



PERSPECTIVAS DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

ISSN: 2683-3107



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA

ENERO - JUNIO 2024

*Edición
especial*

DIRECTORIO

Dra. Silvia Amaya Llano

RECTORA

Dr. Rolando Javier Salinas García

SECRETARIO ACADÉMICO

Dr. Manuel Toledano Ayala

SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y
POSGRADO

Lic. Diana Rodríguez Sánchez

DIRECTORA DEL FONDO EDITORIAL UNIVERSITARIO

Dra. María de la Luz Pérez Rea

DIRECTORA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa

JEFE DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA

MDI Jorge Javier Cruz Florín

COORDINADOR DEL DESPACHO DE

PUBLICACIONES FACULTAD DE INGENIERÍA

Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología, enero-junio 2024, es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas, s/N, Col. Las Campanas, Querétaro, Qro., C. P. 76010, Tel. (442)1921200 ext. 6023, <http://revistas.uaq.mx/index.php/perspectivas>, perspectivasci@uaq.mx. Editores responsables: Juan Carlos Jáuregui Correa, Stephanie Virginia Camacho Gutiérrez, Christopher Alexis Cedillo Jiménez. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2021-81011485000-102, ISSN: 2683-3107, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número: Christopher Alexis Cedillo Jiménez, Cerro de las Campanas s/N, Col. Las Campanas, Querétaro, Qro., C. P. 76010, fecha de última modificación: 4 de marzo de 2024.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Se autoriza la reproducción total o parcial del contenido, siempre y cuando se atribuya la fuente y se proporcione un enlace al original. Esta obra está bajo Licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).

Esta revista está actualmente indizada en el Directorio de Latindex.



latindex



PERSPECTIVAS DE LA
CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

COMITÉ EDITORIAL

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa

Universidad Autónoma de Querétaro, México

DIRECTOR

Dr. Christopher Alexis Cedillo Jiménez

Universidad Autónoma de Querétaro, México

Dra. Stephanie Virginia Camacho Gutiérrez

Investigadora independiente, Estados Unidos

M. en C. Marco Antonio Cabrera Rufino

Universidad Autónoma de Querétaro, México

EDITORES RESPONSABLES

COMITÉ ASESOR CIENTÍFICO

Dr. Manuel Toledano Ayala

Universidad Autónoma de Querétaro, México

ÁREA: SISTEMAS EMBEBIDOS

Dra. Marcela Vargas Hernández

Universidad Autónoma de Querétaro, México

Facultad de Ingeniería

marcela.vargas@uaq.mx

ÁREA: BIOSISTEMAS Y BIOTECNOLOGÍA AGRÍCOLA

Dra. Mónica Ledesma Motolinía

Instituto de Física "Ing. Luis Rivera Terrazas" de
la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
México

ledesma@ifuap.buap.mx

ÁREA: FÍSICA E INGENIERÍA DE MATERIALES

Dra. Angélica Godínez Oviedo

Universidad Autónoma de Querétaro, México

Facultad de Química

angelica.godinez@uaq.edu.mx

ÁREA: MICROBIOLOGÍA E INOCUIDAD ALIMENTARIA

Dr. Saúl Tovar Arriaga

Universidad Autónoma de Querétaro, México

Facultad de Ingeniería

saul.tovar@uaq.mx

ÁREA: INTELIGENCIA ARTIFICIAL



EQUIPO EDITORIAL

Lic. Karla Guillén Mancilla

Universidad Autónoma de Querétaro, México

DISEÑO EDITORIAL

Sarahí Velasco Hernández

Universidad Autónoma de Querétaro, México

DISEÑO DE PORTADAS

Ing. Soid Ruiz Ramírez

Universidad Autónoma de Querétaro, México

Andrea Cristina Garza Sandoval

Universidad Autónoma de Querétaro, México

Martha Germana Gutiérrez Pacheco

Universidad Autónoma de Querétaro, México

Jean Marino Barrón Medrano

Universidad Autónoma de Querétaro, México

Myldret Ángeles Medina

Universidad Autónoma de Querétaro, México

Daniela Nañez Rodríguez

Universidad Autónoma de Querétaro, México

Victoria Mariana Ibarra Ríos

Universidad Autónoma de Querétaro, México

CORRECCIÓN DE ESTILO

Natalia Margarita Rendón Caballero

Universidad Autónoma de Querétaro, México

AUXILIAR DEL PROCESO EDITORIAL

The logo consists of the letters 'F1' in a bold, white, sans-serif font. The '1' is positioned to the right of the 'F' and is slightly smaller in height. The logo is set against a dark olive green background.

CONTENIDO

10. ESTRATEGIAS PARA IMPLEMENTAR PROCESOS SUSTENTABLES DE PRODUCCIÓN

Araceli Guadalupe Romero Izquierdo
Sergio Iván Martínez Guido
Efraín Quiroz Pérez
Claudia Gutiérrez Antonio

26. EL BAGRE ENDÉMICO (*ICTALURUS MEXICANUS*), ALTERNATIVA PARA LA ACUICULTURA EN LA SIERRA GORDA

Guillermo Abraham Peña Herrejón
Julieta Sánchez Velázquez
César Iván Hernández Pérez
Juan Fernando García Trejo
Eduardo Luna Sánchez

45. REVISIÓN DE LA FUNCIÓN DE LAS COMUNIDADES MICROBIANAS DEL SUELO A TRAVÉS DE LA GESTIÓN DE LA TIERRA Y COMPILACIÓN METODOLÓGICA AVANZADA

Gobinath Chandrakasan
Juan Fernando García Trejo
Humberto Aguirre Becerra
Enrique Rico García

63. REVALORIZACIÓN SUSTENTABLE DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES DE LA PRODUCCIÓN DE JITOMATE

Luis Fernando Monroy Garduño
María Andrea Andrade Gómez
Pedro Estrada Ortiz
Beatriz Itzel Baeza López
Eric Téllez Ojeda
Rubén Moreno Hernández
Claudia Gutiérrez Antonio
Sergio Iván Martínez Guido

83. ABUNDANCIA, CARACTERIZACIONES MOLECULARES Y PRODUCCIÓN MASIVA DE COMUNIDADES MICROBIANAS BENÉFICAS (NEMATODOS ENTOMOPATÓGENOS) DEL SUELO

Gobinath Chandrakasan
Juan Fernando García Trejo
Óscar Alatorre Jácome
Enrique Rico García

104. EFECTO DE LA LUZ EN LA PRODUCCIÓN DE *HERMETIA ILLUCENS*: REVISIÓN

Saúl López Juárez
Quilaztli Carolina Escobar Montoya
Juan Fernando García Trejo
Ana Angélica Feregrino Pérez
Benito Parra Pacheco
Humberto Aguirre Becerra

119. EFECTO DEL ELICITORES QUÍMICOS Y UN FÍSICO SOBRE LA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE Y ANTIMICROBIANA DE PIMIENTO

Ignacio Tovar Zamora
Ramón Gerardo Guevara González
Israel Macías Bobadilla
Rosario Guzman Cruz
Juan Manuel Vera Morales
Irineo Torres Pacheco
Marcela Vargas Hernández

140. SISTEMAS DE POLICULTIVOS CON ESPECIES ENDÉMICAS: ESTRATEGIA SOSTENIBLE PARA MEJORAR EL APORTE NUTRICIO A LA DIETA REGIONAL

Ana Patricia Arenas Salazar
Mark Schoor
Claudia Gutiérrez Antonio
Ana Angélica Feregrino Pérez

170. ORGANOLEPTIC AND QUALITY ASSESSMENT IN THREE BLACK CHERRY TOMATO VARIETIES

Josué Daniel Hernández Vega
Ixchel Parola Contreras
Juan Antonio Valencia Hernández
Erik Gustavo Tovar Pérez
Ramón Gerardo Guevara Gonzalez
Juan Fernando García Trejo
Rosario Guzmán Cruz

186. EFECTO DE ALIMENTO BALANCEADO CON INSUMOS ALTERNATIVOS SOBRE EL METABOLISMO AEROBIO DE TILAPIA DEL NILO

Mónica Vanessa Oviedo Olvera
Ana Angélica Feregrino Pérez
María Isabel Nieto Ramírez
Marta Montserrat Tovar Ramírez
Juan Fernando García Trejo

198. PRETRATAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS PARA LA ALIMENTACIÓN DE LA MOSCA SOLDADO NEGRA (HERMETIA LLUCENS): UNA REVISIÓN

Quilaztli Carolina Escobar Montoya
Saúl López Juárez
Benito Parra Pacheco
Humberto Aguirre Becerra
Juan Fernando García Trejo

216. AQUAPONIC SYSTEMS: A TOOL TO PROMOTE LOCAL CONSUMPTION AND TO CREATE A SUSTAINABLE IMPACT IN FAMILY GARDEN PRODUCTION

Mark Schoor

Ana Patricia Arenas Salazar

Guillermo Abraham Peña Herrejón

Enrique Rico García

240. ELABORACIÓN DE PELLETS COMBUSTIBLES A PARTIR DE BAGAZO DE AGAVE

Eliud Escudero Enríquez

Sergio Iván Martínez Guido

Oscar Daniel Lara Montaña

Claudia Gutiérrez Antonio

257. EVALUACIÓN DEL EFECTO ACARICIDA DE *PLECTRANTHUS SP.* MEDIANTE LA PRUEBA *IN VITRO* DE PAQUETE LARVAL (LPT) PARA EL CONTROL DE *RHIPICEPHALUS MICROPLUS*

Luis David Muñoz Contreras

Octavio Roldán Padrón

Iván Gómez Sánchez

Gabriela Aguilar Tipacamú

Alma Rosa Martínez Ramos

272. INSECTOS COMO ALIMENTO Y PARA EL DESARROLLO DE UNA AGRICULTURA SOSTENIBLE

Ema Alejandra Ferruzca Campos

Ramón Gerardo Guevara González

Rosario Guzmán Cruz

ESTRATEGIAS PARA IMPLEMENTAR PROCESOS SUSTENTABLES DE PRODUCCIÓN

STRATEGIES TO IMPLEMENT SUSTAINABLE PRODUCTION
PROCESSES

Valeria Caltzontzin Rabell
Araceli Guadalupe Romero Izquierdo
Sergio Iván Martínez Guido
Efraín Quiroz Pérez
Claudia Gutiérrez Antonio*

Universidad Autónoma de Querétaro, México

**claudia.gutierrez@uaq.mx*



Abstract

To this day, the efforts of the international scientific community are aimed at achieving sustainable development. In this context, the United Nations has proposed seventeen goals, some of which are related to the industrial sector. Most productive enterprises were conceived under the concept of linear economics, where both resources and demand are vast. This paradigm has moved towards a circular economy, in which raw materials will maintain optimal conditions as long as possible to be reintegrated into the chain, and in turn will reduce the extraction of new materials. This article proposes a methodology to trace the route of industrial processes towards sustainability.

