYOS Y TRATAMIENTOS

El ensayo se realizó en condiciones de plantas en minimacetas y en un invernadero tipo semillero. Los extractos se aplicaron en la zona radicular de cada una de las plantas, previamente cada extracto se diluyó en agua y posteriormente se aplicaba en cada planta. Se realizaron dos aplicaciones, la primera tras el trasplante de las plantas en las minimacetas y la segunda aplicación transcurridos 7 días desde la primera aplicación. Las dosis de cada extracto se pueden observar en la tabla 1.

El número de tratamientos fueron 8, un tratamiento control sin ninguna aplicación de ningún extracto y 7 tratamientos, cada uno con un extracto diferente de microalgas, con una concentración de 1mg por cada 1ml para los extractos ALC1; ALC2; ALC3; ALC4 y ALC5, mientras que la concentración de los extractos ALC6 y ALC7 fue de 0,5 mg por cada 1 ml. Cada planta recibió 10 mg en total de cada extracto en dos aplicaciones. En la tabla 2 se puede ver la nomenclatura de cada tratamiento y la dosis aplicada según la concentración de cada extracto para aplicar la misma cantidad de microalga.

| Tratamiento | Extracto | Dosis radicular ml planta ⁻¹ | Dosis extracto mg planta ⁻¹ |
|-------------|----------|--|---|
| T1 | Control | - | - |
| T2 | ALC1 | 5 | 5 |
| T3 | ALC2 | 5 | 5 |
| T4 | ALC3 | 5 | 5 |
| T5 | ALC4 | 5 | 5 |
| T6 | ALC5 | 5 | 5 |
| T7 | ALC6 | 10 | 5 |
| T8 | ALC7 | 10 | 5 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.- Tratamientos evaluados para cada extracto de microalga, así como la dosis utilizada según aplicación radicular.

2.3.1.- Descripción del ensayo

Se utilizó plantas de pepino tipo Almería, variedad Marketmore de Biosemillas, las plantas una vez que tuvieron la primera hoja verdadera se trasplantaron (con 20 a 25 días después de la siembra) a unas minimacetas de volumen de 200 ml, con un sustrato mezcla de turba y perlita (3:1, v/v), el trasplante se realizó el 29 de abril de 2024. Se empezó a controlar el crecimiento de las plantas. Transcurridos 7 días desde el trasplante se procedió a hacer la primera aplicación de cada extracto, previamente diluido un 20% en agua y aplicando esta disolución en cada planta en la zona radicular. La segunda aplicación se realizó 7 días después de la primera aplicación. El ensayo se mantuvo 29 días haciendo medidas de crecimiento semanalmente.

Se utilizaron 15 plantas por tratamiento.

Solo se aportó agua sin ningún tipo de fertilizante por vía riego.



Fotografía 1. Disposición de las plantas de pepino en el ensayo realizados con los diferentes extractos bioestimulantes de microalgas. Fuente: Elaboración propia.

2.4.- DETERMINACIONES

2.4.1.- Crecimiento de la parte aérea

Desde el trasplante de las plantas se procedió a medir semanalmente la altura de la planta, número hojas y flores (en caso de que aparecieran), hasta la finalización de cada ensayo, además, se analizó el estado de la planta. También, se realizaron medidas de clorofila (SPAD) mediante un equipo portátil (SPAD-502 Plus 2900P) mostrando los valores directamente en $\mu\text{moles m}^{-2}$. Las medidas se realizaron en las hojas desarrolladas de la parte activa de crecimiento, esta medida se realizó en tres ocasiones a lo largo del desarrollo de las plantas.

2.4.2.- Desarrollo final de las plantas

Al final del ciclo se realizó la biomasa final destructiva de todas las plántulas, donde se midió altura de planta, diámetro del tallo, área foliar, peso fresco y seco de plantas, peso fresco y seco de raíces y estado de las raíces. La determinación del área foliar se midió con un planímetro electrónico (Delta-T Devices LTD, Cambridge, Reino Unido).

Para determinar el peso seco de cada parte de la planta se separó los tallos, hojas y raíces, pesando cada parte individualmente y secándose en una estufa de ventilación forzada a 65 °C hasta alcanzar un peso constante.

2.4.3.- Tratamiento de los datos

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA; $p < 0,05$) para todas las variables definidas en el ensayo. Se utilizó la prueba MDS (Diferencia Menos Significativa) de Fisher para comparar los valores medios de los diferentes tratamientos y determinar si había diferencias significativas entre ellos.

Los resultados del análisis estadístico se presentaron en forma de figuras con barras de error que representan la desviación estándar, y las letras indican los grupos homogéneos. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo utilizando Statgraphics Centurion XIX versión 19.4.01 (Stat-Point, Inc.).

En este ensayo no hubo perdidas de plantas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.- Crecimiento vegetativo a lo largo del ensayo

A lo largo del ensayo se puede observar que tras la primera aplicación de los extractos de microalgas hubo dos tratamientos que mostraron un efecto muy significativo en el desarrollo de las plantas de pepino con respecto al resto de tratamientos (Figura 1), mostrando diferencias significativas en las dos últimas fechas evaluadas (22 ddt y 29 ddt).

El crecimiento de las plantas medido como incremento de altura y número de hojas fue mayor significativamente, con respecto al resto de tratamientos, en los tratamientos ALC3 y ALC1, alcanzando un incremento de altura de 22,5 cm y 21,7 cm, respectivamente, con un número de hojas de 5,3 y 5,4 hojas por planta para los mismos tratamientos (ALC3 y ALC1). Las plantas que menos crecieron fueron las del tratamiento ALC2 con un incremento de altura de 11,9 cm y 3,8 hojas por plantas, siendo estos valores muy similares a los tratamientos Control, ALC4, ALC6 y ALC7 (Figura 1). Las plantas del tratamiento ALC5 (15,3 cm) tuvieron un crecimiento algo mayor al tratamiento control, ALC4, ALC6 y ALC7, sin que se encontraran diferencias significativas.

En la figura 1 podemos observar los valores promedio de la clorofila medido como SPAD en μ moles m^{-2} en las hojas desarrolladas de la parte superior de la planta (hojas más jóvenes), donde se observó que en las fechas 22 ddt y 29 ddt se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, cuando se aplicaron los diferentes extractos.

En la fecha 22 ddt el valor de clorofila fue mayor significativamente en el tratamiento ALC1 ($42,9 \mu$ moles m^{-2}) respecto al resto de tratamientos, seguido del valor del tratamiento ALC3 ($37,6 \mu$ moles m^{-2}) que a su vez fue significativamente mayor al tratamiento ALC5 ($33,2 \mu$ moles m^{-2}). Estos valores coinciden con el mayor crecimiento de las plantas de estos tratamientos.

Los valores de clorofila fueron significativamente menores en los tratamientos Control ($27,9 \mu$ moles m^{-2}), ALC2 ($25,3 \mu$ moles m^{-2}), ALC4 ($27,2 \mu$ moles m^{-2}), ALC6 ($28,3 \mu$ moles m^{-2}) y ALC7 ($28,9 \mu$ moles m^{-2}) con respecto a los tratamientos ALC1 y ALC3 ($42,9 \mu$ moles m^{-2} y $37,6 \mu$ moles m^{-2} , respectivamente).

Al finalizar el ensayo (29 ddt) el valor significativamente mayor respecto al resto de tratamientos correspondió al tratamiento ALC1 ($43,1 \mu$ moles m^{-2}) con valor similar en la fecha 22 ddt, determinando que la aplicación del extracto ALC1 tuvo un efecto muy positivo en la bioestimulación de las plantas de pepino con mayor actividad fotosintética de las plantas, lo que determinó un mayor desarrollo vegetativo. El segundo tratamiento con mayor valor de clorofila fue en tratamiento ALC3 ($35,3 \mu$ moles m^{-2}), seguido de los tratamientos ALC6 ($30,7 \mu$ moles m^{-2}) y ALC5 ($28,8 \mu$ moles m^{-2}) encontrando diferencias significativas. Los valores más bajos significativamente en clorofila en la fecha 29 ddt, fueron en los tratamientos control, ALC2, ALC4 y ALC7 (Figura1).

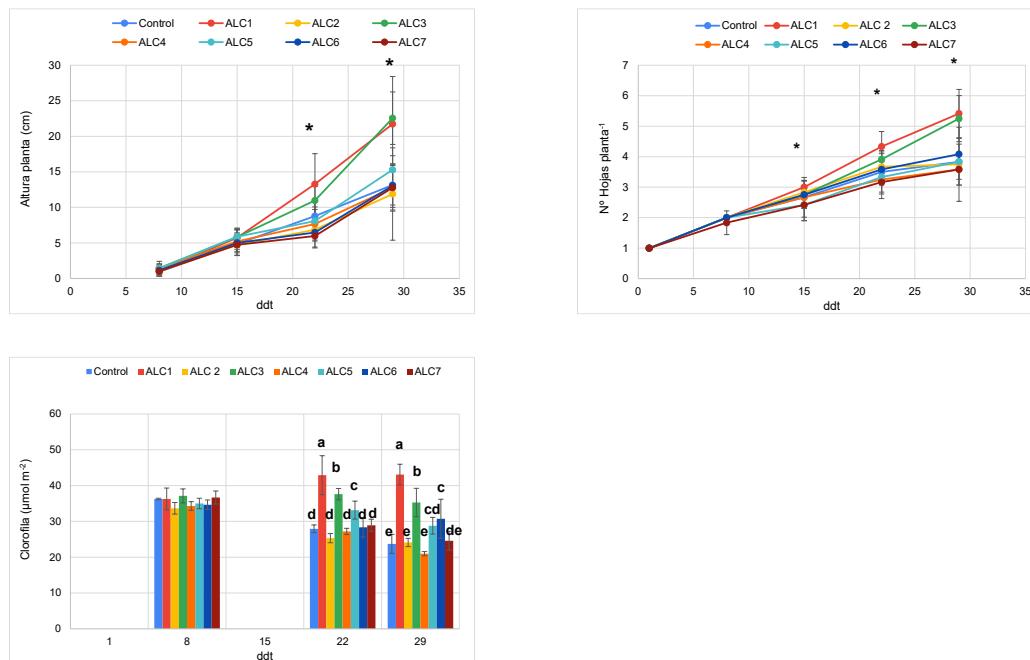


Figura 1.- Evolución de la altura, número de hojas y medida de clorofila de las plantas de pepino para cada uno de los extractos de microalgas evaluados aplicados en la zona radicular.

* Nos indica diferencias estadísticamente significativas (MDS 95%). Las letras diferentes (a, b, c, d) indican grupos de homogeneidad estadísticamente significativos (MDS 95%) según la prueba de diferencia de medias

Fuente: Elaboración propia.

3.2.- Crecimiento vegetativo y radicular final.

Se observó que la materia seca de la parte vegetativa de las plantas de pepino fue mayor significativamente en los extractos ALC3 y ALC1 respecto a los demás tratamientos, incluido el tratamiento control (Tabla 3). El tratamiento ALC2 mostró un valor intermedio (1,2 g planta⁻¹), mientras que el tratamiento ALC4 registró el valor más bajo (0,94 g planta⁻¹). El resto de los tratamientos tuvieron valores similares sin diferencias notables entre ellos. En cuanto al área foliar, que mide el área de las hojas, los tratamientos ALC1 y ALC3 mostraron los valores más altos, seguidos por ALC2, todos con diferencias significativas en comparación al control (T-1). Los tratamientos ALC7 y ALC4 (80 y 98,6 cm² respectivamente) fueron los que presentaron menor área foliar, siendo significativamente menores al resto de tratamientos.

Respecto al diámetro de tallo, que revela la cantidad de tejido vascular, el tratamiento ALC1 obtuvo el mayor valor, con diferencias significativas frente al

resto de los tratamientos. Los demás tratamientos no mostraron diferencias significativas comparados con el control (T-1). Finalmente, la materia seca de raíces, que evalúa la capacidad de absorción de nutrientes de la planta, crucial para su crecimiento, mostró que los tratamientos ALC1 y ALC3 destacaron con los rendimientos más altos, presentando diferencias significativas respecto al resto de tratamientos. Los tratamientos ALC2, ALC4, ALC5 y ALC6 mantuvieron valores similares al control, mientras que ALC7 tuvo el menor peso de raíces secas, indicando una menor eficiencia en la absorción de nutrientes y un potencial retraso en el crecimiento del cultivo.

| Tratamientos | Materia seca vegetativa | Área foliar | Diámetro tallo | Materia seca raíces |
|----------------|----------------------------|-----------------|----------------|------------------------|
| | g planta ⁻¹ | cm ² | mm | g planta ⁻¹ |
| Control | 1,08 ± 0,19 c | 79,7 ± 19,2 d | 5,43 ± 0,34 b | 0,14 ± 0,04 b |
| ALC1 | 1,57 ± 0,43 a | 324,8 ± 79,2 a | 6,36 ± 0,59 a | 0,24 ± 0,08 a |
| ALC2 | 1,2 ± 0,41 b | 122,3 ± 47,6 b | 5,09 ± 1,68 b | 0,15 ± 0,04 b |
| ALC3 | 1,64 ± 0,19 a | 241,4 ± 38,6 a | 5,63 ± 0,43 b | 0,21 ± 0,01 a |
| ALC4 | 0,94 ± 0,17 c | 98,6 ± 36,4 dc | 5,30 ± 0,26 b | 0,12 ± 0,03 b |
| ALC5 | 1,04 ± 0,07 c | 114,9 ± 22,1 bc | 5,53 ± 0,34 b | 0,11 ± 0,02 b |
| ALC6 | 1,05 ± 0,15 c | 125,1 ± 14,8 bc | 5,65 ± 0,72 b | 0,12 ± 0,03 b |
| ALC7 | 1,02 ± 0,15 c | 80,1 ± 25,4 d | 5,29 ± 0,33 b | 0,05 ± 0,03 c |

Las letras diferentes (a, b, c, d) indican grupos de homogeneidad estadísticamente significativos (MDS 95%) según la prueba de diferencia de medias. Los tratamientos que comparten la misma letra no difieren significativamente entre sí, mientras que aquellos con letras distintas sí presentan diferencias estadísticamente significativas.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.- Valores de materia seca aérea, área foliar, calibre de tallo y materia seca de raíces para los diferentes tratamientos de extractos de microalgas evaluadas en plantas de pepino.