Keywords: energy integration, process intensification, optimization, industrial processes, sustainability, waste revaluation.

Resumen

Hasta nuestros días los esfuerzos de la comunidad científica internacional se encuentran orientados a lograr un desarrollo sostenible. En ese tenor, la Organización de las Naciones Unidas ha propuesto diecisiete objetivos, algunos relacionados con el sector industrial. La mayoría de las empresas productivas fueron concebidas bajo el concepto de economía lineal, donde tanto los recursos como la demanda son vastos. Este paradigma se ha encaminado hacia una economía circular, en la que las materias primas mantendrán condiciones óptimas el mayor tiempo posible para reintegrarse en la cadena, y a su vez permitirá reducir la extracción de nuevos materiales. En el presente artículo se propone una metodología que permita trazar la ruta de los procesos industriales hacia la sustentabilidad.

Palabras clave: integración energética, intensificación de procesos, optimización, procesos industriales, sostenibilidad, sustentabilidad, revalorización de residuos.



Introducción

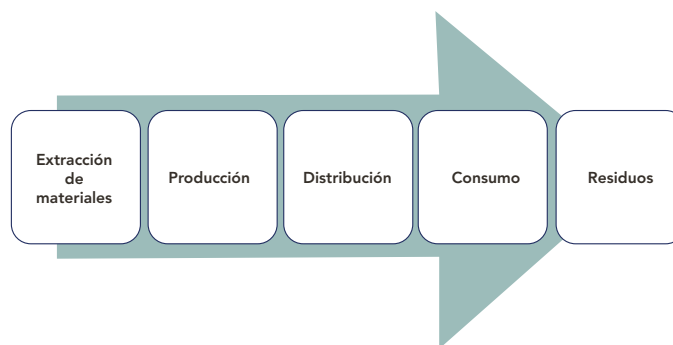
En las últimas décadas, se ha observado un constante crecimiento de los sectores económicos. De acuerdo con el Banco Mundial, el producto interno bruto (PIB) se incrementó 63 veces en el período de 1960 a 2019. Sin embargo, el crecimiento sostenido del PIB se detuvo en el año 2020, cuando disminuyó un 3 % a consecuencia del aislamiento social implementado durante la pandemia causada por el virus SARS-CoV-2 [1]. Dichas medidas cambiaron de manera abrupta la forma de estudiar, trabajar, adquirir mercancías e incluso de acceder a servicios médicos y actividades recreativas [2]. Desde esta perspectiva, las cadenas de suministro sufrieron graves afectaciones, provocando una catastrófica desestabilización en el suministro de insumos y la fabricación de productos. La Agencia Internacional de Energía, junto con el Banco Mundial, presentó un plan sustentable de recuperación económica [3] y delimitó las áreas donde se debe enfatizar la inversión para superar la recesión económica de manera sustentable. En ellas se propone invertir en fuentes de energía renovables, progreso energético, innovación en tecnologías con reducida huella de carbono, producción de biocombustibles y revalorización de residuos.

Sin duda las áreas definidas en este plan derivan del concepto de economía circular, el cual surge como una solución a los impactos de la producción y el consumo subordinados al modelo de economía lineal [4]. Tal

estándar considera que tanto la demanda de productos como las materias primas para generarlos son ilimitadas. Así pues, el objetivo es el constante incremento de la producción (Figura 1).

FIGURA 1.

Modelo de economía lineal.



Este modelo económico plantea que los productos generados se desechen una vez concluida su utilidad, o en su defecto, cuando un nuevo producto con mejores características se encuentre disponible. Si bien ha permitido el crecimiento sostenido de los sistemas de producción, también ha generado la pérdida de la biodiversidad, sobreexplotación de recursos naturales y acumulación de residuos [5]. Es por ello que la comunidad internacional ha comenzado una reevaluación del modelo de economía lineal y las consecuencias que acarrea, derivando en el nacimiento de los objetivos del desarrollo sostenible propuestos por la ONU [6].

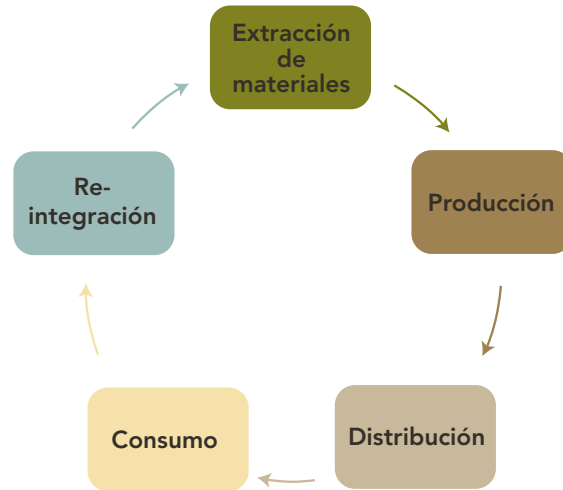


En el presente artículo se propone una metodología que permita trazar la ruta de los procesos industriales hacia la sustentabilidad. Este paradigma se ha encaminado hacia una economía circular, en la que las materias primas mantendrán condiciones óptimas el mayor tiempo posible para reintegrarse en la cadena.

Es natural que emerja una alternativa como el concepto de economía circular, el cual implica un cambio en la demanda de los productos. El nuevo modelo propone convertir bienes que se encuentren en su última etapa de vida útil en recursos para producir otros, lo que cierra ciclos y disminuye residuos [7]. De esta forma, los desechos no son el último eslabón, sino que estos se aprovechan para dar lugar a lo nuevo, al utilizar los recursos por el máximo tiempo posible. Adicionalmente, se implementan técnicas que permiten reinsertar los desechos en el mercado (Figura 2).



FIGURA 2.
Modelo de economía circular.



El modelo de economía circular es una alternativa promisoriosa y relativamente novedosa para aprovechar al máximo los recursos. Dentro de las estrategias de reintegración se incluye al reciclaje, revalorización, reparación y reducción [5]. Por ejemplo, la Figura 2 muestra una clara disminución en la extracción de nuevos materiales, debido a que, aunque los predecesores fueron catalogados como residuos, *a posteriori* fueron reinsertados para su nuevo uso.

La mayoría de los procesos productivos hallados en operación fueron concebidos para perpetuar la economía lineal. Debido a lo anterior, es necesario implementar estrategias que faciliten la organización de cadenas productivas sujetas al concepto de economía circular, lo cual brindará sustentabilidad a los procesos.

El presente artículo abordará estrategias viables en procesos de producción que se encuentren en funcionamiento, en aras de alinearlos al concepto de economía circular. Para ello se comenzará con la revisión de los conceptos de sustentabilidad y sostenibilidad. Posteriormente, se describirán los elementos que integran los procesos industriales; con base en ello se expondrán las metodologías estratégicas que pueden implementarse en son de convertirlos en procesos sustentables, a la postre alineados a los conceptos de economía circular y desarrollo sostenible.

Discusión

Sustentabilidad y sostenibilidad

En la actualidad hay dos conceptos en el idioma español que, en ocasiones, se emplean de manera intercambiable: *sustentable* y *sostenible*. De acuerdo con la Real Academia Española [8], el término *sustentable* es un adjetivo que denota la conservación del estado. Por otra parte, el vocablo *sostenible* gira en torno al mantenimiento de una entidad durante largos periodos de tiempo sin agotar los recursos ni agravar al medio ambiente [8]. Queda definido que ambos adjetivos se enfocan a la manutención o conservación, aunque solo el segundo hace hincapié en los recursos y medio ambiente. Ambos se aplican principalmente al sustantivo *desarrollo*, que implica la evolución de una economía encaminada a mejorar los niveles de vida, progreso o crecimiento en el ámbito social, cultural y económico [8].

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas, existen 17 objetivos para alcanzar el desarrollo sostenible, los cuales se presentan en la Figura 3.



FIGURA 3.

Objetivos de desarrollo sostenible propuestos por la Organización de las Naciones Unidas.

En la Figura 3 puede advertirse que los objetivos del desarrollo sostenible incluyen aspectos sociales, que no se enfocan únicamente a mantener o conservar el estado de los recursos. De ahí que el *desarrollo sustentable* se entienda como el principio que posibilita la fabricación de productos y servicios, siempre y cuando se mantenga un reducido impacto ambiental. Este principio sirve como cimiento para el desarrollo sostenible, el cual involucra aspectos sociales, como la cultura de paz, la erradicación del hambre, la igualdad de género, la salud y el bienestar. En síntesis, el primero contribuye al segundo.