Fotografía 2. Crecimiento de las plantas de pepino para cada tratamiento de extracto bioestimulante de microalgas y control. Fuente: Elaboración propia.

El mayor desarrollo de las plantas de pepino en los tratamientos ALC1 y ALC3 respecto al resto de tratamientos quizás pudo deberse al mayor efecto bioestimulante de estos extractos respecto al resto de extractos, influyendo el modo en que se preparan y obtienen los extractos de microalgas y como los extractos de determinadas microalgas pueden promover el crecimiento de las plantas (Alvarez et al., 2021).

Utilizando soluciones acuosas e hidrolizados de la biomasa de *Chlorella* sp. y *C. vulgaris* como biofertilizante y/o promotor del crecimiento se ha promovido la germinación de semillas de cultivos como melón, tomate, pepino y maíz (Corona, 2020).

Para obtener un producto más efectivo es necesario romper la pared celular para liberar todos los componentes intracelulares, lo que se lleva a cabo fácilmente mediante hidrólisis enzimática, un proceso de bajo coste y fácilmente escalable (Romero García et al. 2012). En este sentido, se han realizado varios estudios para evaluar el efecto de los fertilizantes de microalgas en diferentes cultivos.

Las microalgas juegan un papel importante en el aporte de fitohormonas que promueven el crecimiento de las plantas. Las citoquininas están involucradas en la activación de las funciones de división celular, organogénesis y senescencia tardía de las plantas, mientras que el ácido salicílico está directamente relacionado con la activación de la respuesta defensiva de las plantas (Toribio, 2021).

En estudios anteriores realizados por Toribio (2021), con dos extractos de microalgas (*Anabaena* y *Nostoc*), obtenidos mediante métodos sonicados y aplicados en la zona radicular obtuvieron incrementos de crecimiento en las plantas en las dos dosis empleadas, incrementándose tanto el desarrollo de la parte aérea como el radicular en plantas de pepino. Sin embargo, el extracto

de *Nostoc* incrementó en mayor medida el crecimiento radicular (más del 60% de incremento de crecimiento radicular), pero donde mejores resultados obtuvieron fue en la longitud del tallo, producción de hojas, peso fresco de planta y diámetro de tallo. Otros estudios determinaron un mayor crecimiento de la raíz y el brote de semillas de *Solanum lycopersicum* y *Cucumis sativus*, siendo las concentraciones más efectivas 0,17 y 0,25 gL⁻¹ de suspensión algal, respectivamente (Bumandalai y Tserennadmid, 2019). Mientras que otros extractos de otras cepas de microalgas el efecto fue más discreto, se detectó tras la aplicación mejoras en el desarrollo vegetativo, pero no el radicular. Establecieron que la producción de fitohormonas de los extractos analizados estaba más relacionada con el crecimiento de las plantas (medido como peso de planta), mientras que la producción de citoquininas y ácido salicílico se relacionó positivamente con el índice de germinación y el desarrollo radicular.

Solo unos pocos estudios han caracterizado los constituyentes químicos responsables de la promoción del crecimiento vegetal. En las etapas iniciales de germinación y elongación de la raíz es fundamental establecer el equilibrio entre salicílico y citoquininas, mientras que, en las últimas etapas de plántula, la presencia de agentes quelantes tipo sideróforo es determinante para el óptimo desarrollo de la planta (Toribio, 2021).

Hay estudios donde la aplicación de biomasa de microalgas en el suelo mejoró el peso fresco y seco de las plántulas, así como su contenido de pigmentos (Faheed et al., 2008).

Las hormonas promotoras de raíces, como las auxinas, citoquininas y el ácido giberélico, han demostrado un impacto positivo significativo en el crecimiento de plantas y el desarrollo de cultivos.

4. CONCLUSIONES

1. Los extractos de microalgas aplicados en la zona radicular en los tratamientos ALC1 y ALC3, tuvieron un notable efecto bioestimulante en las plántulas de pepino, mejorando significativamente su crecimiento tanto de la parte vegetativa como radicular de las plantas en comparación con el control y el resto de los tratamientos. Hubo diferencias significativas entre tratamientos en todas las fechas muestreadas excepto en el inicio, con mayores valores en los tratamientos ALC1 y ALC3, en altura de planta, nº hojas por planta, materia seca vegetativa, área foliar y materia seca de raíces.
2. El método de preparación y obtención de los extractos de microalgas es crucial para maximizar su efectividad bioestimulante. Los extractos obtenidos mediante procesos enzimáticos resultaron ser los más eficaces (ALC1 y ALC3).
3. Los mejores resultados de los extractos procedentes de una hidrolisis enzimática y aplicados por vía radicular se puede deber a que el método de rotura de las células de las microalgas fue más eficiente, ya que estos extractos contienen toda la biomasa de microalgas, mientras que resto de extractos en los cuales se utilizaron otros medios de rotura y se utilizaron disolvente para recuperar los componentes nutricionales de las microalgas, descartando el resto de la biomasa.
4. Los efectos de los bioestimulantes dependen en gran medida del cultivo al que se aplican, las dosis empleadas y los métodos utilizados para su extracción.
5. Las microalgas pueden representar una alternativa sostenible y ecológica a los fertilizantes y agroquímicos convencionales ya que ofrecen nutrientes esenciales y compuestos bioactivos que promueven el desarrollo vegetal, para ello es fundamental determinar los modos de producción de las microalgas y obtención de los biocompuestos que contienen.

REFERENCIAS

- Álvarez, A., Weyers, S., Goemann, H., Peyton, B., Gardner, R. (2021). Investigación sobre algas. Obtenido de Microalgas, suelo y plantas: una revisión crítica de las microalgas como recursos renovables para la agricultura: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102200>
- BUMANDALAI, O., R. TSERENNADMID. (2019). Effect of Chlorella vulgaris as a biofertilizer on germination of tomato and cucumber seeds. International Journal of Aquatic Biology, 7(2), pp. 95-99. ISSN: 2322-5270
- Chiaiese, P., Corrado, G., Colla, G., Kyriacou, K., Rouphael, Y. (2018). Renewable Sources of Plant Biostimulation: Microalgae as a Sustainable Means to Improve Crop Performance. Recuperado de doi: 10.3389/fpls.2018.01782
- CORONA, Z.C. (2020). Conferencia de apertura. I Taller Soberanía Alimentaria con más Ciencia, Teatro Heredia, Santiago de Cuba, 25 de Septiembre.
- Díaz-pérez, m., Moreno, J.M., Hernández, J.J., Callejón-ferre, A.J. (2024). Application of microalgae in cauliflower fertilisation. Obtenido de Scientia Horticulturae: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113468>
- Faheed, F.A.; Fattah, Z.A. Effect of Chlorella vulgaris as Biofertiliser on Growth Parameters and Metabolic Aspects of Lettuce. (2008). Plant. J. Agric. Soc. Sci, 4, 165–169.
- Garcia-Gonzalez ,J., Sommerfeld, M. (2016) Biofertilizer and biostimulant properties of the microalga *Acutodesmus dimorphus*. J Appl Phycol 28:1051–1061. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0625-2>
- Lu, Y. y Xu, J. (2015). Phytohormones in microalgae: A new opportunity for microalgal biotechnology. Trends in Plant Science 20(5), 273-282. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.01.006>

Meena, M., Swapnil, P., Zehra, A., Aamir, M., Dubey, M.K., Goutam, J. y Upadhyay, R.S. (2017). Beneficial microbes for disease suppression and plant growth promotion. En D.P. Singh, H.B. Singh y R. Prabha (eds.). *Plant-Microbe Interactions in Agro-Ecological Perspectives*. Springer Nature, Singapore, 395- 432.

Michalak, I., Chojnacka, K. (2015). Algae as production systems of bioactive compounds. *Engineering in Life Sciences*, 15(2), 160-176. <https://doi.org/10.1002/ELSC.201400191>.

Organization, F. A. (2009). FAO's Director-General on How to Feed the World in 2050. *Population and Development Review*, 35(4), 837-839., 1-35. Obtenido de <http://www.jstor.org/stable/25593700>

Plaza, BM, Gómez-Serrano, C., Acién-Fernández, FG et al. (2018) Effect of microalgae hydrolysate foliar application (*Arthrosphaera platensis* and *Scenedesmus* sp.) on *Petunia x hybrida* growth. *J Appl Phycol* 30, 2359-2365. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1427-0>.

Prasanna, R., Babu, S., Bidyarani, N., Kumar, A., Triveni, S., Monga, D., Mukherjee, A. K., Kranthi, S., Narkhedkar, N. K., Adak, A., Yadav, K., Nain, L. y Saxena, A. K. (2015). Prospecting cyanobacteria-fortified composts as plant growth promoting and biocontrol agents in cotton. *Experimental Agriculture* 51(1), 42-65. Doi; 10.1017/s0014479714000143

Renuka et al., 2. (2018). Las microalgas como opciones multifuncionales en la agricultura moderna: tendencias actuales, perspectivas y desafíos. ELSEVIER, 36, 1255-1273. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2018.04.004

Reyes, G. E. (2017). Intensidad en el uso de fertilizantes en América Latina y el Caribe (2006-2012).

http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612017000100005&lng=es&tlng=es.

Romero García, J.M., Acién Fernández F.G., Fernández Sevilla J.M. (2012) Development of a process for the production of l-amino-acids concentrates from microalgae by enzymatic hydrolysis. *Bioresour Technol* 112:164–170. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.094>

Shaaban, M. (2001) Green microalgae water extract as foliar feeding to wheat plants. *Pak J Biol Sci* 4(6):628–632.

Singh J. S., Kumar A., Rai A. N., and Singh D. P. (2016). Cyanobacteria: A Precious Bio-resource in Agriculture, Ecosystem, and Environmental Sustainability. *Front Microbiol.* 2016; 7: 529. Doi; 10.3389/fmicb.2016.00529.

Swain, S.S., Paidesetty, S.K., Padhy, R.N. (2017). Antibacterial, antifungal and antimycobacterial compounds from cyanobacteria. *Biomed. Pharmacother.* 90, 760-776. DOI: 10.1016/j.biopha.2017.04.030

Tadesse K.A., Lu, Z., Shen, Z., Daba, N.A., Li, J., Alam, M.A., Lisheng, L., Gilbert, N., Legesse, T.G., Huimin, Z. (2024). Impacts of long-term chemical nitrogen fertilization on soil quality, crop yield, and greenhouse gas emissions: With insights into post-lime application responses. *Obtenido de Science of The Total Environment:* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173827>

Toribio, A.J.; Suárez-Estrella, F.; Jurado, M.M.; López, M.J; López González, J.A.; Moreno, J. (2020). Prospection of cyanobacteria producing bioactive substances and their application as potential phytostimulating agents. *Biotechnology Report*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.10.020>.

AGRADECIMIENTO

Proyecto ALCERES, “Economía circular para la producción de extractos bioestimulantes de microalgas mediante recuperación de Nitrógeno y Fósforo

González, A.M., Ayala, A., Alcoser, J.A., Pozo, J. y Carreño, C.

residual", convocatoria Colaboración Público Privada 2021, Ministerio de Ciencia e Innovación, cofinanciado tanto por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través de la Agencia Española de Investigación y por la Unión Europea a través de los fondos NextGeneration.



MONOGRÁFICO: Bioemprendimiento en América Latina y el Caribe: aportes del Centro de Agrobioemprendimientos e Inversiones del IICA

Marvin Blanco-Murillo¹, Alex Siles-Castillo² y Sebastián Vásquez-Vargas³

Autor de Correspondencia: marvin.blanco@iica.int

Resumen:

Este artículo analiza la evolución, los logros y las principales contribuciones del Centro de Agrobioemprendimientos e Inversiones del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) durante el período 2020–2025, en el marco del impulso a la bioeconomía y al emprendimiento basado en ciencia, innovación y sostenibilidad en América Latina y el Caribe. El proceso se inició en 2020 con la creación de la plataforma Bio-Emprender, orientada al fortalecimiento de capacidades y a la reactivación económica mediante emprendimientos biobasados, y evolucionó hacia un modelo institucional integral con la creación del Centro en 2024.

A partir de un enfoque metodológico escalonado —que combina convocatorias abiertas, fortalecimiento de capacidades, acompañamiento especializado, incubación y aceleración—, el Centro ha contribuido a consolidar un ecosistema regional de agrobioemprendimiento, articulando actores públicos, privados, académicos y financieros. Entre los principales resultados destacan la implementación de concursos sectoriales y regionales, programas de formación y acompañamiento, y el Concurso de Agrobioemprendimientos de Impacto LATAM 2025, que recibió más de 1 118 postulaciones de 20 países.

Los resultados evidencian el dinamismo creciente de la bioeconomía en la región y la relevancia de mecanismos institucionales coordinados, basados en evidencia, para acelerar el desarrollo, la escalabilidad y el impacto territorial de los agrobioemprendimientos.

Palabras clave: bioeconomía, bioemprendimiento, agrobioemprendimiento, ecosistema, innovación; LATAM

¹ Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (Costa Rica), marvin.blanco@iica.int; CÓDIGO ORCID. 0009-0003-6764-1531

² Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (Costa Rica), alex.siles@iica.int; CÓDIGO ORCID. 0009-0003-5973-1828

³ Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (Costa Rica), sebastian.vasquez.consultor@iica.int; CÓDIGO ORCID 0009-0006-6776-8390

MONOGRAPH: Bioentrepreneurship in Latin America and the Caribbean: Contributions of the IICA Center for Agribioentrepreneurship and Investments

Marvin Blanco-Murillo¹, Alex Siles-Castillo² y Sebastián Vásquez-Vargas³

Abstract:

This article analyzes the evolution, achievements, and key contributions of the IICA Center for Agribioentrepreneurship and Investments between 2020 and 2025, within the broader effort to promote bioeconomy-based, science-driven, and innovation-oriented entrepreneurship in Latin America and the Caribbean. The process began in 2020 with the creation of the Bio-Emprender platform, aimed at strengthening capacities and supporting economic recovery through bio-based entrepreneurship, and evolved into an integrated institutional model with the establishment of the Center in 2024.

Using a staged methodological approach—combining open calls, ecosystem mapping, capacity-building programs, specialized mentoring, incubation, and acceleration—the Center has contributed to the consolidation of a regional agribioentrepreneurship ecosystem that articulates public institutions, academia, private sector actors, and financial organizations. The implementation of sector-specific challenges, training programs, and structured accompaniment mechanisms has enabled the identification, development, and scaling of bio-based business initiatives across diverse productive sectors.

Among the most significant results is the LATAM Impact Agribioentrepreneurship Competition 2025, which received more than 1 118 applications from 20 countries, highlighting the growing dynamism of the regional bioeconomy. Overall, the findings underscore the relevance of coordinated, evidence-based institutional mechanisms to accelerate the development, scalability, and territorial impact of agribioenterprises in the region.

Key Words: bioeconomy, bioentrepreneurship, agribioentrepreneurship, ecosystem, innovation, LATAM

1. INTRODUCCIÓN

La bioeconomía se posiciona como un eje estratégico para la transformación productiva en América Latina y el Caribe (ALC). La región posee ventajas competitivas únicas: megadiversidad, abundancia de recursos biológicos, capacidad científica instalada y una sólida experiencia exportadora. Diversos organismos internacionales coinciden en que el desarrollo de la bioeconomía es clave para diversificar la estructura productiva, agregar valor a la producción agroalimentaria, generar empleo de calidad y avanzar hacia modelos de desarrollo más sostenibles e inclusivos. En particular, la Comisión Económica para América Latina (CEPAL), la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) destacan que la bioeconomía es “vital” como estrategia para la diversificación productiva y la agregación de valor en la agricultura, así como para potenciar el comercio agroalimentario de la región y contribuir simultáneamente a la seguridad alimentaria y a los objetivos ambientales (CEPAL, FAO e IICA, 2023).

En este contexto, la bioeconomía permite utilizar los nuevos conocimientos, tecnologías e innovaciones para lograr un aprovechamiento productivo más eficiente y sostenible de los recursos y principios biológicos existentes en la cadena, posibilitando la construcción de modelos de negocios más rentables, competitivos, inclusivos y sostenibles ambientalmente (IICA, 2023). Su capacidad para articular agricultura, biodiversidad, conocimiento científico, innovación y sostenibilidad la convierte en una vía privilegiada para el desarrollo territorial y la diversificación económica.

La región enfrenta importantes desafíos vinculados con la baja productividad de la mayoría de los cultivos y los impactos del cambio climático sobre la agricultura. Además, en América Latina y el Caribe (ALC) se pierden anualmente 127 millones de toneladas de alimentos, cantidad suficiente para satisfacer las necesidades de 300 millones de personas. Según la FAO (2016), el 28 % de las pérdidas ocurre en la producción, 21 % en el manejo y almacenamiento, 6 % en el procesamiento, 17 % en la distribución y 28 % en el consumo. A escala global, la producción de alimentos que se desperdician genera alrededor de 3,3 gigatoneladas de emisiones de GEI, lo que equivaldría al tercer mayor emisor del mundo, solo después de China y Estados Unidos (FAO, 2016).

En paralelo, el emprendimiento de base científica y tecnológica en la región aún se encuentra en etapas tempranas. Un estudio realizado por el Programa de Bioeconomía e Innovación del IICA (2022) caracterizó el ecosistema de

bioemprendimiento en ALC e identificó 85 emprendimientos destacados. Más de la mitad se crearon en los últimos cinco años y se concentran en los sectores de salud, alimentos y agricultura. La mayoría surgió a partir de proyectos de investigación o innovaciones científicas que evolucionaron hacia oportunidades de negocio. Aunque algunos han alcanzado fases avanzadas de escalamiento o crecimiento, su proyección internacional sigue siendo limitada; varios se consolidaron fuera de la región o en colaboración temprana con organizaciones internacionales.

El estudio también muestra que Chile y Argentina lideran la creación de bioemprendimientos exitosos gracias a condiciones propicias para su conversión en bionegocios. Entre los factores clave para su desarrollo destacan:

1. Acceso a educación y acompañamiento especializado.

La mayoría de los fundadores proviene de instituciones de educación superior y participó en programas de emprendimiento, incubación o aceleración, muchos de ellos especializados en bioemprendimiento.

2. Disponibilidad de capital semilla y capital de riesgo.

Los casos más exitosos accedieron a fondos privados, competencias internacionales (como MassChallenge) o aceleradoras especializadas (como GridX o Ganesha Labs). Algunos recibieron inversiones de fondos internacionales como la Kirchner Impact Foundation, lo que evidencia la necesidad de contar con sistemas financieros receptivos.

3. Conexión con ecosistemas internacionales de innovación.

Muchos bioemprendimientos participaron en redes globales como FoodBytes, Endless Frontier Labs, Keiretsu Forum o Plug and Play. En el caso de iniciativas biotecnológicas, disponer de infraestructura especializada, particularmente laboratorios, fue determinante.

En conjunto, estos hallazgos muestran que ALC posee un potencial significativo para el desarrollo de bionegocios, aunque requiere fortalecer capacidades, financiamiento, infraestructura y vínculos internacionales para consolidar un ecosistema más robusto (Domínguez et al, 2024).

Por ello, el IICA ha asumido un rol activo, impulsando un ecosistema hemisférico orientado a fortalecer capacidades, incubar ideas, acelerar emprendimientos y conectar tecnologías con mercados. A través del Programa de Innovación y Bioeconomía, el IICA proporciona la arquitectura técnica para aprovechar nuevas capacidades científicas, tecnológicas y productivas. El enfoque de la bioeconomía aplicada al emprendimiento rural se fundamenta en cuatro pilares técnicos (IICA, 2023):

1. **Aprovechamiento sostenible de la biomasa** para generar nuevos productos y servicios.
2. **Ciencia, tecnología e innovación** como motores de transformación productiva.
3. **Circularidad y descarbonización** como principios rectores de la transición económica.
4. **Inclusión y territorialidad**, con énfasis en jóvenes, mujeres y pequeños productores.

Estos pilares permiten estructurar modelos de negocio biobasados con alto valor agregado.

1.1 El Enfoque del IICA para Impulsar el Agrobioemprendimiento

Durante el período 2020-2025, el IICA impulsó iniciativas orientadas a promover la creación de emprendimientos biobasados, incluyendo plataformas virtuales, cursos, mentorías especializadas y programas de fortalecimiento de capacidades en cadenas estratégicas (café, cacao, frutas tropicales, horticultura). Este esfuerzo consolidó alianzas público-privadas y metodologías como el diseño centrado en el usuario y la bio-transformación, generando una masa crítica de proyectos innovadores en la región.

Para ofrecer servicios de apoyo al desarrollo del emprendimiento en la región LATAM, se crearon dos herramientas específicas:

1.2. Hub de Innovación y Emprendimiento (Bio-Emprender)

Diseñada en 2020 en el marco de la pandemia por COVID-19, tuvo como propósito fortalecer capacidades para la reactivación económica a través del emprendimiento basado en bioeconomía, con énfasis en productores, jóvenes y mujeres rurales. Sus módulos integrados: Aula Virtual, Fábrica de Ideas, Mentoría Empresarial, Caja de Herramientas, Banco de Oportunidades y Comunidad de Emprendedores, ofrecieron un ecosistema virtual robusto y accesible (IICA, 2020).

1.3. Centro de Agrobioemprendimientos e Inversiones

El Centro de Agrobioemprendimientos e Inversiones se estableció con el objetivo de proveer servicios de apoyo para el desarrollo del emprendimiento basado en ciencia, bioeconomía e innovación, consolidándose como una plataforma institucional orientada a integrar aprendizajes acumulados, metodologías híbridas y recursos estratégicos. Entre estos recursos se incluyen herramientas

digitales, espacios físicos especializados —como áreas de coworking, el FabLab y el CIMAG—, así como alianzas con actores internacionales.

El Centro propone un modelo de intervención integral que articula herramientas pedagógicas, metodologías ágiles y mecanismos de acompañamiento especializado, adaptados a distintos niveles de madurez empresarial. Este enfoque se estructura en tres componentes complementarios: (i) fomento de la cultura de innovación y bioeconomía; (ii) formación y fortalecimiento de capacidades técnicas y empresariales; y (iii) acompañamiento integral a agrobioemprendimientos.

Cada componente opera como un módulo metodológico con objetivos, instrumentos y resultados específicos, lo que permite atender de manera progresiva el ciclo del emprendimiento, desde las etapas de sensibilización y motivación inicial hasta el escalamiento comercial y la vinculación con oportunidades de inversión (IICA, 2024).

2. MÉTODO/DESARROLLO DE LA EXPERIENCIA DE INNOVACIÓN

El proceso metodológico aplicado por el IICA para promover la innovación y el emprendimiento basado en bioeconomía entre 2021 y 2025 se estructuró como una estrategia escalonada, orientada a identificar, fortalecer, acompañar, incubar y acelerar bioemprendimientos en distintos sectores productivos y territorios de América Latina y el Caribe (ALC). Esta estrategia integró concursos, desafíos de innovación abierta, programas formativos y procesos de sistematización, que permitieron generar evidencia, desarrollar capacidades y movilizar alianzas multisectoriales para impulsar la transición hacia una economía bio-basada.

La metodología general aplicada combina los siguientes elementos:

1. Convocatorias abiertas y mapeo del ecosistema, mediante concursos y retos orientados a identificar innovaciones, bionegocios emergentes y oportunidades de valorización de biomasa.
2. Evaluación técnica y selección competitiva, siguiendo estándares internacionales (revisión preliminar, evaluación experta, paneles y pitch final).
3. Fortalecimiento de capacidades, a través de talleres, bootcamps, mentorías y procesos de cocreación.
4. Sistematización, visibilización y difusión, mediante catálogos, publicaciones, espacios de networking e intercambio técnico.

5. Incubación y aceleración, como fase avanzada para escalar emprendimientos destacados y facilitar su acceso a servicios, inversiones y alianzas.

3. RESULTADOS

La presente sección sistematiza los principales resultados alcanzados por el Centro de Agrobioemprendimientos e Inversiones a través de sus instrumentos, programas y convocatorias, los cuales reflejan una implementación progresiva del modelo de intervención basado en cultura de innovación, fortalecimiento de capacidades y acompañamiento especializado. Los resultados se presentan de manera cronológica y programática, evidenciando tanto el alcance cuantitativo de las acciones desarrolladas como su contribución cualitativa al fortalecimiento del ecosistema de agrobioemprendimiento en América Latina y el Caribe, desde iniciativas sectoriales específicas hasta mecanismos regionales de incubación, aceleración y vinculación con inversión.

3.1. Concurso de Bionegocios en la Cadena del Café (BIOCAFÉ)

Este concurso, realizado en 2021, tuvo como objetivo identificar, visibilizar y reconocer experiencias de bionegocios en la cadena del café de la región SICA. El enfoque se centró en la valorización sostenible de la biomasa residual del café —pulpa, mucílago, cascarilla y aguas residuales, entre otros— y en la agregación de valor al grano mediante tecnologías promovidas por el IICA (2021). En seguimiento a esta iniciativa, durante 2022 se implementó un programa de fortalecimiento de capacidades orientado a sensibilizar sobre el potencial de la bioeconomía para mejorar la competitividad y sostenibilidad de la cadena cafetalera (IICA, 2022).

3.2. Desafío en Bioproductos

Esta iniciativa se desarrolló conjuntamente con el Hub de Biomateriales de la Agencia Costarricense de Promoción de Inversiones (CINDE) y contó con el apoyo del Banco Centroamericano de Integración Económica (BCIE), la Unión Europea y el Gobierno alemán, a través de KfW. El reto se orientó a identificar innovaciones para la valorización de biomasa residual proveniente de actividades agroindustriales de los sectores agrícola, ganadero, forestal y de acuacultura, mediante la generación de bioproductos (IICA, 2022).

Se premiaron cinco proyectos ganadores de un total de 109 propuestas provenientes de los seis países del SICA. Del total de postulaciones, el 43 % correspondió a ideas y el 40 % a proyectos en desarrollo, mientras que el porcentaje restante se concentró en emprendimientos en fases más avanzadas (IICA, 2022). Entre las propuestas ganadoras se incluyen la producción de fibras

textiles a partir del rastrojo de piña, la obtención local de carboximetilcelulosa (CMC) a partir de residuos de piña y la elaboración de bebidas probióticas y vinagre a partir de cáscara y pulpa de café.

3.3. Emprendimiento en Agrobioturismo

Implementado a partir de 2023, este programa busca fortalecer las articulaciones entre la bioeconomía y el turismo como estrategia de diversificación productiva, mediante el desarrollo de capacidades, la innovación en el diseño de experiencias y la valorización de prácticas sostenibles. Como resultados, se relevaron 110 iniciativas que incorporan prácticas de aprovechamiento de la bioeconomía en productos turísticos y se publicó un catálogo que sistematiza esta oferta (IICA, 2024). Asimismo, se organizaron dos ediciones del Bootcamp de Agrobioturismo (2024 y 2025), con la participación de 160 personas de 15 países, lo que permitió generar 55 propuestas de emprendimientos en distintas fases de desarrollo (IICA, 2025).

3.4. Programa de Fomento de la Cultura de Innovación y Bioeconomía

Este componente tiene como finalidad ampliar el número de personas y organizaciones capaces de comprender la bioeconomía, identificar oportunidades y generar soluciones desde sus territorios. El enfoque metodológico se fundamenta en la democratización del acceso al conocimiento, un abordaje práctico de conceptos complejos y la construcción de comunidades de aprendizaje. Entre los principales resultados destacan la recepción de más de 700 visitantes institucionales en el Centro de Agrobioemprendimientos e Inversiones y la ejecución de una agenda sistemática de charlas y talleres, con un alcance acumulado superior a 1 700 personas.

3.5. Programa de Formación de Capacidades en Agrobioemprendimiento

Este programa tiene como objetivo dotar a los emprendimientos de competencias técnicas, estratégicas y transversales que les permitan evolucionar desde una idea inicial hasta un modelo de negocio validado. La metodología combina formación sincrónica y asincrónica, procesos de autoevaluación y acompañamiento experto, beneficiando a más de 700 personas emprendedoras. El modelo integra competencias técnicas en bioeconomía, tecnologías limpias y economía circular; competencias estratégicas en modelos de negocio, validación de mercado, precios y costos; y competencias transversales en liderazgo, comunicación y gestión de equipos.