En consecuencia, es de vital importancia contar con procesos sustentables de producción, es decir, que posibiliten generar productos, pero conservando los recursos naturales. Se trata desde luego de implementar estrategias que permitan una vasta sustentabilidad; acciones que desemboquen al concepto de economía circular y, al mismo tiempo, coadyuven al desarrollo sostenible. Una vez clarificados los conceptos de sustentabilidad y sostenibilidad, en la siguiente sección se continuará con los fundamentos de los procesos de producción.

Procesos de producción

Se trata de una serie de operaciones que transforman las materias primas con el objetivo de generar productos de mayor utilidad. Los eslabones involucrados en una cadena típica de producción se presentan de manera simplificada en la Figura 4.

FIGURA 4.

Diagrama simplificado de un proceso de producción.



En este apartado se puede observar que el proceso de producción es lineal, dado que ingresa y somete las materias primas a una serie unidireccional de operaciones de transformación para la obtención de productos. Existen etapas de reacción, separación, acondicionamiento y transporte de las corrientes del proceso —en las cuales se incluyen materias primas y productos intermedios o finales—. La Tabla 1 presenta las operaciones habituales de transformación fundamentadas en la clasificación anterior.

TABLA 1.

Operaciones de transformación.

REACCIÓN	SEPARACIÓN	ACONDICIONAMIENTO	TRANSPORTE
Reactores homogéneos	Destilación	Reducción de tamaño	Bombeo
Reactores heterogéneos	Evaporación	Mezclado	Transporte por bandas y cadenas
	Extracción líquido-líquido	Agitación	Compresión
	Extracción sólido-líquido	Intercambio de calor	
	Sedimentación	Humidificación	
	Absorción	Tamizado	
	Adsorción		
	Cristalización		

Las operaciones de reacción permiten la transformación química de las materias en productos, usualmente con ayuda de catalizadores. Por otra parte, las rutinas de separación permiten obtener productos de interés con elevadas purezas, y recircular los materiales inalterados, con el fin de generar procesos más rentables (sustentables). Los procedimientos de acondicionamiento posibilitan modificar la cantidad de energía de una corriente, o el tamaño de las materias primas. Por último, el transporte posibilita el movimiento de las corrientes de proceso entre las otras operaciones. De esta forma, en un proceso de producción las materias primas se convierten en productos de interés mediante una serie de operaciones de transformación ordenadas y consecutivas. Debido a la naturaleza de las materias primas, así como a las limitaciones termodinámicas de dichos procesos, es imposible convertir la totalidad de los insumos en productos.

Usualmente en estos procesos se generan los productos de interés, subproductos y mermas; en ésta última categoría se incluyen materiales no procesados, dañados, fuera de especificación y residuos. Por ejemplo, en la producción de jugo de naranja se desechan los frutos en mal estado (dañados), aquellos con bajo contenido de jugo (fuera de especificación), así como las cáscaras y semillas (residuos). Estos residuos en su mayoría son desechados o confinados con base en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos [9]. No obstante, pueden tratarse mediante diferentes estrategias para reintegrarse en el mercado, como el reciclado y la revalorización.

Sin importar el tipo de operación del que se trate, en todos los casos se requiere energía para llevarlo a cabo, que puede ser térmica o eléctrica. Esta última se obtiene de las centrales de generación eléctrica. En este sentido, las centrales pueden funcionar con una amplia gama de recursos, tanto renovables (radiación solar, corrientes de agua, corrientes de aire, biocombustibles, geotermia) como no renovables (combustible nuclear, carbón, gas natural).

Por otra parte, la energía térmica puede ser adicionada (mediante agua caliente, vapor de agua, aceite térmico) o retirada (mediante agua de enfriamiento o refrigerantes) de las corrientes de proceso. Para incrementar la temperatura se disponen algunos combustibles, tales como gas natural, combustóleo, diésel, carbón, pellets o biogás. En contraste, para reducir la energía térmica se emplea principalmente electricidad,



refrigerantes y agua. Finalmente, cada una de estas fuentes diverge en disponibilidad, precio, intermitencia, eficiencia y poder calorífico; de igual manera, las emisiones de dióxido de carbono, y por ende la huella de carbón, difieren entre las fuentes.

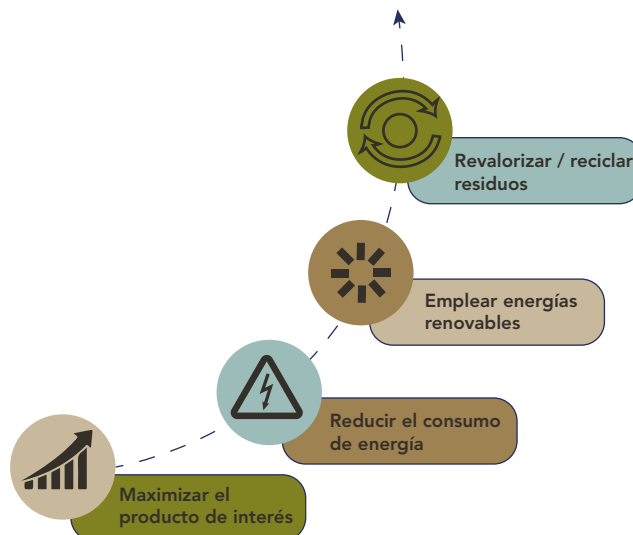
Los puntos anteriormente descritos son cruciales en los aspectos económico, ambiental y técnico de los procesos. En este caso, si se incrementa la producción, entonces los costos disminuyen. Por otro lado, si las mermas aumentan, la rentabilidad del proceso decae y su impacto ambiental se incrementa. En la siguiente sección se revisarán estos aspectos, a modo de integrar una metodología que permita incrementar la sustentabilidad de los procesos de producción, alineándolos así al concepto de economía circular.

Estrategias a implementar en procesos industriales

A partir de la información expuesta en las secciones previas, se presenta la siguiente metodología (Figura 5). El primer aspecto a abordar es la maximización del producto de interés, manteniendo constante flujo de materia prima.

Para ello son precisas herramientas de optimización y simulación adecuadas al caso específico; respecto a los procesos continuos, Aspen Plus™ es una de las más completas y robustas disponibles. En lo que respecta a la manufactura, Delmia™ representa una de las principales alternativas de simulación.

FIGURA 5.
Ruta rumbo a la sustentabilidad en los procesos industriales.



Una vez validado el modelo con los datos de producción, es posible implementar las siguientes estrategias a favor de maximizar la producción:

Realizar un análisis paramétrico de sensibilidad en el simulador de procesos, esto permitirá identificar las variables que afecten de manera significativa la generación del producto. A continuación, se ejecutarán cambios en dichas variables y se cuantificará su efecto en la cantidad de embarque generado, con el objetivo de evaluar las consecuencias de dichos cambios antes de implementarlos en el proceso real. Asimismo, dicho análisis puede acotarse a valores máximos o mínimos para cada uno de los equipos de proceso, con base en las especificaciones del proveedor. De este modo, es posible modificar las condiciones de operación de manera segura, conociendo de antemano una estimación confiable en los resultados esperados.

Implementar estrategias de optimización, las cuales pueden catalogarse en estocásticas o de programación matemática. En el caso de la segunda es importante disponer de un modelo matemático que permita describir el proceso, con el fin de implementarle solución. Para aplicar este tipo de optimización se sugieren modelos lineales, dado que garantizan la convergencia numérica de la solución. A su vez, es posible resolver problemas no lineales, sin embargo, en este caso, la búsqueda de valores iniciales influye de manera significativa en la solución del modelo. Por otra parte, las técnicas de optimización estocástica devienen de la naturaleza y destacan por su robustez, y por converger en la vecindad del óptimo; una de sus principales ventajas es que prescinde de la función matemática al momento de resolver un problema, y tampoco necesita que tanto las funciones como sus derivadas sean continuas. En el caso de la optimización matemática, su ventaja radica en el tiempo de cómputo, el cual es extremadamente reducido (en el orden de segundos o minutos), en comparación con los días o semanas necesarios para las técnicas de optimización estocástica.

Una vez ajustadas las condiciones del proceso para maximizar la cantidad de producto, deben enfocarse los esfuerzos en reducir el consumo de energía. Este aspecto se puede abordar mediante diversas estrategias:

El primer aspecto a revisar en este punto es la eficiencia energética del proceso, en términos de pérdida de energía tanto térmica como eléctrica. Debe auditarse el proceso para determinar y corregir los puntos de pérdida de energía, y así subsanar las deficiencias.



Como alternativa se sugiere la integración energética, la cual permite redirigir la energía disponible dentro del proceso para enfriar o calentar las corrientes del mismo. En esta estrategia se emplea, particularmente, la metodología del punto de pliegue, que permite identificar entre cuáles corrientes deben realizarse los intercambios de energía, para minimizar el uso de servicios externos de calefacción y refrigeración. Como resultado se teje una red de intercambio de calor en el proceso, que, si bien implica una inversión adicional, disminuye a largo plazo los costos de operación y, en consecuencia, el impacto ambiental asociado.

La intensificación de procesos posibilita reducir los requerimientos de energía, así como el tamaño de los equipos involucrados. Estos beneficios resultan de operar equipos con una mayor eficiencia en las tasas de transferencia de masa y calor, o bien, de la sinergia de dos o más operaciones unitarias. En este caso, se deben evaluar los equipos presentes en la operación, y analizar la posibilidad de modificaciones o reemplazos. Cabe mencionar que, a menudo, además de reducir la energía, los equipos intensificados incrementan la selectividad hacia el producto de interés y se obtienen diseños de procesos inherentemente más seguros y económicos debido al menor empleo de equipos de seguridad adicional. Es decir, la intensificación del proceso dará una reducción adicional en el costo final, ya que los equipos de menor envergadura son más asequibles.