3.6. Programa de Acompañamiento a Agrobioemprendimientos

El Programa de Acompañamiento guía a los bioemprendimientos por un proceso progresivo que incluye descubrimiento, ideación, prototipado, salida al mercado y conexión con clientes e inversionistas, organizados en subprogramas modulares, que pueden ser recorridos de manera secuencial o focalizada según el nivel de madurez del emprendimiento. La oferta de este programa de acompañamiento se divide en cinco subprogramas, basados en las etapas del desarrollo de los negocios, las cuales son:

3.6.1 Subprograma 1: Descubrimiento

En esta fase se desarrollan análisis de contexto, identificación de desafíos productivos y validación de necesidades reales. Se trabaja en conjunto con otras organizaciones como gobiernos locales, productores y cooperativas. Las metodologías utilizadas para esta etapa son identificación de tensiones y puntos críticos de valor para clientes y mercados. Exploración de oportunidades de mercado. Un ejemplo de actividad impartida fue el “**Taller de Emprendimiento sobre Huertas Urbanas**”, dirigido a productores, emprendedores, amas de casa, estudiantes y otros miembros de la comunidad interesados en iniciar o fortalecer proyectos de emprendimientos tradicionales de huertas urbanas, el taller combinó teoría y práctica para promover sistemas alimentarios locales y sostenibles. En total, se atendió a 61 participantes (IICA, 2025).

3.6.2 Subprograma 2: Ideación y Modelación

En esta fase se transforman los retos validados en conceptos de solución basados en evidencia científica, tecnológica y de mercado. Las metodologías empleadas para este subprograma son: definición de propuesta de valor, segmentación de clientes, evaluación de la competencia, precios y cadenas de valor, y análisis de viabilidad técnica y comercial. Entre las actividades realizadas, está el “**Concurso Impulsa Agrobio 2025**”, el cual recibió 90 postulaciones y seleccionó 40 emprendimientos provenientes de los sectores agrícola, agroindustrial, bioeconomía y turismo, además de iniciativas universitarias con ideas innovadoras. La convocatoria estuvo dirigida a proyectos en etapas tempranas, desde ideas iniciales hasta primeros prototipos o MVP, priorizando aquellas con alto potencial de crecimiento. A través de un proceso estructurado de formación, mentoría y validación técnica, el concurso buscó transformar propuestas incipientes en productos o servicios con viabilidad comercial y capacidad de generar nuevas oportunidades de negocio en el país (IICA, 2025).

3.6.3 Subprograma 3: Prototipado

En alianza con FabLabs, universidades y centros de investigación, los equipos desarrollan prototipos funcionales y experimentos de validación técnica y comercial. Las herramientas utilizadas para esta fase son: Mapeo de organizaciones de Ciencia y Tecnología que puedan ofrecer servicios de prototipado, técnicas de prototipado rápido, pruebas de laboratorio o campo y estimación temprana de estructura de costos. Bajo este subprograma se realizó un ejercicio de mapeo y visita a varios aliados posibles para etapas de prototipado para agrobioemprendimientos, tales como el FAB Lab del IICA, el InnoHub de la Universidad de Costa Rica, el Centro Nacional de Innovaciones Biotecnológicas en Costa Rica (CeNAT-CONARE), Centro Tecnológico en Bioeconomía Circular CTBC (Uruguay) y SILAB - Servicio Integrado de Laboratorios (Ecuador). Estas alianzas buscan fortalecer el mapeo y oferta a los agrobioemprendimientos de la región para sus etapas de prototipado (IICA, 2025).

3.6.4 Subprograma 4: Alistamiento y salida al mercado

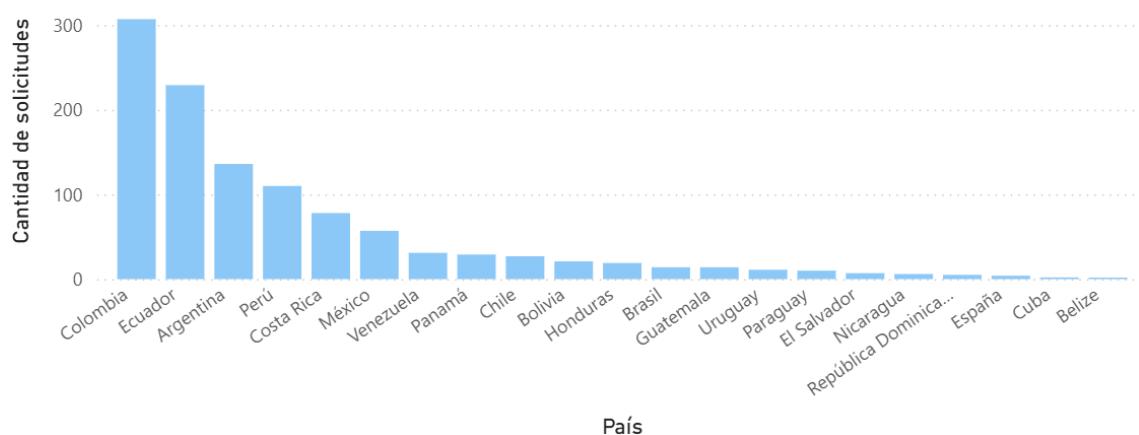
Esta etapa prepara al emprendimiento para sus primeras ventas y para el cumplimiento regulatorio necesario para ingresar al mercado. A continuación, se detallan dos programas implementados en esta fase:

- **Concurso “Aceleración AgriTech Costa Rica”.** Se trató de un proceso intensivo para 10 startups que incluyó validación con clientes, fortalecimiento del modelo de negocio y preparación para inversión. Además de un ejercicio de fortalecimiento del ecosistema AgriFoodTech en Costa Rica con otras organizaciones. Este programa fue implementado en conjunto con PROCOMER, INA (Instituto Nacional de Aprendizaje, Fundación CRUSA, The Yield Lab Latam y Nesters (IICA, 2025).
- **Concurso de Agrobioemprendimientos de Impacto LATAM 2025.** El concurso se constituyó como la iniciativa emblemática del período para la identificación, incubación y aceleración de bioemprendimientos de alto potencial en América Latina y el Caribe, y fue coorganizado por el IICA, FONTAGRO y socios de la Red LATAM de Bioeconomía. En su edición 2025, permitió mapear 1118 iniciativas y realizar la evaluación técnica de 94 bioemprendimientos provenientes de 20 países. Como resultado, se seleccionaron 30 emprendimientos para su incorporación en un programa especializado de incubación y aceleración, y se otorgó apoyo directo a seis proyectos ganadores mediante vouchers de hasta USD 15 000, orientados a fortalecer procesos de validación tecnológica, desarrollo de mercado y escalamiento. El concurso se estructuró en tres

fases de evaluación alineadas con estándares internacionales — evaluación preliminar, evaluación técnica en extenso y panel hemisférico final—, consolidándose como un mecanismo eficaz para visibilizar el ecosistema regional de bioemprendimientos y fortalecer capacidades técnicas y empresariales basadas en ciencia y biodiversidad. A continuación, se describen los principales resultados de este concurso:

Distribución geográfica y densidad territorial del ecosistema

Desde una perspectiva territorial, las propuestas recibidas provinieron de 20 países de América Latina, el Caribe y España. Tal como se observa en la figura 1, Colombia y Ecuador concentraron cerca de la mitad de las postulaciones (aproximadamente 28 % y 21 %, respectivamente), seguidos por Argentina, Perú, Costa Rica y México, que también registraron una participación significativa. Otros países —entre ellos Chile, Bolivia, Honduras, Brasil, Guatemala, Uruguay, Paraguay, El Salvador, Nicaragua, República Dominicana, España, Cuba y Belice— aportaron un número menor de iniciativas, aunque suficiente para evidenciar una cobertura regional amplia (IICA, 2025).



Fuente: elaboración propia

Figura 1. Concurso de Agrobioemprendimiento de Impacto LATAM 2025. Postulaciones por países.

Este patrón de distribución geográfica permite identificar al menos tres elementos analíticos relevantes. En primer lugar, se confirma la existencia de núcleos de alta densidad emprendedora en bioeconomía, particularmente en la región andina y en algunos países del Cono Sur y Mesoamérica, donde confluyen capacidades científicas, marcos institucionales favorables y un tejido

empresarial dinámico. En segundo lugar, la diversidad de contextos nacionales representados abre oportunidades concretas para el fortalecimiento de esquemas de cooperación Sur-Sur, dado que muchos de los desafíos abordados por los agrobioemprendimientos —como la gestión de residuos, el desarrollo de bioinsumos, la diversificación productiva o el agrobioturismo— son comunes a varios países de la región. Finalmente, la menor participación observada en algunos países pone de manifiesto brechas en términos de visibilidad, capacidades técnicas o soporte institucional, lo que aporta insumos relevantes para la focalización de futuras acciones de fortalecimiento de ecosistemas emprendedores a nivel regional (IICA, 2025).

Perfil sectorial de las propuestas: hacia qué bioeconomía se está innovando

La distribución temática de las postulaciones válidas se concentró en cuatro áreas principales de la bioeconomía: bioinsumos y tecnologías agroalimentarias sostenibles (35 %), biomateriales, bioproductos y bioenergía (27 %), nuevos bioproductos para alimentos, cosmética, salud y bienestar (25 %), y bioservicios y soluciones basadas en la naturaleza (14 %). Este patrón refleja una bioeconomía regional diversificada, en la que predominan las innovaciones orientadas a mejorar la sostenibilidad y eficiencia de los sistemas agroalimentarios, junto con una transición hacia modelos que sustituyen insumos fósiles y valorizan la biomasa. Aunque con menor peso relativo, los bioservicios evidencian una tendencia emergente hacia modelos basados en servicios ecosistémicos, agrobioturismo y desarrollo territorial (IICA, 2025).

Madurez de las iniciativas

Un elemento distintivo del concurso fue su riguroso proceso de selección, que combinó criterios de elegibilidad, madurez tecnológica y características propias de los emprendimientos basados en ciencia y tecnología. En una primera fase se aplicaron filtros de elegibilidad —nivel mínimo de madurez tecnológica ($TRL \geq 4$), condición de EBCT y una antigüedad mínima de dos años—, lo que redujo el universo inicial a 230 propuestas. Posteriormente, se excluyeron aquellas con débil vinculación con la bioeconomía, quedando 130 iniciativas evaluadas en detalle según evidencia e innovación. Este proceso permitió consolidar un conjunto final de 108 propuestas válidas para la evaluación final (IICA, 2025).

Evaluación detallada, finalistas y enfoque en impacto

La evaluación de las propuestas extendidas combinó criterios cualitativos (20 %) y cuantitativos (80 %), conforme a los Términos de Referencia de la convocatoria. Los criterios cualitativos consideraron aspectos como regionalidad, trayectoria mínima, escalabilidad según TRL y alineamiento con

las áreas priorizadas de la bioeconomía, mientras que los cuantitativos evaluaron, en una escala de 0 a 5, dimensiones clave relacionadas con impacto, capacidades del equipo, solidez tecnológica y de propiedad intelectual, innovación, diferenciación y grado de avance comercial. En esta fase se evaluaron 94 propuestas, organizadas en cuatro categorías de bioproductos o bioservicios y evaluadas por ternas interdisciplinarias mediante un formulario estructurado en línea. El proceso culminó con la selección de 30 propuestas finalistas para un programa de incubación y aceleración en 2026, así como seis iniciativas ganadoras que recibirán capital semilla, consolidando al concurso como un mecanismo integral de identificación, acompañamiento y fortalecimiento de bioemprendimientos de alto potencial.

| Categorías | Cantidad |
|--|----------|
| Bioinsumos y tecnologías agroalimentarias sostenibles | 31 |
| Biomateriales, bioproductos y bioenergía | 29 |
| Nuevos bioproductos para alimentos, cosmética, salud y bienestar | 27 |
| Bioservicios y soluciones basadas en la naturaleza | 7 |

Fuente: elaboración propia

Tabla 1. Concurso de Agrobioemprendimiento de Impacto LATAM 2025. Propuestas evaluadas según categorías de bioproductos y bioservicios

3.6.5 Subprograma 5: Conexión con clientes e inversionistas

La fase final del programa se orienta a la vinculación comercial y al acceso a mecanismos de financiamiento, mediante la implementación de herramientas como pitch sessions, mesas de negociación con compradores e inversionistas, conexión con aliados estratégicos y asesoría para la formulación de planes de inversión. Un ejemplo representativo de estas acciones fue el evento “**Conexión con mecanismos financieros: tradicionales y no tradicionales**”, en el cual participaron 20 emprendimientos del sector agroalimentario y cinco organizaciones oferentes de esquemas de financiamiento, tanto convencionales como alternativos. La actividad combinó espacios de charlas técnicas con sesiones de reuniones uno a uno entre los emprendimientos y representantes de instituciones financieras y no financieras, lo que permitió a las personas participantes conocer de manera directa las opciones disponibles, clarificar requisitos y explorar oportunidades de apoyo económico para el desarrollo y escalamiento de sus iniciativas en Costa Rica (IICA, 2025).

4. DISCUSIÓN/CONCLUSIONES

Los hallazgos confirman un proceso sostenido de maduración institucional iniciado en 2020 y consolidado en 2025 mediante la implementación de un modelo hemisférico de impulso al agrobioemprendimiento. El IICA ha logrado articular un ecosistema regional basado en la innovación, la bioeconomía y la sostenibilidad, integrando herramientas digitales, infraestructura especializada, metodologías internacionales y alianzas interinstitucionales.

La creación del Centro de Agrobioemprendimientos e Inversiones y la ejecución del Concurso de Agrobioemprendimientos de Impacto LATAM representan un salto cualitativo en el abordaje del emprendimiento biobasado, al incorporar una visión integral del ciclo de vida del emprendimiento, desde la ideación hasta la vinculación con inversión. En conjunto, los resultados validan la bioeconomía como un motor estratégico de diversificación productiva y desarrollo territorial en América Latina y el Caribe, y sientan bases sólidas para futuras acciones de cooperación, investigación aplicada y escalamiento regional.

REFERENCIAS

- Blanco, M; González, M. (2024). Agrobioturismo: Potenciando las Articulaciones entre la Bioeconomía y el Turismo. Catálogo de experiencias agrobioturísticas en América Latina vinculadas con prácticas de aprovechamiento de la bioeconomía. IICA, Programa de Innovación y Bioeconomía. Recuperado de: <https://repositorio.iica.int/items/2e8dc9ac-25e6-4147-b785-114847a4b65a>
- CEPAL, FAO e IICA. (2023). Call for actions to strengthen regional cooperation in order to promote the bioeconomy in Latin America and the Caribbean. Santiago / San José.
- Domínguez, et al. Panorama del bioemprendimiento basado en la bioeconomía sobre América Latina y el Caribe. En Informe de situación y perspectivas de la bioeconomía en América Latina y el Caribe/Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura; San José, C.R.: IICA, 2024, 225 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia). 2016. Pérdidas y desperdicios de alimentos en América Latina y el Caribe (en línea). Santiago, Chile, Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Consultado 4 nov. 2018. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i5504s.pdf>.
- IICA (2020). Plataforma Bio-Emprender. Nota Conceptual
- IICA (2024). Propuesta de creación del Centro de Agrobioemprendimientos e Inversiones.

IICA (2021). Concurso BioCafé. Experiencias de bionegocios en la cadena del café de los países del SICA. Informe de sistematización de resultados. Programa de Innovación y Desarrollo Productivo, Projecta+.

IICA (2022). Diseño e implementación de un programa de fortalecimiento de capacidades sobre desarrollo de bionegocios en la cadena de café de los países del SICA (América Central y República Dominicana). Informe de consultoría. The Bridge Biofoundry.

IICA, CINDE, CELIEM. (2022). Proyecto Del desperdicio a la agregación de valor: un desafío en bioproductos y biomateriales. Informe de consultoría.

IICA (2025). Bootcamp sobre Agrobioturismo. Programa de la segunda edición.

IICA (2025). Centro de Agrobioemprendimientos e Inversiones. Informe de resultados 2025.

IICA (2025). Concurso de Agrobioemprendimientos de Impacto LATAM. Informe de resultados.

Kantis, H; Agelelli, P. (2020). Emprendimientos de base científico-tecnológica en América Latina: Importancia, desafíos y recomendaciones para el futuro. Banco Interamericano de Desarrollo.



Combatir la pérdida y desperdicio de alimentos sin dejar a nadie atrás: Propuestas en el marco del proyecto ZeroW

José Luis del Río¹, Víctor Ortiz-Somovilla², Emma Cantos-Villar³, Anouck Guillou⁴, Antonio de Carluccio⁴ e Irene Domínguez⁵

Autor de Correspondencia: jose.rio@juntadeandalucia.es

Resumen:

Lamentablemente cada año se pierden y desperdician millones de toneladas de alimentos, al mismo tiempo que millones de personas pasan hambre. Reducir esta merma alimentaria es una prioridad global, pero los cambios necesarios pueden afectar de manera desigual a diferentes grupos sociales, como es el caso de, entre otros, los pequeños agricultores, los trabajadores del sector o las comunidades rurales.

Tras el análisis de la situación actual, el proyecto europeo ZeroW propone un enfoque de "transición justa": transformar el sistema alimentario para eliminar la PDA sin perjudicar a los más vulnerables. Este artículo presenta los principales hallazgos sobre cómo hacer esta transformación de manera equitativa, identificando quiénes son los grupos más vulnerables y qué cambios se necesitan para ello.

Palabras clave: Transición justa, grupos vulnerables, economía circular.

Reducing food loss and waste without leaving no one behind.

Lessons learned within the framework of the ZeroW Project

José Luis del Río⁴, Víctor Ortiz-Somovilla⁵, Emma Cantos-Villar⁶, Anouck Guillou⁴,
Antonio de Carluccio⁴ and Irene Domínguez⁵

Abstract:

We are facing a cruel dichotomy: millions of tons of food being wasted every year while millions of people are suffering from hunger globally. Thus, reducing food loss and waste becomes a global priority. Major changes in the agrifood system are required, but they may never impact negatively on vulnerable stakeholders: small farmers, agrifood workers or rural communities, among others.

¹ IFAPA Servicios Centrales, Avda. Grecia s/n 41012 Sevilla, Spain.

² IFAPA Alameda del Obispo, Avda. Menéndez Pidal, s/n 14004 Córdoba, Spain.

³ IFAPA Rancho de la Merced, Ctra. Cañada de la Loba, Jerez de la Frontera 11471 Cádiz, Spain.

⁴ SAFE Rue Vilain XIII, 17, 1050 Bruxelles, Belgium.

⁵ IFAPA La Mojónera, Camino de San Nicolás 1, La Mojónera, 04745 Almería, Spain.

On the basis of the current necessities and vulnerabilities tackled by the agrifood sector, the ZeroW project proposes a 'just transition' approach to bring about a paradigm shift: transforming the agri-food system towards the imperative reduction of food loss and waste without leaving no one behind. This paper presents the first findings achieved within the framework of ZeroW, evidencing that the transformation process requires equity, fairness, the identification of vulnerable stakeholders on each stage of the food supply chain and a deep analysis of the necessary changes and their prioritisation.

Key Words: Just transition, vulnerable stakeholders, circular economy

1. IMPORTANCIA DE LA TRANSICIÓN JUSTA

La pérdida y desperdicio de alimentos (PDA) supone una problemática global que debe atajarse de raíz a lo largo de la cadena de producción, distribución y consumo de alimentos en los hogares. La Organización de las Naciones Unidas (ONU) estima que el 13,2% de los alimentos producidos a escala global se pierden antes de ser comercializados, mientras que el 19% son desperdiciados en las fases de comercialización y consumo en los hogares.

En 2015, la ONU estableció como prioridad global atajar este problema a través del Objetivo de Desarrollo Sostenible 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles. Este objetivo busca cambiar tanto los hábitos de consumo en los hogares como reducir los impactos negativos en la sociedad y el medio ambiente.

Las estrategias de reducción de la PDA han evolucionado durante la última década: desde la innovación al diseño de modelos de consumo de alimentos más sostenibles, pasando por una cuantificación fiable y homogénea (Del Río et al., 2024). Ahora ya no se trata únicamente de innovar en cada fase de la cadena agroalimentaria, sino también de crear marcos normativos que implementen estas innovaciones de forma justa (Astudillo-Pascual et al., 2025).

El problema central es la gobernanza: ¿cómo asegurar que ningún grupo social sea excluido o perjudicado en este cambio fundamental del modelo de producción y consumo de alimentos?

La literatura especializada ha identificado el concepto de **transición justa** como enfoque fundamental para abordar este desafío. Newell y Mulvaney (2013) ya establecieron su uso recurrente en la transición energética en Estados Unidos y Reino Unido. La ONU acuñó este concepto en 2016 para abordar la necesidad de crear puestos de trabajo de calidad (UNFCCC, 2016). Por su parte, Jurgilevich et al. (2016) exploraron la necesidad de impulsar la transición del sistema agroalimentario hacia la reducción del desperdicio de alimentos según los principios de la **economía circular**, sin referencia expresa al concepto de justicia en este proceso de cambio. Éste sí figura en Tribaldos y Kortetmäki (2022), quienes definieron un marco estructural jerárquico compuesto por tres niveles: **dimensiones de la justicia**, principios asociados a cada dimensión y criterios para abordar cada principio.

2. LAS TRES DIMENSIONES DE LA JUSTICIA

El proyecto ZeroW identifica tres dimensiones clave para una transformación equitativa, alineadas con la estructura propuesta por la Agencia Ambiental Europea (EEA, 2023; Figura 1):

2.1 Justicia Distributiva: Reparto equitativo de costes y beneficios

Los costes de la transición justa del modelo de producción y consumo de alimentos no deben recaer sobre los grupos vulnerables. Es fundamental identificar estos grupos y proporcionarles el apoyo necesario. Como señalan Tribaldos y Kortetmäki (2022), esta dimensión alude a que la distribución de recursos, beneficios y cargas asociadas al proceso de transición debe realizarse de forma equitativa dentro de cualquier estructura social.

Los autores definen cuatro principios que ayudan a entender esta dimensión:

2.1.1 Acceso a la comida como derecho global y universal: Principio central en la transición justa, especialmente importante para los grupos sociales con menor renta y aquellos que habitan en países en vías de desarrollo.

2.1.2 Justicia laboral: Necesidad de desarrollar un modelo que evite discriminaciones por razones de género y raza, asegurando condiciones dignas de trabajo ajustadas al precio actual de la vida.

2.1.3 Estructura justa en la producción de alimentos: Sitúa a los agricultores como grupos vulnerables, haciendo referencia a su resiliencia para hacer frente, adaptarse y aprender de las tensiones y cambios que se producen en el tejido productivo.

2.1.4 Oportunidades para la ganadería: Sitúa a los ganaderos como grupos vulnerables, con especial atención sobre el relevo generacional mediante la creación de oportunidades atractivas de empleo para los jóvenes.

2.2 Justicia Procedimental: Participación de todos en las decisiones

Cualquier política debe contar con la participación de todos los agentes sociales, pero antes de participar, primero debe quedar claro en qué se participa y cuál es el objetivo. En este sentido, el proyecto ZeroW centra la atención sobre las barreras burocráticas y del lenguaje en los procesos de comunicación entre la Administración y el resto de los agentes sociales del sector agroalimentario.

2.3 Justicia Social: Protección de los grupos vulnerables

Los grupos vulnerables deben ser incorporados como agentes del cambio, estando bien informados sobre los beneficios de la transformación. La clave reside en que deben recibir mensajes claros sobre la definición de transición justa y cuáles son los beneficios de llevarla a cabo, de modo que adquieran conciencia sobre su importancia.



Figura 1. Pérdida y desperdicio de alimentos

Identificación de los grupos vulnerables

Un proceso de cambio equitativo requiere la participación de todos los actores involucrados, especialmente los grupos vulnerables. El proyecto ZeroW ha identificado estos grupos en cada fase de la cadena alimentaria (De Carluccio et al., 2025; Figura 2):

- En la producción agraria:

- Agricultores y ganaderos en países en desarrollo con menos recursos para adaptarse.
- Mujeres agricultoras y ganaderas: a menudo excluidas de los ecosistemas de innovación.
- Agricultores y ganaderos mayores: que pueden considerar poco rentable invertir en nuevas tecnologías.
- Pequeños agricultores y ganaderos: especialmente vulnerables ante el poder de las grandes empresas.

- Pescadores artesanales: con dificultades para competir con los grandes mercados.
 - Pescadores a gran escala: propensos a registrar grandes volúmenes de desperdicio de pescado por descartes de especies con poco valor comercial.
- **En el procesado y empaquetado:**
- Pequeñas empresas transformadoras: con márgenes económicos reducidos que limitan su capacidad de inversión en innovación tecnológica, cuya rentabilidad pueda verse además afectada por la dinámica de los mercados o la poca aceptación del consumidor.
- **En la distribución:**
- Distribuidores de productos congelados: en riesgo de registrar grandes pérdidas por ruptura de la cadena de frío.
 - Empresas de transporte: que enfrentan el mismo riesgo en el mantenimiento de la temperatura.
- **En la comercialización:**
- Supermercados y pequeñas tiendas: que descartan productos imperfectos o "feos", o productos con etiquetado inteligente, debido a las preferencias de ciertos consumidores.
- **En el consumo:**
- Consumidores con bajos ingresos: que priorizan el precio sobre la sostenibilidad, ya que los productos ecológicos y más sostenibles con el medio ambiente son generalmente más caros que los productos desarrollados a mayor escala.

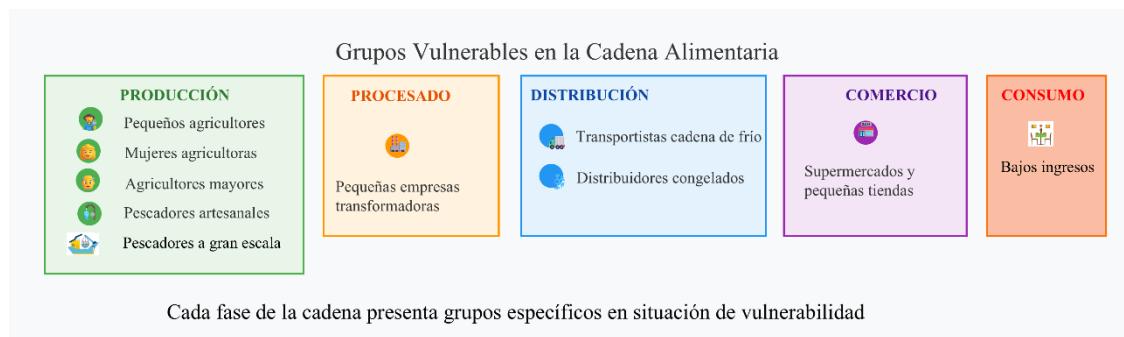


Figura 2. Grupos vulnerables en la cadena alimentaria

Además de lo anterior, desde el proyecto ZeroW se tiene en consideración la brecha digital como un factor que puede convertirse en una razón de exclusión social, especialmente para trabajadores poco cualificados. En este sentido, los productores agrarios (primer grupo en Figura 2) han sido identificados como grupos vulnerables ante el desarrollo digital y tecnológico.

3. MEDIDAS PROPUESTAS

El proyecto ZeroW propone distintas medidas para favorecer el cambio:

- Reforma del sistema de precios alimentarios ya que los alimentos se ven como mercancías para generar beneficio económico, no como bienes esenciales para la vida.

Se precisa la reforma del sistema de precios alimentarios mediante el cambio la percepción de la comida y el establecimiento de precios más justos que beneficien tanto a consumidores como a productores. Además, convendría (i) la creación de sistemas de inspección independiente para controlar la fijación de precios, (ii) la regulación de las devoluciones de productos no vendidos de las grandes superficies a los productores y (iii) la realización de un seguimiento más estricto de las prácticas comerciales desleales (Figura 3).