Reducido el consumo de energía mediante la implementación de las estrategias antes mencionadas, los esmeros se enfocan hacia la adopción de energías renovables. A nivel industrial, algunos de los mecanismos para lograr este objetivo son los siguientes:

- Canales parabólicos para generar vapor de agua, el cual se empleará en el proceso industrial sin la necesidad de quemar combustibles fósiles.
- Turbinas que generen electricidad en caso de que amerite ajustar las corrientes de aire, en términos de la presión, o bien, si existen desfogues de gases calientes.
- Biocombustibles sólidos para satisfacer las condiciones de calentamiento de baja temperatura, comunes en las industrias. Este tipo de biocombustibles puede almacenarse con mayor facilidad y goza de precios competitivos.

- Biocombustibles líquidos y gaseosos para reemplazar las contrapartes de origen fósil. Pueden emplearse tanto en la operación de calderas, como en los motores de combustión interna y en el transporte de productos terminados.
- Paneles fotovoltaicos para satisfacer las necesidades de iluminación, así como de consumo de electricidad en las áreas administrativas de la empresa.

Tras maximizar la producción, reducir el consumo energético e incorporar energías renovables durante el proceso, el último eslabón concierne a la revalorización, reutilización y reciclaje de los residuos generados. Algunas de las estrategias son las siguientes:

- Recuperar de los residuos generados aquellos compuestos que puedan reutilizarse dentro del proceso a fin de disminuir la adquisición de nuevos insumos, minimizando los costos de operación, así como el impacto ambiental.
- Reciclar aquellos residuos que sean susceptibles, tales como vidrio, cartón, aluminio y plástico.
- Revalorizar los residuos clasificados como irreciclables e irrecuperables, para así generar nuevos productos que puedan insertarse en el mercado. Con ese objeto se dispone de tratamientos bioquímicos, termoquímicos, mecánicos, y biológicos. Los diferentes tratamientos amplían el rendimiento y costo; por ello, es importante analizar la gama de opciones y seleccionar aquellas con menos requerimientos de procesamiento. La estrategia expuesta aprovecha de manera integral los insumos del sector industrial y, en algunos casos, genera nuevos productos que posibilitan su participación en otros mercados.

Análisis de ciclo de vida

Las cadenas de manufactura de bienes causan impactos en las zonas de extracción de materia prima, producción, uso y desechado de los mismos. Por tanto, es menester realizar un análisis del ciclo de vida (ACV)



[10]. En ese sentido, se han adoptado diversas perspectivas, tales como el uso intensivo de datos, análisis de escenarios, flujo de materiales, entradas y salidas (AFM). La ventaja de estos métodos consiste en que ofrecen un panorama cercano a la realidad. Por ejemplo, el AFM busca escenarios donde el aprovechamiento simbiótico de los recursos sea idóneo a través de la evaluación de flujos de materiales en parques industriales. En el análisis de entradas y salidas se busca conocer el efecto de la simbiosis industrial en las cadenas de suministro mediante el modelado de comportamiento [10]. Las metodologías expuestas permiten identificar aquellos parámetros que distinguen la sostenibilidad de los procesos de producción y con ello ofrecer soluciones favorables.

Ecología industrial

Las estrategias antes mencionadas son aplicables para una empresa individual, aunque conjuntos de empresas o parques industriales pueden participar de las mismas acciones. La ecología industrial sugiere integrar las actividades actuales en un “ecosistema industrial”, donde los residuos o subproductos generados durante un proceso se aprovechen como entradas en otros [11]. Este concepto armoniza con la economía circular, dado que pretende maximizar el rendimiento de los recursos naturales y energía, al tiempo que minimiza el desperdicio.

Existen diversos puntos a considerar en su aplicación; por ejemplo, si los residuos de un parque industrial se comparten y reutilizan entre varias empresas, debe hacerse de manera integral. De lo contrario, se reciclarán fuera del parque, lo que aumentará el costo y complicará el proceso. Este nuevo sistema representa un cambio paradigmático que requiere más investigación acerca de sus implicaciones. Asimismo, se debe buscar que la recolección y transporte de los residuos sea eficiente. Para lograr ese objetivo es posible densificar los residuos; de ese modo, se consigue disponer de ellos en menos viajes.

Uno de los principales desafíos que este concepto presenta es la reticencia de las empresas a cooperar; en ese contexto, el gobierno y las políticas públicas juegan un papel clave, ya que se requieren regulaciones estrictas respecto a los residuos: si las políticas son estrictas, la participación de las empresas que reciclan sus residuos puede aumen-

tar. De la misma manera, se requiere incentivar en los consumidores la costumbre de adquirir productos reciclados, ya que esta actividad es vital para la transición. Un ejemplo de aplicación de las estrategias mencionadas en este trabajo es el Parque Ecoindustrial de Kalundborg, en Dinamarca [11].

Conclusiones

Los procesos industriales actuales pueden ajustarse al concepto de economía circular mediante las estrategias orientadas a maximizar el producto de interés, reducir el consumo energético, incrementar el uso de fuentes renovables y revalorizar los residuos. La metodología propuesta permite trazar una ruta ordenada para lograr el incremento en la sustentabilidad de dichos procesos, evaluando en cada punto el costo-beneficio. De esta manera, y con ayuda de herramientas como el análisis de ciclo de vida, el sector industrial puede contar con procesos cada vez más sustentables que contribuyan al desarrollo sostenible, no sólo de manera individual sino como un conjunto para lograr una simbiosis industrial.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero proporcionado por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro. Sergio Iván Martínez Guido agradece el financiamiento para el programa posdoctoral PRODEP otorgado por la Secretaría de Educación Pública, mediante el proyecto PRODEP-UAQ/332/19. Araceli Guadalupe Romero Izquierdo agradece el financiamiento para el programa posdoctoral del Conacyt mediante el proyecto 869445. Valeria Caltzontzin Rabell agradece el financiamiento del Conacyt para la realización de sus estudios de posgrado.



Referencias

- [1] WB. World Bank Data. (2022). *Domestic Product (current us\$)*. [En línea]. Disponible en: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.PIB.MKTP.CD>
- [2] P. Jiang, Y. V. Fan, y J. J. Klemeš. (2021, mrz. 01). *Impacts of COVID-19 on energy demand and consumption: Challenges, lessons and emerging opportunities*. *Applied Energy*, vol. 285. Doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116441
- [3] IEA. (2020, jun.). *Sustainable Recovery*. *World Energy Outlook Special report*. [En línea]. <https://www.iea.org/reports/sustainable-recovery>
- [4] J. R. J. Goddin. (2020, ene.). *Chapter 12-The role of a circular economy for energy transition*. Alena Bleicher, Alexandra Pehlken Eds., *The Material Basis of Energy Transitions*, AP., pp. 187-197. Doi: 10.1016/B978-0-12-819534-5.00012-X
- [5] Y. V. Fan, P. J. Jiang, M. Hemzal, y J. K. Klemeš. (2021, feb. 01). *An update of COVID-19 influence on wasted management*. *Science of The Total Environment*, vol. 754. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142014
- [6] I. Ari, y R. F. Yilmaz. (2019, dic.). *Chapter 4-Greening of industry in a resource and environment constrained world*. Sevil Acar, Erinċ Yeldan Eds., *Handbook of Green Economics*, Academic Press. Pp. 53-68. Doi: 10.1016/b978-0-12-816635-2.00004-3
- [7] W. R. Stahel. (2016,). *The circular economy*. *Nature*, vol. 531, pp. 435-438. <https://www.nature.com/articles/531435a>
- [8] RAE. Real Academia Española (2013): *Diccionario histórico de la lengua española (DHLE)*.
- [9] DOF. Diario Oficial de la Federación. (2023, oct. 08). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_180121.pdf
- [10] A. M. Walker, W. J. V. Vermeulen, A. Simboli, y A. Raggi. (2021, mzo. 01). *Sustainability assessment in circular inter-firm networks: An integrated framework of industrial ecology and circular supply chain management approaches*. *Journal of Cleaner Production*, vol. 286. Doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125457
- [11] X. Yu, e Y. Zhang. (2021, sep.). *An economic mechanism of industrial ecology: Theory and evidence*. *Structural. Change and*

Economic Dynamics., vol.
58, pp. 14-22. Doi: 10.1016/j.
strueco.2021.03.008



EL BAGRE ENDÉMICO (*ICTALURUS MEXICANUS*), ALTERNATIVA PARA LA ACUICULTURA EN LA SIERRA GORDA

THE ENDEMIC CATFISH (*ICTALURUS MEXICANUS*), AN
ALTERNATIVE FOR AQUACULTURE IN THE SIERRA GORDA

Guillermo Abraham Peña Herrejón*
Julieta Sánchez Velázquez
César Iván Hernández Pérez
Juan Fernando García Trejo
Eduardo Luna Sánchez

Universidad Autónoma de Querétaro, México

*guillermoaph7@gmail.com



Resumen

El bagre es un organismo de gran interés para la producción acuícola en México, cuya práctica se ha extendido a regiones como la Reserva de la Biósfera Sierra Gorda. Actualmente, el *Ictalurus punctatus* es la especie de mayor producción, sin embargo, esta variedad representa un riesgo para la biodiversidad debido a su carácter invasor. Uno de los métodos para disminuir dicho impacto es la introducción a cultivo de especies nativas, tales como el bagre endémico *Ictalurus mexicanus* (bagre de Río Verde), especie con potencial acuícola que ha sido identificada en la Reserva.

El presente estudio se realizó con la finalidad de determinar la capacidad de crecimiento del bagre endémico en un cultivo acuícola. Con dicho propósito se llevó a cabo la adaptación de la especie al consumo de alimento comercial. En este sentido, luego de 8 meses de aclimatación y cultivo en un estanque acuícola, se determinaron el desempeño de su crecimiento, relación longitud-peso y factor de condición. Los resultados revelaron una supervivencia superior al 85 %, peso promedio fue de 385.7 ± 182.4 g, peso máximo de 764 g y longitud promedio de 27.8 ± 4.6 cm. Estos valores superan los máximos reportados previamente. A partir del crecimiento isométrico del bagre, así como del incremento de su factor de condición, es evidente el interés de continuar estudiando al *Ictalurus mexicanus*, pues se concluye que es una especie con alto potencial acuícola.

Palabras clave: acuicultura, bagre de Río Verde, especie alternativa, especie nativa, rendimiento del crecimiento, Reserva de la Biósfera.

Abstract

Catfish is an organism of great interest for aquaculture production in Mexico, which has spread to regions such as the Sierra Gorda Biosphere Reserve. Currently, the most produced species is *Ictalurus punctatus*; however, this species represents a risk to biodiversity due to its invasive nature. One of the methods to reduce this impact is the cultivation of native species, such as the endemic catfish *Ictalurus mexicanus* (Río Verde catfish), a species with aquaculture potential that has been identified in the reserve.

The present study was carried out to determine the growth capacity of the endemic catfish in aquaculture. For this purpose, the species was adapted to the consumption of commercial feed. In this sense, after 8 months of acclimatization and culture in an aquaculture pond, growth performance, length-weight ratio and condition factor were



determined. The results showed a survival rate higher than 85 %, average weight of 385.7 ± 182.4 g, maximum weight of 764 g and the average length of 27.8 ± 4.6 cm. These values exceed the maximums previously reported. Based on the isometric growth of the catfish, as well as the increase in its condition factor, the interest to continue studying *Ictalurus mexicanus* is justified, since it is concluded that it is a species with high aquaculture potential.

Keywords: aquaculture, Rio Verde Catfish, alternative species, native species, growth, performance, Biosphere Reserve.

Introducción

En 23 de los 32 estados mexicanos se llevan a cabo actividades acuícolas [1]. En el año 2021 se produjeron 351 002 toneladas de productos; ahora bien, el camarón fue el cultivo más abundante (214 546 toneladas con un valor de 15 330 millones de pesos), seguido de la mojarra (96 977 toneladas con un valor de 2588 millones de pesos) y el ostión (15 602 toneladas con un valor de 141 millones de pesos). El bagre se ubicó en el octavo lugar con un rendimiento de 1423 toneladas y una generación de 55 millones de pesos [1], [2]. Asimismo, los estados con mayor productividad de este cultivo fueron Sinaloa (320 toneladas), Michoacán (282 toneladas) y Jalisco (181 toneladas). En comparación, Querétaro cultivó 72 toneladas y Guanajuato 17 [1-3], lo que desvela un área de oportunidad para incrementar la producción acuícola de estas especies. El interés por mejorar el rendimiento del bagre en particular se encuentra documentado en el Programa Maestro Nacional Bagre y el Comité Sistema Producto Bagre Nacional, integrado por los estados de Guerrero, Michoacán, Puebla, San Luis Potosí y Tamaulipas [4]. A su vez, el incremento de la cosecha de bagre de 2018 a 2021 (7.4 % en Querétaro y más del 100 % en Guanajuato) es una justificación del interés mencionado, pues implica datos especialmente importantes si se considera que existió una disminución del 11.25 % de la producción acuícola general a nivel nacional [1-5].

Los bagres son organismos de la familia *Ictaluridae* del orden *Siluriformes* que habitan principalmente en agua dulce. La especie más explotada en la acuicultura es el *Ictalurus punctatus*, también conocido como bagre de canal, nativo de Estados Unidos, Canadá y el noreste de México [6]. Dicha denominación ha sido estudiada ampliamente, y se han desarrollado estrategias de producción bajo sistemas extensivos, semiintensivos e intensivos [6-8]. No obstante, a pesar de los avances tecnológicos en su cría y aprovechamiento, en México, el bagre de canal constituye una especie invasora capaz de perjudicar la biodiversidad al competir por recursos con especies nativas [9-11]. El peligro se acentúa en zonas con alta biodiversidad pero equilibrio delicado, tales como la Reserva de la Biósfera Sierra Gorda y la Reserva de la Biósfera Sierra Gorda–Guanajuato. Por ese motivo, en ambos sitios se ha constatado un interés por introducir la producción acuícola de bagre endémico [12-14].



El presente estudio se realizó con la finalidad de determinar la capacidad de crecimiento del bagre endémico en un cultivo acuícola. Con dicho propósito se llevó a cabo la adaptación de la especie al consumo de alimento comercial. Se determinó el desempeño de su crecimiento, su relación longitud-peso y su factor de condición.

La Reserva de la Biósfera Sierra Gorda es un área natural protegida en el centro de México, al interior de los estados de Guanajuato y Querétaro [15]. El principal río de la reserva es el Santa María, el cual nace en San Luis Potosí, cruza por el estado de Guanajuato, donde se alimenta de varios arroyos, como el Manzanares y el Bagres, y recibe el caudal de los ríos Ayutla y Jalpan [16] al internarse en el estado de Querétaro. En términos geográficos, el río Santa María actúa como límite natural entre Guanajuato y San Luis Potosí, por lo que forma parte de la recién decretada Reserva de la Biósfera Sierra Gorda-Guanajuato, donde son recientes los trabajos de inventarios florísticos y faunísticos [17].

Las especies que habitan el río Santa María han sido objeto de estudios bajo el enfoque de conservación de la biodiversidad. En ellos se ha observado que el sistema dulceacuícola ha sufrido afectaciones por diversas actividades humanas como la pesca descontrolada, agricultura, deposición de contaminantes orgánicos e inorgánicos a los cuerpos de agua dulce, la modificación de los hábitats y la introducción de especies exóticas a la región [11], [12], [18], [19]. Asimismo, resulta evidente la disminución de organismos disponibles en libertad; la escasez es consecuencia de un visible colapso pesquero, tanto a nivel local como global, atribuido principalmente a la sobreexplotación. Estas limitantes, aunadas al cambio climático y la deficiente calidad de los cuerpos de agua, han



generado mermas en las poblaciones acuáticas; para empeorar las cosas, las políticas de pesca y conservación ambiental han fracasado en frenar tal deterioro [18], [20].

Con el objetivo de evitar que la implementación de la acuicultura continúe impactando negativamente la biodiversidad, se propone reemplazar la explotación de especies exóticas por el aprovechamiento de especies nativas con potencial acuícola [21], [22]. Algunas de estas alternativas identificadas dentro de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda son el boquín (*Ictiobus labiosus*), la trucha de río (*Agonostomus monticola*) y el bagre de Río Verde (*Ictalurus mexicanus*) [23]. Dichos peces nativos presentan características productivas deseables, como carne blanca de calidad con menor o ninguna espina, sabor y textura placenteros, por lo que cautivan el agrado de los consumidores regionales.

El bagre de Río Verde, *Ictalurus mexicanus*, originalmente *Amiurus mexicanus* (Meek, 1904), es una especie apenas estudiada. Fue encontrada en la vertiente del Atlántico, en la cuenca del río Pánuco y, aunque se desconoce su hábitat exacto, se reportan avistamientos en todo tipo de ambientes acuáticos: aguas quietas o en movimiento, sobre fondos de roca o arena, sin vegetación acuática, por mencionar algunas; además, se ha observado que los adultos prefieren áreas tranquilas y profundas [24]. En cuanto a las características fisonómicas del bagre, se registra en la literatura una longitud parcial máxima de 23.8 cm, aunque en observaciones propias se encuentran variedades de más de 25 cm.

Por otro lado, los informes del bagre de Río Verde reconocen su distribución intrínseca de los límites nacionales [23-26], por lo que clasifica como endémico dentro de las especies protegidas en México [27]. Asimismo, el Comité de Especies en Peligro de Extinción de la Sociedad Americana de Pesca lo considera un grupo vulnerable y la International Union for Conservation of Nature (IUCN) lo adhiere en su lista roja de especies amenazadas [26], [28], [29]. Con lo anterior en cuenta, la producción del bagre endémico, además de incentivar la acuicultura regional, supondría un beneficio directo a la conservación de la especie y desarrollo sostenible, ya que la cría es una alternativa fructífera para recuperar poblaciones bajo algún grado de vulnerabilidad [30].

Para introducir el bagre de Río Verde a un sistema acuícola primero se debe determinar si puede adaptarse al cautiverio. Desde esa perspecti-

va, los requisitos son resistencia al manejo, adaptación a formulaciones alimenticias y tolerancia a las condiciones fisicoquímicas del agua [22], [30-33]. Sin embargo, hasta el momento escasean los estudios sobre las condiciones de cultivo, por lo que se recurrió a la cercanía taxonómica del *Ictalurus mexicanus* con el *Ictalurus punctatus* para estimar su tolerancia y adaptabilidad. En este sentido, se espera que el bagre se adecue a los rangos de: pH 6-8, dH 4-30, temperatura 10-32 °C, y que acepte una formulación alimenticia destinada a especies carnívoras [34]. En el presente trabajo, se determinó la aceptación del alimento comercial para bagre, así como la supervivencia, longitud y talla máxima alcanzada por la especie endémica en un cultivo acuícola. De esta manera, se identificó su potencial y perspectivas, datos necesarios para proseguir con su introducción a la acuicultura como una alternativa viable en la Sierra Gorda.