Transformación del Sistema de Precios Alimentarios

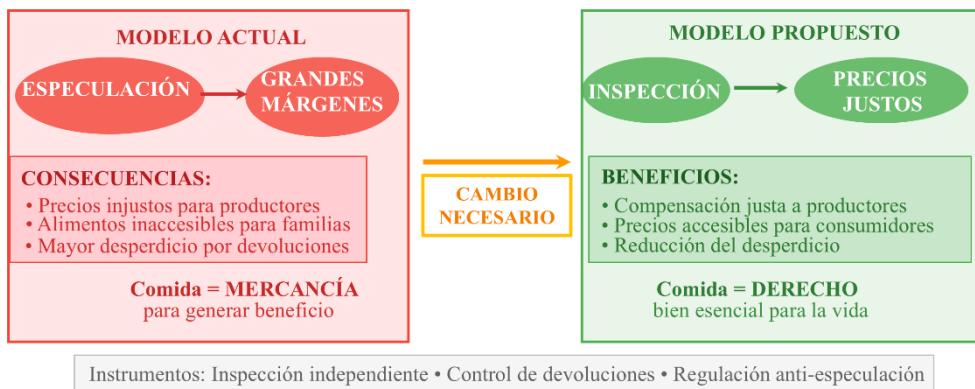


Figura 3. Transformación del Sistema de precios alimentarios

- Reducción de la cadena de suministro.

El modelo de suministro de alimentos actual favorece a las grandes empresas, siendo los intermediarios los principales beneficiados de la inflación de costes. El refuerzo del comercio de proximidad mediante espacios logísticos específicos supondría (i) un apoyo directo a pequeños productores y comercializadores, (ii) reduciría el impacto ambiental y (iii) fortalecería las economías locales. Ello precisaría una mayor inversión pública y un cambio de mentalidad de los productores.

- Innovación inclusiva y digitalización.

Se requiere la promoción de la digitalización a través de iniciativas económicas a largo plazo, mediante contenidos formativos elaborados en un lenguaje claro y sencillo y programas para superar el temor a compartir datos comerciales (Figura 4).

Proceso de Digitalización Inclusiva para el Sector Agroalimentario

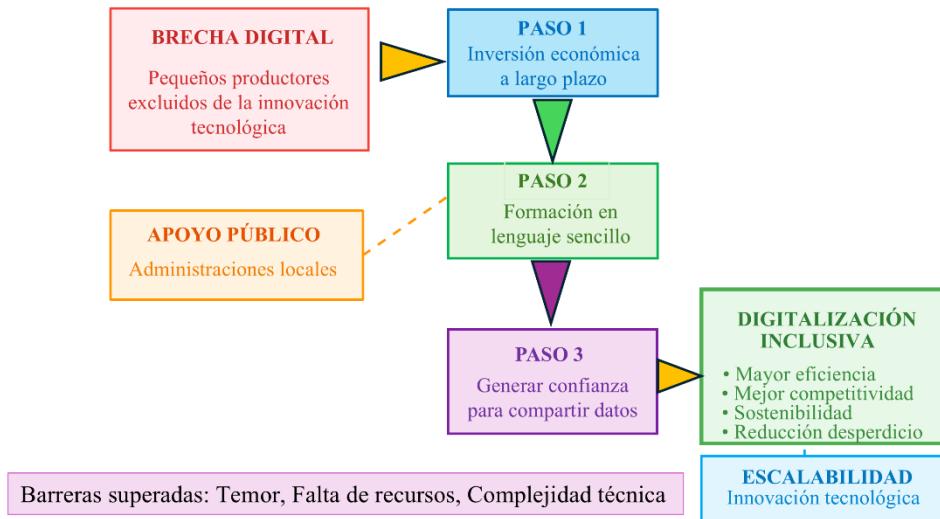


Figura 4. Proceso de digitalización inclusiva para el Sector Agroalimentario

- Impulso coordinado contra la PDA.

Resulta imperativo el desarrollo de una metodología homogénea de cuantificación de los alimentos que no terminan consumiéndose, así como la creación de infraestructuras de datos interoperables de acceso público. Ello permitiría realizar un seguimiento de la reducción de la PDA más preciso, el establecimiento de objetivos de reducción más realistas y el desarrollo de un marco normativo mejor direccionado a la resolución del problema y en el que se establezcan incentivos realistas ante la reducción de la PDA, con controles antifraude (Figura 5).

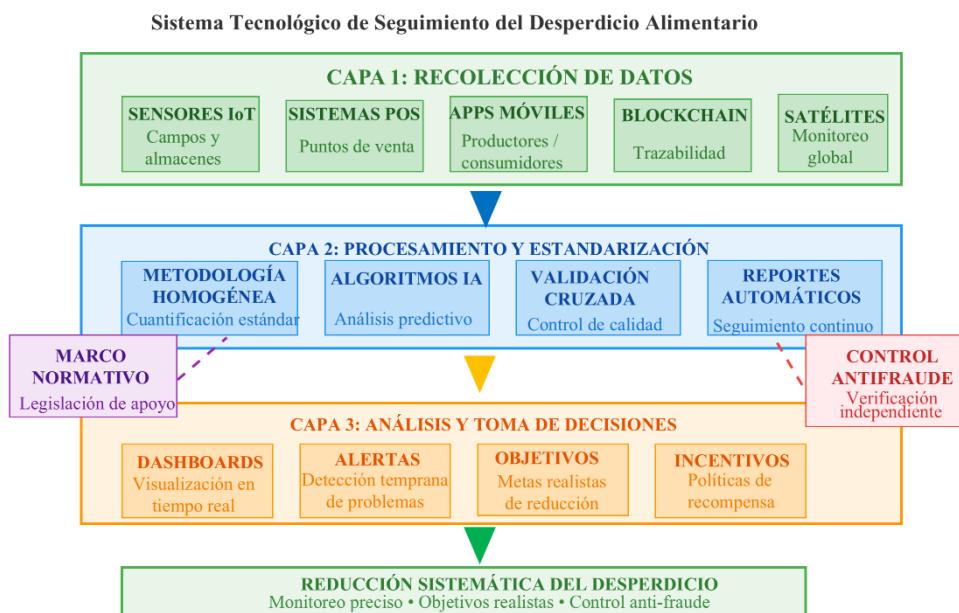


Figura 5. Sistema tecnológico de seguimiento del desperdicio alimentario

4. RETOS OPORTUNIDADES Y ENCAJE NORMATIVO DE LA TRANSICIÓN JUSTA

4.1 Retos en la comunicación

Problema del lenguaje técnico: La utilización de términos complejos puede dificultar la comprensión del proceso. Los productores agrarios, como actores clave en la fase de producción de alimentos, deben comprender qué va a cambiar, quién lo financia y cómo les beneficia.

Papel de la Política Agraria Común (PAC): La PAC constituye un instrumento fundamental y una oportunidad para suministrar los recursos económicos necesarios. El proyecto ZeroW, en una recomendación de políticas desarrollada en el marco del paquete de trabajo 8, propone reducir la estructura de la cadena de valor e incide en la importancia de apoyar económicamente, con fondos de la PAC y el Fondo Europeo de Desarrollo Rural (FEDER), a pequeños productores y empresas para el desarrollo de innovaciones tecnológicas contra la PDA (Turlea et al., 2025).

4.2 Viabilidad económica

Inversión requerida: Europa está apostando por esta transformación sustancial del modelo de producción y consumo de alimentos a medio y largo plazo, pero la inversión necesaria debe ser importante, y su seguimiento requiere una instrumentación muy precisa.

Mecanismo de Transición Justa (MTJ): La Comisión Europea ha destinado 17.500 millones de euros hasta 2050, pero este fondo tiene objetivos muy amplios (inversión en I+D, promoción de energías limpias, reciclaje y empleo) y no contempla directamente el problema de la PDA.

4.3 Cuestiones clave:

- ¿Es suficiente un fondo tan generalista para abordar un cambio tan ambicioso?
- ¿Qué porcentaje se destinará específicamente a la reducción de la PDA?
- ¿Complementarán los Estados miembros con fondos nacionales?

4.4 Marco normativo en España.

4.1.1 A nivel nacional:

Programa del Fondo de Transición Justa (2021-2027): Aprobado el 20 de diciembre de 2022 por la Comisión Europea a fin de "hacer posible que las regiones y las personas afronten las repercusiones sociales, laborales, económicas y medioambientales de la transición hacia los objetivos de la Unión para 2030 en materia de energía y clima". De acuerdo con la redacción de este objetivo, la práctica totalidad de los objetivos secundarios y presupuesto se centran en abordar asuntos climáticos y energéticos, haciendo una mención muy somera a la reducción del despilfarro de alimentos.

Ley 1/2025 de prevención de pérdidas y desperdicio alimentario:

Aprobada el 2 de abril de 2025. La única alusión a un proceso de transición en la Ley 1/2025 se produce en el preámbulo y la ciñe a la transición energética.

4.1.2 A nivel regional:

Andalucía ha incorporado a su ordenamiento el Programa del Fondo de Transición Justa de España 2021-2027, que cuenta con un presupuesto de 153,6 millones de euros destinado a "prestar apoyo a los territorios que se enfrentan a retos socioeconómicos graves derivados del proceso de transición hacia la neutralidad climática" (Junta de Andalucía, 2022).

Andalucía también cuenta con la Ley 3/2023, de 30 de marzo, de Economía Circular de Andalucía (LECA), que establece un marco normativo para impulsar la economía circular, la bioeconomía circular y el desarrollo sostenible en la comunidad autónoma, promoviendo la innovación, el empleo verde y la optimización de recursos a través de medidas legislativas y de planificación, como la Estrategia Andaluza de Bioeconomía Circular (EABC) y su Plan de Acción de Bioeconomía Circular en la Cadena de Valor Agroalimentaria 2025-2030.

La regulación de la transición justa en otras Comunidades Autónomas, como la Comunidad Valenciana, da un paso más en la identificación de grupos vulnerables. En este caso concreto, identifica a la población con menor renta como grupos especialmente vulnerables a este cambio sustancial de planteamiento ante los problemas de acceso a alimentos sostenibles que, por lo general, son más caros (Generalitat Valenciana, 2022).

5. CONCLUSIONES, NECESIDADES FUTURAS Y REFLEXIÓN FINAL

La transformación equitativa contra la PDA se perfila como un proceso ambicioso con importantes desafíos políticos, socioeconómicos y ambientales. Estos desafíos necesitan superarse mediante una instrumentación normativa homogénea, coordinada y participada por todos los agentes sociales.

5.1 Necesidades futuras

Queda un largo camino por recorrer para una transformación verdaderamente justa del sistema agroalimentario. Las administraciones europeas y nacionales deben:

5.1.1 Proporcionar apoyo financiero suficiente.

5.1.2 Crear partidas económicas específicas, en lugar de depender únicamente de fondos generalistas.

5.1.3 Desarrollar marcos normativos más concretos, que incluyan explícitamente la transición justa en el sector agroalimentario hacia la reducción de la PDA.

5.1.4 Asegurar la participación efectiva de todos los grupos vulnerables identificados.

5.2 Reflexión final

La dirección que marca Europa para la lucha contra la PDA es clara: debe ser un proceso inclusivo que no deje a nadie atrás. Sin embargo, la transición de la teoría a la práctica requiere una mayor concreción, un plan financiero específico y una voluntad política sostenida a todos los niveles.

Los resultados obtenidos en el proyecto ZeroW proporcionan una base sólida para situar el estado de la cuestión y avanzar, pero es fundamental continuar el trabajo de investigación, seguir trabajando en el desarrollo de políticas más concretas y con base científica para abordar una reducción efectiva de la PDA y, especialmente, construir consensos entre todos los actores involucrados.

REFERENCIAS

ASTUDILLO-PASCUAL, M., DEL RÍO, J.L., ORTIZ-SOMOVILLA, V., CANTOS-VILLAR, E., & DOMÍNGUEZ, I. (2025). Transición Justa: El enfoque clave para rediseñar el sistema agroalimentario. *Agricultura: Revista Agropecuaria* 1095, 80-81. ISSN 0002-1334.

<https://www.revistaagricultura.com/UploadedFiles/transicion-justa-informe.pdf>

HARRIS, D. R. (1989). An evolutionary continuum of people-plant interaction. En D. R. Harris & G. C. Hillman (Eds.), *Foraging and farming: the evolution of plant exploitation* (pp. 11–26). London: Routledge.

<https://doi.org/10.4324/9781315746425>

DE CARLUCCIO, A., GUILLOU, A., DORIGO-SALAMON, N., DESCHEPPER, M., ASTUDILLO-PASCUAL, M., TURLEA, A.L., & VAN DER WEERDT, C. (2025). D8.2. 'Just' transition pathway & intermediate targets. Work Package 8. ZeroW Project (Grant Agreement no. 101036388). No disponible aún a consulta pública.

DEL RÍO, J.L., ORTIZ, E., DOMÍNGUEZ, I., ORTIZ-SOMOVILLA, V., & CANTOS-VILLAR, E. (2024). Pérdida y desperdicio de alimentos: Uno de los grandes retos de la Economía circular. *International Journal of Circular and Sustainable Bioeconomy C3-BIOECONOMY* 4, 55-74. <https://doi.org/10.21071/c3b.vi4>

EEA. EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2023). Delivering justice in sustainability transitions. Briefing no. 26/2023. Recuperado de: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/delivering-justice-in-sustainability-transitions>

EESC. EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE (2024). A just transition to ensure a sustainable future for EU agri-food systems. Recuperado de: <https://www.eesc.europa.eu/en/our-work/opinions-information->

[reports/opinions/just-transition-ensure-sustainable-future-eu-agri-food-systems](#)

FAO. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA (2025). Co-generating pathways towards a just transition in agrifood systems. Recuperado de: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/68e130a3-73b4-4693-a5b0-8bf36fb73853/content>

GENERALITAT VALENCIANA (2022). Diagnóstico de la Estrategia de Transición Justa de la Comunitat Valenciana. Recuperado de: https://mediambient.gva.es/documents/163279113/373256703/Informe+ETJ+CV+170723_cast.pdf/36e11320-da20-908d-c27d-33b2537199bb?t=1694775212877

JUNTA DE ANDALUCÍA (2022). Programa del Fondo de Transición Justa de España 2021-2027. Recuperado de: https://juntadeandalucia.es/sites/default/files/inline-files/2025/08/Programa%20FTJ%20v3_2.pdf

JURGILEVICH, A., BIRGE, T., KENTALA-LEHTONEN, J., KORHONEN-KURKI, K., PIETIKAINEN, J., SAIKKU, L., & SCHOSLER, H. (2016). Transition towards Circular Economy in the Food System. *Sustainability*, 8(1), 69. <https://doi.org/10.3390/su8010069>

KALJONEN, M., KORTETMAKI, T., TRIBALDOS, T., HUTTUNEN, S., KARTTUNEN, K., MALUF, R.S., NIEMI, J., SAARINEN, M., SALMINEN, J., VAALAVUO, M., & VALSTA, L. (2021). Justice in transitions: Widening considerations of justice in dietary transition. *Environmental Innovation and societal Transition*, 40, 474-485. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2021.10.007>

MORENA, E., KRAUSE, D., & STEVIS, D. (Eds.). (2019). *Just Transitions: Social Justice in the Shift Towards a Low-Carbon World*. London: Pluto Press.