Metodología, materiales y métodos

Organismos y condiciones experimentales

Se seleccionaron de forma aleatoria 16 organismos de *Ictalurus mexicanus* con pesos menores a 35 g, a partir de los disponibles en el módulo acuícola del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Materia Agrícola, Pecuaria, Acuícola y Forestal (CIDAF). Los especímenes se aclimataron al cultivo acuícola en peceras de 15 litros y se mantuvieron durante 40 días con aireación continua, a una temperatura de 28 ± 1.3 °C y contenido de amonio menor a 0.1 mg/l. Durante el periodo de aclimatación se les administró el alimento comercial para bagre Grow fish 2, manufacturado por Malta Cleyton, a una tasa de alimentación del 4 % de su biomasa, repartida en 2 raciones diarias. En esta fase se determinó la supervivencia y se cuantificó el crecimiento.

Después de la aclimatación, los organismos fueron trasladados a un estanque de 5 m de diámetro compuesto de geomembrana para desarrollar una etapa de engorda durante 8 meses. El estanque de cultivo contaba con un sistema de flujo continuo, al cual se le proporcionaron atenciones de mantenimiento a la mitad de la fase experimental. Durante este periodo, se otorgó una ración diaria del 4 % de la biomasa, ajustada mensualmente, y al finalizar la etapa se determinaron la supervivencia, talla, peso y factor de condición alcanzados por los especímenes.



Determinación del rendimiento del crecimiento

Se determinó según acató lo propuesto en los trabajos previos de [22] y [35]:

Se analizó la producción total de biomasa (P_t):

$$P_t(g) = \sum_{i=1}^n P_i$$

Donde P_i es el peso del pez en el sistema.

La ganancia total en peso de los organismos (GTP):

$$GTP(g) = M_f - M_i$$

Donde M_f es la masa final, y M_i la inicial.

La tasa específica de crecimiento (TEC) se estimó como:

$$TEC(kg) \text{ día}^{-1} = \frac{100 (l_{nM_f} - l_{nM_i})}{D}$$

Donde M_f es el peso final, M_i el inicial, ln el logaritmo natural y D la cantidad de días de cultivo.

La mortalidad se registró diariamente, y la supervivencia se calculó como el porcentaje del número de peces al momento de la medición respecto a la cantidad de organismos en la muestra original.

Relación longitud-peso y factor de condición

Se computó la relación longitud-peso mediante el método de regresión lineal, calculando los valores de a y b de la ecuación [36]:

$$W = aL^b$$

Donde W denota el peso total en gramos, y L la longitud parcial en centímetros.

En esta expresión, el valor de b determina el tipo de crecimiento:

- Isométrico cuando $b = 3$: el individuo mantiene su forma al crecer. En la práctica, se consideran especies de crecimiento isométrico las que fluctúan dentro de los valores $b = 2.5$ y $b = 3.5$ [37], [38].
- Alométrico positivo si $b > 3$: los individuos de mayor talla incrementan su peso en mayor proporción que su longitud.
- Negativo si $b < 3$: los individuos incrementan su longitud más que su peso. Lo anterior se debe a que la longitud es una magnitud lineal y el peso es una función del cubo de la talla.

El factor de condición, un indicador de la condición nutricional del espécimen, se estima mediante el índice de Fulton (K).

$$K = (P_i/L^3) \times 100$$

Donde P_i denota el peso del pez en gramos, y L la longitud estándar en centímetros. La ecuación relaciona los parámetros de longitud-peso con la condición media en la que se encuentran los organismos del tratamiento a determinado tamaño. Con toda probabilidad, si un individuo posee una mayor biomasa en relación con su longitud, se encuentra en óptima condición.

Consideraciones bioéticas

El presente estudio fue revisado y aprobado por el Comité de Ética Aplicada para la Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Análisis estadísticos

La investigación incluyó una etapa de estadística descriptiva para determinar los intervalos de confianza con base en pruebas de distribución t de Student; subsecuentemente se infirieron los valores esperados en el cultivo del bagre. La comparación del factor de condición se realizó mediante un análisis ANOVA. Después, se ejecutó una prueba de Tukey en busca de diferencias estadísticas significativas; por su parte, los grupos que presentaron anomalía se determinaron por medio de una



prueba de Shapiro-Wilk y se analizaron a través de un test de Kruskal Wallis. Todos los análisis estadísticos fueron efectuados por medio del software Statgraphics Routine Centurion. El valor para decretar una diferencia significativa se estableció en $p > 0.05$.

Resultados y discusión

Este primer reporte del crecimiento del bagre endémico *Ictalurus mexicanus* en un cultivo acuícola muestra una comparación del mismo con el *Ictalurus punctatus*, la especie que más se cultiva en México. Se considera que, si ambas variedades comparten características, el bagre de Rio Verde podría introducirse a sistemas similares a los usados tradicionalmente. Dicha posibilidad evidencia el potencial del bagre endémico para la acuicultura mexicana.

Se efectuaron mediciones para determinar la adaptación de la especie en el cultivo acuícola. Primero, durante la etapa de aclimatación se determinó la supervivencia, con un resultado superior al 87 % (Tabla 1). La cifra fue comparada con estudios realizados en el *Ictalurus punctatus*, que se encuentra plenamente domesticado y adaptado al cautiverio, con porcentajes entre el 85 y 92 % de supervivencia [39]; se concluyó que el resultado de la primera prueba de supervivencia respetaba el

TABLA 1.

Rendimiento del crecimiento de *Ictalurus mexicanus* bajo condiciones de cultivo acuícola.

PARÁMETRO	ETAPA	
	ACLIMATACIÓN	ENGORDA
N INICIAL	14	12
SUPERVIVENCIA (%)	87.5	85.7
P_{in} (g)	29.1 ±3.9	34.8 ±4.9
P (g)	34.8 ±4.9	385.7 ±182.4
P_{max} (G)	40.9	764
P_{min} (G)	24.7	185
L (cm)	15.3 ±0.6	27.8 ±4.6
GTP (g)	5.82 ±1.62	350.9
TEC (%/d)	0.46 ±0.11	1

Se presentan los valores posteriores: aclimatación y engorda en estanque, peso promedio (P), peso máximo (P_{max}), peso mínimo (P_{min}), peso inicial promedio (P_{in}), longitud promedio (L), ganancia total en peso de los organismos (GTP), tasa específica de crecimiento (TEC).

rango aceptable. Al pasar a cultivo en estanque, posterior al periodo de engorda, la supervivencia del bagre endémico se mantuvo en valores superiores al 85 %. Como la dieta de la especie fue exclusivamente a base de alimento comercial, la robustez presentada confirma la capacidad del bagre para aceptar el alimento formulado. Los datos obtenidos de las mediciones evidencian que el *Ictalurus mexicanus* cumple con varios de los principales requisitos para considerarse una especie con potencial acuícola [31].

Como se estimó, la ganancia en peso durante los periodos de aclimatación y engorda fue baja, debido a la adaptación al consumo de alimento comercial y a la falta de selección genética por parte de la especie alternativa [30], [31].

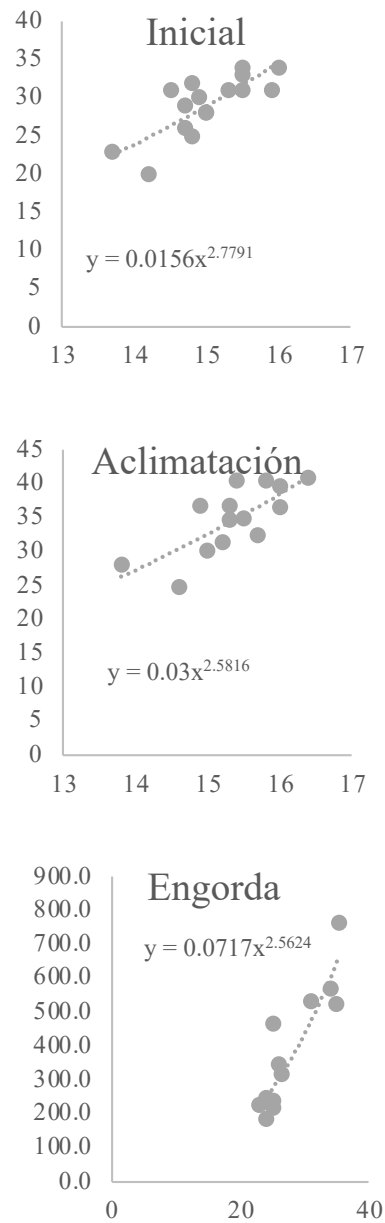
Los valores de la Tabla 1 muestran que el *Ictalurus mexicanus* es incapaz de competir contra el *Ictalurus punctatus* en rendimiento, ya que este último presenta tasas específicas de crecimiento desde 1 hasta 3 [40], [41], por lo que podrá alcanzar los pesos objetivo en un menor tiempo. No obstante, a pesar de esa inferioridad, en los valores máximos reportados previamente (764 g de peso y 35 cm de longitud) se percibe en *I. mexicanus* la capacidad de alcanzar los 600 g obligatorios para la cosecha de *Ictalurus punctatus*. Por consecuencia, el bagre endémico podría ser un reemplazo directo al comercial sin necesidad de concientizar a los consumidores. Empero, se debe considerar que, en líneas bien manejadas, el bagre de canal logra pesos superiores a los 800 g [42] y tallas de más de 50 cm [34], dimensiones que sobrepasan los 35 cm máximos observados en la especie endémica.

Relación longitud-peso y factor de condición

Las ecuaciones resultantes de la relación longitud-peso se exhiben en la Figura 1. En la Tabla 2 se reporta un valor b superior a 2.5, y dado que la cifra aproxima la igualdad $b = 3$, se espera del *Ictalurus mexicanus* un crecimiento isométrico como el advertido en el bagre de canal ($b = 3.2$) [38], [43]. Por otro lado, la tendencia después del periodo de engorda es mantener la relación talla-peso, lo que sugiere un área de oportunidad para la alimentación del organismo con el fin de incrementar su peso. De lo anterior se concluye que el bagre endémico sí presenta un crecimiento isométrico, característica ideal en especies con fines de consumo humano [38].