NEWELL, P., & MULVANEY, D. (2013). The political economy of the 'just transition'. *The Geographical journal*, 179 (2), 132-140.
<https://doi.org/10.1111/geoj.12008>

TRIBALDOS, T., & KORTETMAKI, T. (2022). Just transition principles and criteria for food systems and beyond. *Environmental Innovation and societal Transition*, 43, 244-256. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2022.04.005>

TURLEA, A.L., CELLO, L., ASTUDILLO-PASCUAL, M., CANTOS, E., RUIZ-SORIA, A.C., VAN DER WEERDT, C., DE CARLUCCIO, A., & GUILLOU, A. (2025). Policy Brief - Food Chain Structure (Shorter Food Supply Chains). Work Package 8. ZeroW Project (Grant Agreement no. 101036388). No disponible aún a consulta pública.

UNFCCC. UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (2016). Just transition of the workforce, and the creation of decent work and quality jobs. Recuperado de:
<https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Just%20transition.pdf>

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en los objetivos del proyecto Horizonte 2020 ZeroW (Systemic Innovations Towards a Zero Food Waste Supply Chain), financiado por el Programa Marco de Investigación e Innovación de la Comisión Europea 2014-2020 (H2020) mediante el Grant Agreement no. 101036388.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Pérdida y Desperdicio de Alimentos: Alimentos destinados al consumo humano que se descartan o desperdician en cualquier punto de la cadena alimentaria.

Transición justa: Proceso de cambio hacia la sostenibilidad que garantiza que los costes y beneficios se distribuyan de manera equitativa y que ningún grupo vulnerable sea perjudicado.

Grupos vulnerables: Actores del sistema alimentario que, por sus características (tamaño, recursos, ubicación, etc.), son más susceptibles de verse afectados negativamente por los cambios del sistema.

Cadena de suministro corta: Sistema de distribución que reduce el número de intermediarios entre productores y consumidores.

Brecha digital: Diferencia en el acceso y uso de tecnologías digitales entre diferentes grupos de población.

NOTA sobre el uso de lenguaje inclusivo a lo largo del presente artículo: En línea con la 'Guía para el uso de un lenguaje más inclusivo e igualitario', publicada por el Ministerio Justicia, la referencia al género masculino en algunos términos a lo largo del manuscrito (por ejemplo, 'agricultores') contempla los géneros masculino y femenino.



C3-BIOECONOMY
Circular and Sustainable Bioeconomy



Planta de Carbonización Hidrotermal de la Ciudad de México: Tecnologías alternativas para el manejo de residuos orgánicos en países en vías de desarrollo

Gustavo Adolfo Gutiérrez-Fernández¹, Daniel Camarena² y Luis
Álvarez-Icaza³

Autor de Correspondencia: g.gutierrez.f@g2e.mx

Resumen:

Ante el incremento en la generación de residuos a nivel mundial, y particularmente en los países en desarrollo, resulta crucial implementar tecnologías que permitan dar un manejo ágil a la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), no solo con la intención de recuperar nutrientes y/o un posible combustible, sino para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a manejos inadecuados, insuficientes o inexistentes. La Planta de Carbonización Hidrotermal de la Ciudad de México (PCH-CDMX) es un proyecto de vanguardia con la misión de brindar a la CDMX una alternativa viable y de alto valor para el manejo de la FORSU. El desarrollo de la Fase I de la PCH-CDMX ha demostrado ser un éxito para la difusión no solo del propio proyecto, sino de la carbonización hidrotermal y su potencial técnico, energético, social y ambiental, tanto a nivel nacional como internacional. Uno de los principales retos de la tecnología radica en la creación de los mercados que permitan dar salida al hidrocarbón en mercados afines como la agricultura, la restauración de suelos, la industria, etc.

Palabras clave: Carbonización Hidrotermal (HTC), Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), Hidrocarbón (hydrochar); Manejo de residuos en países en vías de desarrollo, Planta de Carbonización Hidrotermal de la Ciudad de México (PCH-CDMX)

Mexico City Hydrothermal Carbonization Plant: Alternative technologies for the management of organic residues in developing countries

Gustavo Adolfo Gutiérrez-Fernández¹, Daniel Camarena² and Luis
Álvarez-Icaza³

Abstract:

Given the increasing generation of waste worldwide, and particularly in developing countries, it is crucial to implement technologies that enable an agile management of the organic fraction of

¹ G 2 E, S.A.P.I. de C.V. (México), g.gutierrez.f@g2e.mx

² G 2 E, S.A.P.I. de C.V. (México), dc@g2e.mx

³ Instituto de Ingeniería, UNAM (México), alvar@pumas.iingen.unam.mx; 0000-0001-9516-3950

municipal solid waste (OFMSW), not only with the aim of recovering nutrients and/or a potential fuel, but also to reduce greenhouse gas emissions associated with inadequate, insufficient, or nonexistent waste handling practices. The Mexico City Hydrothermal Carbonization Plant (PCH-CDMX) is a cutting-edge project whose mission is to provide Mexico City with a viable and high-value alternative for managing its OFMSW. Phase I of PCH-CDMX has proven successful in disseminating not only the project itself, but also hydrothermal carbonization technology and its technical, energetic, social, and environmental potentials at both the national and international levels. One of the main challenges of the technology lies in developing the markets that will allow hydrochar to be placed in compatible sectors such as agriculture, soil restoration, industry, and others.

Key Words: Hydrothermal carbonization (HTC), Organic fraction of the municipal solid waste (OFMSW), Hydrochar, Waste management in developing countries; Mexico City Hydrothermal Carbonization Plant (PCH-CDMX)

1. INTRODUCTION

Waste on the global scale is expected to reach 3.4 billion tonnes per year by 2050, of which 44 % is estimated will be organic (1.5 billion tonnes; Kaza et al., 2018), with emissions reaching 2.6 billion tonnes of CO₂e (R. Singh, 2023; UNEP & C&CAC, 2021). Inhabitants in developing countries, where disposal in landfills and open dumps is the norm and residue burning is common (Ferronato & Torretta, 2019), are disproportionately affected by the health and environmental problems caused by these inadequate practices. As population and the degree of urbanization increase, pressure over MSW management systems is expected to increase as well (Kumari & Raghubanshi, 2023; Maalouf & Agamuthu, 2023).

In Mexico, around 70 % of MSW is sent to landfills and open dumps (PROFEPA, 2022). One of the goals of the current Mexico Plan (Plan México; Gobierno de México, 2024) is to increase environmental sustainability by promoting investment in clean energy, solid waste management systems, and actions with community impact. Mexico City was estimated to generate around 12,500 tonnes of MSW per day in 2023, with 56 % of it (7,000 tonnes) comprised by OFMSW. The Bordo Poniente Composting Plant (PC-BP) was proposed as a solution to manage this material; however, over 70 % of the total production has historically accumulated within PC-BP (AGIR-CDMX, 2024; SEDEMA-CDMX, 2021a, 2022, 2023, 2024), reaching approximately 1.25 million m³ of stored OFMSW-derived material generating methane (CH₄) emissions as shown in Figure 1 (AGIR-CDMX, 2024).

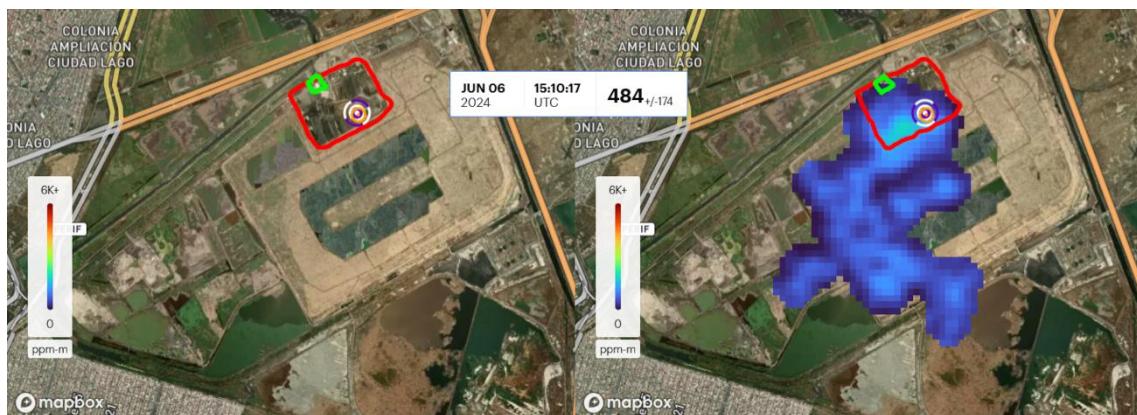


Figure 1 - PC-BP site and overlay of methane plume (blue). Origin of plume is the orange point encircled in purple, PC-BP outlined in red, PCH-CDMX outlined in green. Source: Adapted from Carbon Mapper (Carbon Mapper, Inc., n.d.).

The Integrated Waste Management Program for Mexico City 2021-2025 (Programa de Gestión Integral de Residuos para la Ciudad de México 2021-2025) contemplates the continued operation and future expansion of the Mexico City Hydrothermal Carbonization Plant (PCH-CDMX) as one of its key actions (AGIR-CDMX, 2024; SEDEMA-CDMX, 2021b).

Hydrothermal Carbonization (HTC) is a process that transforms high-moisture biomass into a carbon-rich solid called “hydrochar” with various possible uses from soil amendment to substitute for coal. Hydrothermal carbonization does not require dry material as it takes place under pressurized aqueous conditions. Several experiments have been conducted that showed benefits arising from hydrochar application on soils of various characteristics and under several crops (Huang et al., 2023); however, large-scale implementation remains scarce.

The difficulties inherent to establishing an adequate MSW/OFMSW management strategy provide an opportunity for the HTC technology to be implemented as part of waste management strategies in Mexico and in other developing countries. Through HTC-based management, health, environmental and societal impacts of an inadequate waste management are addressed. Although PCH-CDMX was intended to manage organic waste, large-scale hydrochar production represents a great potential for the recovery of nutrients, the production of carbon-rich soil amendments, and the decarbonization of coal-consuming industries.

Phase I of PCH-CDMX ($19^{\circ} 27' 36.56''$ N, $99^{\circ} 01' 16.51''$ W), consisting of an industrial pilot plant with one 72-tonnes-per-day HTC module, finished construction in 2023 and has been operating in staged increases. Phase II, scheduled to begin front-end engineering and design (FEED) in 2027, comprises ten additional HTC modules and represents the first approach to large-scale replication of the HTC technology for OFMSW management in Mexico, and likely one of the first and largest in the world (Farru et al., 2024).

2. DEVELOPMENT OF THE INNOVATION EXPERIENCE

By 2018, the shortcomings of composting at PC-BP had become apparent in the form of over one million cubic meters of accumulated and piled-up OFMSW (Figure 2). With the intention of reducing greenhouse gas emissions from PC-BP, then Mexico City Mayor, now President, Dr. Claudia Sheinbaum approached the National Autonomous University of Mexico's Institute of Engineering (IINGEN-UNAM) with the objective of exploring alternatives for the management of Mexico City's OFMSW. Together, IINGEN-UNAM and G 2 E, S.A.P.I. de C.V. (G 2 E) concluded that the most robust and strategically sound option would be Hydrothermal Carbonization. The overall PCH-CDMX project was designed as a 36-HTC-module facility; however, the decision was made to divide the project into four Phases and begin with a single pilot plant with a 72-tonne-per-day HTC module. Through a long-standing strategic alliance between IINGEN-UNAM, a renowned and storied institution, and G 2 E, a technical and dynamic company, but considerably small, funds for the project were secured from the Federal Government's Ministry of Energy (Secretaría de Energía, SENER) through its Fund for Energy Transition and Sustainable Energy Use (Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía, FOTEASE). Established in 2008, FOTEASE is a public trust fund created to further the adoption of clean and sustainable energy to reduce reliance on hydrocarbons, and to increase energy use efficiency (SENER, 2016, 2025).



Figure 2 - OFMSW accumulation. Source: Authors' own elaboration.

The location of PCH-CDMX was to be within the grounds of PC-BP. Deploying the infrastructure where the separately-collected OFMSW is already received precluded the need to develop new transport networks and avoided affectations in other areas of the city. By locating the facility within this already heavily-and-historically-impacted site, any negative impacts from process water or gases, however unlikely given the comparatively small scale of Phase I, were negated while the opportunity to assess the best technical solutions to extract value from nutrient-rich process water and to neutralize process gases, mainly CO_2 , was enabled.

Originally, a 25-tonne-per-day wood-fed gasification module would provide the fuel to generate electricity for the facility and heat for the HTC process. However, challenges arose that made the use of gasification inviable, requiring an immediate and cost-effective alternative. Being adjacent to the once largest landfill in Latin America, the former Bordo Poniente Landfill, PCH-CDMX was able to tap into the existing landfill gas (LFG) collection infrastructure which has mostly been used to flare LFG to avoid CH_4 emissions.