FIGURA 1.
Relación
longitud-peso en
el bagre endémico
Ictalurus mexicanus.



Se muestran las relaciones antes de comenzar la aclimatación (inicial), posterior a la aclimatación y periodo de engorda. Y corresponde al peso individual, X corresponde a la longitud individual.

Para evaluar la adaptación de *Ictalurus mexicanus* al cultivo acuícola, se comparó el factor de condición al iniciar las pruebas con el subsiguiente a su aclimatación y el posterior al periodo de engorda (Tabla 2). Durante el proceso de aclimatación no se encontró diferencia ($p > 0.05$) en el factor de condición (0.86 ± 0.08 , 0.96 ± 0.09), lo que indica que la adaptación al alimento comercial fue adecuada y que el cautiverio en espacios confinados no tuvo efectos negativos en la condición. Asimismo, el rendimiento del crecimiento obtenido (Tabla 1) parece indicar que

la especie soporta altas densidades de cultivo (tolerancia deseable en organismos con potencial acuícola [31]), aunque todavía están pendientes pruebas específicas que fundamenten este supuesto.

La supervivencia posaclimatación fue alta (Tabla 1) y no se presentó pérdida de peso, por lo que se considera que el bagre de Río Verde acepta correctamente el alimento comercial. Sin embargo, hacen falta más estudios para establecer una dieta óptima que permita aumentar el rendimiento de la especie.

En otras instancias, al pasar al cultivo en estanque el bagre de Río Verde mejoró su factor de condición ($p > 0.05$), a la vez que mantuvo el crecimiento isométrico, lo que corrobora la capacidad del organismo para crecer bajo las condiciones del cultivo, aceptando el alimento comercial. Por tanto, el bagre endémico logra adaptarse a los sistemas acuícolas en estanque, puesto que su resultado es similar a los reportados respecto al bagre de canal, cuyos factores de condición rondan 1.2 [41]. Cabe destacar que la alta variabilidad dificulta cualquier comparación de factores de condición entre poblaciones, no obstante, el cotejo permite cuantificar la mejora en una misma población [38].

TABLA 2.

Valor de b obtenido de la relación longitud-peso y factor de condición.

	ETAPA		
	INICIAL	ACLIMATADO	ENGORDA
b	2.77	2.58	2.56
k	0.86±0.08 ^a	0.96±0.09 ^a	1.72±0.45 ^b

Se muestran los valores de b (relación longitud-peso) y k (factor de condición) calculados antes de comenzar la aclimatación (inicial), después de la aclimatación y tras el periodo de engorda. Los superíndices ^a y ^b denotan diferencia estadística significativa ($p < 0.05$).

Conclusiones

El presente estudio determinó que el *Ictalurus mexicanus* ostenta las características requeridas para considerarla una especie con potencial acuícola. Esta variedad acepta el alimento comercial, y alcanza pesos dentro del rango del *Ictalurus punctatus*, lo que justifica su uso como producto alternativo a este. Adicionalmente, otro indicador de la per-



tinencia de esta especie es su exitosa adaptación a las condiciones de cautiverio [31]; de hecho, las tallas y pesos máximos observados superan los reportados en poblaciones silvestres.

Los resultados respaldan la propuesta de introducir el *Ictalurus mexicanus* al cultivo acuícola como una alternativa viable al bagre de canal. Como sitio para llevar a cabo esta posible sustitución, se recomienda la Reserva de la Biósfera Sierra Gorda, pues en esa región se evitaría la introducción de especies invasoras. A su vez, dicho reemplazo impulsaría el consumo de una especie que ya goza de aceptación local, gracias a que su carne posee pocas espinas, carece de escamas y es agradable al paladar de los consumidores.

Para posteriores investigaciones se propone detallar las pautas de nutrición que permitan mejorar el rendimiento, ya que actualmente el potencial máximo del *Ictalurus mexicanus* permanece desaprovechado. Por otra parte, también se deben establecer los mecanismos para su reproducción en cautiverio, con la finalidad de introducir esta especie como un producto alternativo viable en la región de la Sierra Gorda.

Agradecimientos

Agradecemos al Programa para el Desarrollo Sustentable y Cuidado del Medio Ambiente del Estado de Querétaro, ejercicio fiscal 2021, que financió el proyecto “Corredor Regional de Formación Integral para la Sustentabilidad en el Estado de Querétaro”.

Referencias

- [1] CONAPESCA. (2021) *Anuario estadístico de la acuicultura y pesca 2021*. México: SADER, 2021. https://nube.conapesca.gob.mx/sites/cona/dgp-pe/2021/ANUARIO_ESTADISTICO_DE_ACUACULTURA_Y_PESCA_2021.pdf
- [2] M. A. Aguilar Sánchez. *La Acuicultura en México, retos y oportunidades*. CONAPESCA. 12vo Foro Internacional de Acuicultura. (2017, sep). [En línea]. <https://fiacui.com/2017/Tilapia/Jueves%2028%20sep/Copia%20de%2005%20Situacio%CC%81n%20actual%20de%20la%20acuicultura%20en%20Me%CC%81xico%20COMISIONADO%20MARIO%20AGUILAR%20SANCHEZ%20CONAPESCA.pdf>
- [3] CONAPESCA. (2021). *Producción pesquera por estado*. https://nube.conapesca.gob.mx/datosabiertos/Produccion_Pesquera_2021.csv
- [4] CONAPESCA. (2016). *El bagre, producto acuícola en crecimiento*. <https://www.gob.mx/conapesca/articulos/el-bagre-producto-acuicola-en-crecimiento>
- [5] CONAPESCA. (2018). *Anuario estadístico de Acuicultura y Pesca*. México: SAGARPA. [En línea]. Disponible en: https://nube.conapesca.gob.mx/sites/cona/dgppe/2018/ANUARIO_2018.pdf
- [6] A. L. Lara Rivera, G. M. Parra Bracamonte, A. M. Sifuentes Ricón, H. H. Gojón Báez, H. Rodríguez González, e I. O. Montelongo Alfaro. (2015). El bagre de canal (*Ictalurus punctatus* Rafinesque): Estado actual y problemático en México. *Lat. Am. Journal of Aquatic Reserch*, vol. 43, no. 3, pp. 424 – 434. Doi: <http://doi.org/10.3856/vol43-issue3-full-text-4>
- [7] M. M. Refaey, D. Li, X. Tian, K. Onxayvieng, y R. Tang. (2022, agto. 30). Physiological responses of Chanel catfish (*Ictalurus punctatus*) reared at different stocking densities in a recirculating aquaculture system. *Aquaculture*, vol. 557, pp. 738329. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738329>
- [8] CONAPESCA. (2013). *Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca*. Sinaloa, México: Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca. [En línea] Disponible en: https://nube.conapesca.gob.mx/sites/cona/dgppe/2013/ANUARIO_



ESTADISTICO_DE_ACUA-
CULTURA_Y_PESCA_2013.zip

- [9] T. Contreras MacBeath, M. T. Gaspar Dillanes, L. Huidobro Campos, Y H. Mejía Mojica. (2014). *Peces invasores en el centro de México. En Especies acuáticas invasoras en México*, r. Mendoza y P. Koffleff, Eds. México: CONABIO, pp. 413-424. Doi: <https://doi.org/10.5962/bhl.title.113212>
- [10] A. L. Lara Rivera, G. M. Parra Bracamonte, y X. F. De la Rosa Reyna. (2018). *Identification of three Ictalurus species in Mexico using cytochrome oxidase gene sequencing*. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, vol. 46, no. 2, pp. 475-481. Doi: <https://doi.org/10.3856/vol46-issue2-full-text-23>
- [11] P. Gesundheit, y C. Macías García. (2018, jul. 26). *The role of introduced species in the decline of highly endemic fish fauna in Central Mexico*. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.*, vol. 28, no. 6, pp 1384-1395. Doi: <https://doi.org/10.1002/aqc.2927>
- [12] P. J. Gutiérrez Yurrita, y A. Morales Ortiz. (2004, ene.). *Síntesis y perspectivas del estatus ecológico de los peces del estado de Querétaro (Centro de México)*. En Homenaje al Dr. Andrés Reséndiz Medina. *Un Ictiólogo mexicano*, M. L. Lozano Vilano, y A. J. Contreras Balderas, Eds. Monterrey, México: Universidad Autónoma de Nuevo León, pp. 217-235. Doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3250.4409>
- [13] O. Baez Montes, E. Vargas Colmenero, Y. F. Estrada Sillas, y L. C. Orozco Uribe. (2012). *La biodiversidad le pone sazón a guanajuato*. En *La Biodiversidad en Guanajuato: Estudio de Estado*, vol. 1, C. N. para el C. y U. de la B. (CONABIO)/Instituto de E. del E. de Guanajuato, Ed. CONABIO/IEE, pp. 316-311. [En línea]. Disponible en: <https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/biodiversidad/146/La-Biodiversidad-de-Guanajuato-Estudio-de-Estado>
- [14] CONABIO y IEEG. (2015). *Estrategia para la conservación y el uso sustentable de la biodiversidad del Estado de Guanajuato*. México: CONABIO/IEE. [En línea]. Disponible en: <https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/biodiversidad/159/Estrategia-para-la-Conservaci%C3%B3n-y-el-Uso-Sustentable-de-la-Biodiversidad-del-Estado-de-Guanajuato>
- [15] SIMEC y CONANP. (2019). *Sierra Gorda Reserva de*