The Mexico City Hydrothermal Carbonization Plant was conceived not only as a disruptive demonstration of alternative OFMSW-management technologies, but also as a demonstration of social inclusion in personnel, and as a nexus to further research, education, and interest in STEM areas. By hosting visits from stakeholders across multiple sectors and levels, PCH-CDMX aims to disseminate information on HTC, its viability as an OFMSW-management strategy, and the vast possibilities that the adoption of hydrochar holds as a biogenic soil

amendment for soil improvement and a coal-substitute for industrial decarbonization. By holding visits from students and researchers, PCH-CDMX contributes to the education of future stakeholders that they may be better prepared to provide solutions for agriculture, alternative fuels, and waste management, and to foster research on novel topics by providing a plentiful source of industrially produced hydrochar.

As a core part of their commitment to increase accessibility to employment for people suffering from scarce formal education and employment opportunities, IINGEN-UNAM, G 2 E, and PCH-CDMX perform extensive work on training programs assisted by augmented and virtual reality (AR and VR). By using detailed digital twins in an AR/VR environment, the trainee will be able to interact with a faithful digital representation of the plant and train on operative procedures with safety. Additionally, an always-available AR assistant will allow personnel to access interactive AR demonstrations that guide them through various procedures in real time, enabling a deep understanding of the information, consequently increasing access to employment opportunities, proficiency at work, and the overall safety of the installation.

3. RESULTS

Despite its size (72 tonnes per day of OFMSW), the impact Phase I of PCH-CDMX has achieved technically, socially, and politically, and the lessons it has provided, far exceed expectations.

From a funding perspective, PCH-CDMX demonstrates how strategic alliances with renown technical institutions allow small companies with disruptive proposals to access funds usually reserved for larger companies; also, continued financial support from the Federal Government has demonstrated how governmental commitment to spear-tip disruptive and innovative projects steadily contributes to the crystallization of novel alternatives to solve historical difficulties through high-value solutions. Additionally, Phase I showed how the characteristic agility of small companies allowed the team to face unexpected challenges through all deployment stages with speed and flexibility. From a feasibility standpoint,

Phase I demonstrated how technical understanding in the authorities and political will invested in seeing the project through are required to execute a disruptive project based on locally unproven and unavailable technology.

Most previous industrial HTC infrastructure was designed to process sewage sludge. When first conceived and built (2018 - 2023), Phase I of PCH-CDMX was amongst the first facilities in the world built to process OFMSW in one of the largest HTC reactors in the world. It was also the first time both HTC and gasification coexisted as part of an integral design (Farru et al., 2024). As gasification proved inviable, the adoption of LFG as an energy source represents the inclusion of another low-carbon technology, proving the flexibility and capacity to exploit various alternatives that HTC facilities present. The general process of the facility is presented in Figure 3. Figures 4 and 5 show the inside and outside of the facility.

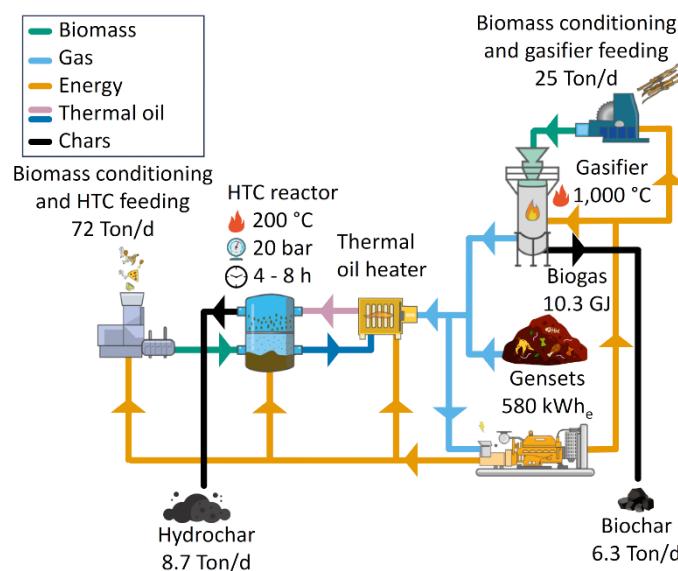


Figure 3 - General process flow diagram, PCH-CDMX Phase I. Source: Author's own elaboration.



Figure 4 - Inside view of PCH-CDMX. Source:
Author's own elaboration.



Figure 5 - Outside view of PCH-CDMX. Source:
Author's own elaboration.

As operation ramped up during the past two years, several operational challenges have been identified with many of them successfully addressed, increasing operational safety, process throughput from less than 1 tonne per hour to 2.3 tonnes per hour, and extending the continuous operation from one week to over three weeks. Other operational challenges, of which complexity and cost are higher, have been designed and will be implemented during the Phase II expansion. In parallel, substantial expertise in a previously unavailable technology in Latin America has been acquired, both in engineering and operation. Amongst the solutions yet to be implemented, a highly robust and automatized biomass conditioning system able to receive raw MSW and output clean, pumpable material will be deployed as part of Phase II, further increasing system throughput and lifespan.

Hydrothermal carbonization has achieved broad visibility through Phase I of PCH-CDMX through on-site visits, appearances in the media, and presence in national and international fora that have reached thousands of people. Phase I of PCH-CDMX has hosted over 150 visits featuring international delegations including the European Union, the Italian Embassy to Mexico, GGGI, and USAID; diplomats such as former US Ambassador to Mexico, Ken Salazar; national and foreign research universities including Oxford, MIT, UNAM, and the National Polytechnic Institute (IPN); national chambers of industry such as CONCAMIN; private sector entities including Holcim, Bimbo, and Mitsui & Co.; and multilateral

development banks such as IDB and the World Bank. The project and related research have been presented in fora such as Biochar III (Tomar, Portugal; Gutiérrez-Fernández et al., 2023a, 2023b), Rhizosphere 6 (Edinburgh, Scotland; Espinosa-Hernandez et al., 2025a, 2025b), and the "Biochar, alternative for the sustainable management of soil" held in 2025 in Mexico City jointly organized by the Institutes of Geology (IGL-UNAM) and Engineering of UNAM, the University Program on Interdisciplinary Studies on Soil (PUEIS-UNAM), and the International Biochar Initiative (IBI), with Professors Johanes Lehmann from Cornell University and Stephen Joseph from the University of New South Wales as special guests (DGCS-UNAM, 2025). Instances of academic collaborations focusing on hydrochar application on soil include ongoing PhD projects and professional research in the College of Postgraduates (COLPOS), the International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT), and IGL-UNAM. Of particular interest have been the visits of President Claudia Sheinbaum, which generated a great deal of media coverage and video tours of the facility (Gobierno de la Ciudad de México, 2023).

Although work remains to be done, dissemination and experimentation are setting the conditions that will enable the creation of currently non-existent markets to unload hydrochar production, which is particularly relevant as the ten-fold expansion of Phase II begins working on FEED. Large-scale field demonstrations of hydrochar soil amendment in collaboration with the Ministry of Agriculture of the State of Mexico and encompassing eight types of crops and over ten producers, are being planned to validate the results observed in greenhouse and to certify hydrochar as an effective and officially-approved biogenic soil amendment.

4. CONCLUSIONS

Phase I of PCH-CDMX shows the synergy achievable when the private sector, academia, and government collaborate on well-grounded solutions built on a shared understanding of the project's needs, constraints, and opportunities.

The philosophy behind the phased implementation of the PCH-CDMX project has allowed unforeseen operational challenges to be addressed which would have jeopardized the viability of the project if multiple modules had been built at once.

Given Phase I's size, current actual environmental and operational impacts are small. This notwithstanding, the far-reaching impacts it has achieved on technical, social, academic, political, and economic areas will be the foundation upon which future HTC projects will draw to facilitate adoption and reduce execution costs and timelines. Facility performance continues to improve, and the insights gained steadily strengthen the HTC proposal developed by IINGEN-UNAM and G 2 E, further demonstrating HTC's potential as an OFMSW management strategy and a source of industrial hydrochar.

It is fundamental, however, to not lose sight of the fact that the problem, that is OFMSW management, is not over once the organics have been transformed into hydrochar; to truly achieve viability and financial self-sufficiency, the markets to absorb production must be not only explored, but more likely than not, created, which implies a deep interaction between project executors and potential public and private stakeholders and market channels where value for the material might be found.

REFERENCES

- AGIR-CDMX. (2024, June). Personal communication. Agencia de Gestión Integral de Residuos de La Ciudad de México - El Segundo Piso de La Transformación de Los Residuos.
- Carbon Mapper Inc. (n.d.). Carbon Mapper. Retrieved December 4, 2025, from <https://data.carbonmapper.org/#1.24/30.8/50.5>
- DGCS-UNAM. (2025). Biocarbón, alternativa para el manejo sostenible del suelo. https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2025_247.html
- Espinosa-Hernandez, V., Espinosa-Gonzalez, J., Perez-Moreno, J., San Martin, C., Guadarrama-Santana, A., De Jesus-Mendoza, A., Maldonado, M. del C., & Gutiérrez-Fernández, G. A. (2025a). Impact of hydrocarbon in root system of Phaseolus vulgaris using the Rhizotron of dual Chamber. *Rhizosphere* 6: Rooting for Earth, 110.
- Espinosa-Hernandez, V., Espinosa-Gonzalez, J., Perez-Moreno, J., San Martin, C., Guadarrama-Santana, A., De Jesus-Mendoza, A., Maldonado, M. del C., & Gutiérrez-Fernández, G. A. (2025b). Nutritional evaluation of Hydrocarbon on White Maiz (Zea mays), using Rhizotron of dual chamber. *Rhizosphere* 6: Rooting for Earth, 219.
- Farru, G., Scheufele, F. B., Moloeznik Paniagua, D., Keller, F., Jeong, C., & Basso, D. (2024). Business and Market Analysis of Hydrothermal Carbonization Process: Roadmap toward Implementation. *Agronomy*, 14(3), 541. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030541>
- Ferronato, N., & Torretta, V. (2019). Waste Mismanagement in Developing Countries: A Review of Global Issues. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(6), 1060. <https://doi.org/10.3390/ijerph16061060>

Gobierno de la Ciudad de México. (2023). Recorrido en la Planta de Carbonización Hidrotermal. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=uDpobDj1xF4>

Gobierno de México. (2024). Plan México - Estrategia de Desarrollo Económico Equitativo y Sustentable para la Prosperidad Compartida (Primer borrador).

Gutiérrez-Fernández, G. A., Álvarez-Icaza, L., Camarena, D., & Siebe, C. (2023a). An Exploration into Large-Scale Hydrochar Production and Application: Effects, Evolution and C Permanence. In F. Berruti, D. Chiaramonti, S. Fiore, M. García-Pérez, & O. Masek (Eds.), Bio-Char III: Production, Characterization and Applications. Engineering Conferences International.

Gutiérrez-Fernández, G. A., Álvarez-Icaza, L., Camarena, D., & Siebe, C. (2023b). The Mexico City hydrothermal carbonization plant - An alternative for the management of the organic fraction of the municipal solid waste (OFMSW) in urban areas. In F. Berruti, D. Chiaramonti, S. Fiore, M. García-Pérez, & O. Masek (Eds.), Bio-Char III: Production, Characterization and Applications. Engineering Conferences International.

Huang, J., Feng, Y., Xie, H., Wu, P., Wang, M., Wang, B., Zhang, Q., Zhang, S., & Liu, Z. (2023). A bibliographic study reviewing the last decade of hydrochar in environmental application: history, status quo, and trending research paths. *Biochar*, 5(1), 12. <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00210-4>

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). At a Glance: A Global Picture of Solid Waste Management. In *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Urban Development Series (pp. 17–38). World Bank.

Kumari, T., & Raghubanshi, A. S. (2023). Waste management practices in the developing nations: challenges and opportunities. In P. Singh, P. Verma, R. Singh, A. Ahamad, & A. C. S. Batalhão (Eds.), *Waste Management and Resource Recycling in the Developing World* (pp. 773–797). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90463-6.00017-8>

Maalouf, A., & Agamuthu, P. (2023). Waste management evolution in the last five decades in developing countries – A review. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 41(9), 1420–1434. <https://doi.org/10.1177/0734242X231160099>

PROFEPA. (2022). Día mundial del reciclaje - El consumo voraz de los recursos naturales es de tal magnitud que se necesitarían 1.7 planetas más para atender la demanda actual de recursos. Procuraduría Federal de Protección Al Ambiente. <https://www.gob.mx/profepa/articulos/dia-mundial-del-reciclaje-302147?idiom=es#:~:text=De los millones de toneladas,al mezclarlo pierde su valor.>

SEDEMA-CDMX. (2021a). INVENTARIO DE RESIDUOS SÓLIDOS DE LA CIUDAD DE MEXICO 2020.

SEDEMA-CDMX. (2021b). PROGRAMA DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS PARA LA CIUDAD DE MÉXICO - PGIR 2021 - 2025.

SEDEMA-CDMX. (2022). INVENTARIO DE RESIDUOS SÓLIDOS DE LA CIUDAD DE MÉXICO 2021.

SEDEMA-CDMX. (2023). INVENTARIO DE RESIDUOS SÓLIDOS DE LA CIUDAD DE MEXICO 2022.

SEDEMA-CDMX. (2024). INVENTARIO DE RESIDUOS SÓLIDOS DE LA CIUDAD DE MÉXICO 2023.

SENER. (2016). Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía: INFORME CERO, 2009 - 2015.
<https://www.gob.mx/sener/articulos/el-fondo-para-la-transicion-energetica-y-el-aprovechamiento-sustentable-de-la-energia-es-un-instrumento-de-politica-publica-de-la-secretaria>

SENER. (2025). INFORME SIETE DEL Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía.
<https://www.gob.mx/sener/articulos/el-fondo-para-la-transicion-energetica-y-el-aprovechamiento-sustentable-de-la-energia-es-un-instrumento-de-politica-publica-de-la-secretaria>

Singh, R. (2023). Indian waste sector's contribution to GHG emissions. In A. Jain (Ed.), METHANE EMISSIONS FROM OPEN DUMPSITES IN INDIA - Estimation and mitigation strategies (pp. 1–86).

UNEP, & C&CAC. (2021). SOURCES OF METHANE. In Global Methane Assessment - Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions (p. 173).
<https://www.unep.org/resources/report/global-methane-assessment-benefits-and-costs-mitigating-methane-emissions>