- la Biosfera. [En línea]. Disponible en: <https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=108®=7>
- [16] M. I. Ruiz Corzo, y R. Pedraza Ruiz. (2017). *Servicios ambientales en la reserva de la biosfera Sierra Gorda: Pago e integración de productos ecosistémicos*. En *Hacia una cultura de conservación de la biodiversidad biológica*, G. Halffter, S. Guevara, y A. Melic, Eds. M2m: Monografías Tercer Mileio, pp. 109-113. ISBN: 978-84-935872-0-8. [En línea]. Disponible en: <http://sea-entomologia.org/PDF/PDFSM3MVOL6/PdfM3M-vol-6Completo.pdf>
- [17] N. Mercado Silva, E. Díaz Pardo, A. Gutiérrez Hernández, y A. Fa. Guzmán. (2012). *Peces dulceacuícolas*. En *La Biodiversidad en Guanajuato: Estudio de Estado*, vol. 2, CONABIO/Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato, Ed. México: CONABIO/IEE, pp. 203-213. [En línea]. Disponible en: <https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/biodiversidad/146/La-Biodiversidad-de-Guanajuato-Estudio-de-Estado>
- [18] P. J. Gutiérrez Yurrita. (2011). *How to restore riverbanks in natural ecosystems with many people using ecological services at the same time?* *Int. Proc. Chem. Bio. Eviron. Eng.* vol 23, pp. 15-20. Doi: <https://doi.org/10.7763/ipcbee>
- [19] J. Palacio Nuñez, J. F. Martínez Montoya, G. Olmos Oropeza, J. M. Martínez Calderas, J. Clemente Sánchez, y F. Enríquez. (2015. Oct.). *Distribución poblacional y abundancia de los peces endémicos de la llanura de Rioverde*. *AgroProductividad*, vol. 8. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2010.05.008>
- [20] FAO. (2016). *The State of World fisheries and Aquaculture 2016. Contributing to food security and nutrition for all*. Rome. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/2c8bcf47-2214-4aeb-95b0-62ddef8a982a>
- [21] L. G. Ross, C. a Martínez Palacios, y E. J. Morales. (2008, may. 05) *Developing native fish species for aquaculture: The interacting demands of biodiversity, sustainable aquaculture and livelihoods*. *Aquac. Res.*, vol. 39, no 7, pp. 675-683. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2008.01920.x>
- [22] G. A. Peña Herrejón, F. García Trejo, G. M. Soto



- Zarazúa, O. Alatorre Jácome, y E. Rico García. (2016). *First trial of production of a native cichlid *Herichthys cyanoguttatus* comparison with the tilapia *Oreochromis niloticus* in aquaculture*. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, vol. 44, no 4, pp. 711-717. Doi: <https://doi.org/10.3856/vol44-issue4-fulltext-6>
- [23] J. Niñez López, y E. Díaz Pardo. (2017). *Diagnostico potencial Pesuqero en las Microcuencas Ayutla y Concá*. En Congreso Nacional y Reunión Mesoamericana en Manejo de Cuencas Hidrográficas, pp. 1-11. [En línea]. Disponible en: <https://remexcu.org/index.php/cnmch>
- [24] R. R. Miller, W. L. Minckley, S. M. Norris, y J. J. Schmitter Soto. (2009) *Peces dulceacuícolas de México.*, pp. 559. [En línea]. Disponible en: <https://www.biodiversidad.gob.mx/pdf/libros/paguadulceA.pdf>
- [25] R. Miranda, D. Galicia, S. Monks, y G. Pulido Flores. (2012). *Diversity of Freshwater Fishes in Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, Hidalgo, Mexico, and Recommendations of Conservation*. *Southwest. Nat.*, vol. 57, no 3, pp. 285-291. Doi: <https://doi.org/10.1894/0038-4909-57.3.285>
- [26] J. Arroyave. (2019). *Ictalurus mexicanus*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2019: e.T10769A498476*. IUCN. Doi: <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2019-2.RLTS.T10769A498476.en>
- [27] SEMARNAT. (2010). *Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010*. [En línea]. Disponible en: <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4254/semarnat/semarnat.htm>
- [28] A. Valera Romero, C. A. Ballesteros Córdova, G. Ruiz Campos, S. Sánchez González, y J. E. Brooks. (2021). *Recent Discoveries and Conservation of Catfishes, Genus *Ictalurus*, in México*. En *Standing Between Life and Extinction*, University of Chicago, pp. 285-294. Doi: <https://doi.org/10.7208/chicago/9780226694504.003.0019>
- [29] H. L. Jelks et. al. (2008, ago.). *Consrvation Status of Imperiled North American Freshwater and Diadromous Fishes*. *Fisheries*, vol. 33, no. 8, pp. 372-407. Doi: <https://doi.org/10.1577/1548-8446-33.8.372>
- [30] C. A. Dávila Camacho, I. Galaviz Villa, F. Lango Reynoso, M. del R. Castañeda Chávez, C. Quiroga Brahm, y J. Montoya Mendoza. (2018, jul.

- 02). *Cultivation of native fish in Mexico: Cases of success*. Rev. Aquac., vol. 11, no. 3, pp. 1-14. Doi: <https://doi.org/10.1111/raq.12259>
- [31] F. Teletchea, y P. Fontaine. (2012, sep. 21). *Levels of domestication in fish: Implications for the sustainable future of aquaculture*. Fish Fish, vol. 15, no. 2, pp. 181-195. Doi: <https://doi.org/10.1111/faf.12006>
- [32] J. Ávila Domingo, y M. Ronquillo Fernández. (2011, sep.). *Estudio del potencial acuícola del cantón Milagro*. Cienc. UNEMI, vol. 4, no. 5, pp. 98-106. Doi: <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737volum4iss5.2011pp98-106p>
- [33] N. Montoya Camacho et.al. (2018, mar. 05). *Advances in the use of alternative protein sources for tilapia feeding*. Rev. Aquac., vol. 11, no. 3, pp. 515-526. Doi: <https://doi.org/10.1111/raq.12243>
- [34] R. Froese, y D. Pauly. *FishBase*. World wide web electronic publication. [En línea]. Disponible en: www.fishbase.org
- [35] J. F. García Trejo, G. A. Peña Herrejon, G. M. Soto Zarazúa, A. Mercado Luna, y E. Rico García. (2016, mar.). *Effect of stocking density on growth performance and oxygen consumption of Nile tilapia (Oreochromis niloticus) under greenhouse conditions*. Lat. Am. J. Aquat. Res., vol. 44, no. 1, pp. 177-183. Doi: <https://doi.org/10.3856/vol44-issue1-fulltext-20>
- [36] A. B. Keys. (1928, dic. 15). *The weight-length relationship in fishes*. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., vol. 14, no. 12, pp. 922-925. [En línea]. Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/85394>
- [37] T. C. Bjornn, y K. D. Carlander. (1971, abr.). *Handbook of Freshwater Fishery Biology Volumen 1*. J. Wildl. Manage., vol. 35, no. 2, pp. 403. Doi: <https://doi.org/10.2307/3799629>
- [38] R. Froese. (2006, jul. 07). *Cube law, condition factor and weight-length relationship a: history, meta-analysis and recommendations*. J. Appl. Ichthyol, vol. 22, pp. 241-253. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2006.00805.x>
- [39] M. H. Li, B. G. Bosworth, y P. M. Lucas. (2019, ago. 01). *Effects of available lysine concentrations in 28 and 32 % protein diets on growth, feed efficiency, processing yield, and fillet composition of pond-raised channel catfish,*



Ictalurus punctatus. J. World Aquac. Soc., vol. 51, no. 1, pp. 235-243. Doi: <https://doi.org/10.1111/jwas.12644>

- [40] M. H. Li, B. C. Peterson, C. L. Janes, y E. H. Robinson. (2006, mzo. 31). *Comparasion of diets containing various fish meal levels on growth performance, body composition, and insulin-like growth factor-I of juvenile channel catfish Ictalurus punctatus of different strains*. Aquaculture, vol. 253, no. 1-4, pp. 628-635. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.09.024>
- [41] M. M. Refay et.al. (2018, jul. 01). *High stocking density alters growth performance, blood biochemistry, intestinal histology, and muscle quality of channel catfish Ictalurus punctatus*. Aquaculture, vol. 492, pp. 73-81. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.04.003>
- [42] B. Bosworth, G. Waldbieser, A. Garcia, S. Tsuruta, y D. Lourenco. (2020, ene. 15). *Heritability and response to selection for carcass weight and growth in the Delta Selectrain of channel catfish, Ictalurus punctatus*. Aquaculture, vol. 515, pp. 734507. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734507>
- [43] E. Keenan, S. Warner, A. Crowe, y M. Courtney. (2011, feb. 22). *Length, Weight, and Yield in Channel Catfish, Lake Diane, MI*. Nat. Preced. Doi: <https://doi.org/10.1038/npre.2011.5706.1>

REVISIÓN DE LA FUNCIÓN DE LAS COMUNIDADES MICROBIANAS DEL SUELO A TRAVÉS DE LA GESTIÓN DE LA TIERRA Y COMPILACIÓN METODOLÓGICA AVANZADA

REVIEW OF THE ROLE OF SOIL MICROBIAL COMMUNITIES
THROUGH LAND MANAGEMENT AND ADVANCED
METHODOLOGICAL COMPILATION

Gobinath Chandrakasan*
Juan Fernando García Trejo
Humberto Aguirre Becerra
Enrique Rico García

Universidad Autónoma de Querétaro, México.

**gobinath.chandrakasan@uaq.mx*



Abstract

Resumen

En tiempos recientes ha crecido el interés por las estructuras de las comunidades microbianas del suelo, las cuales son determinantes para la agricultura moderna. Su importancia radica en que aportan estabilidad a los agroecosistemas y aumentan la producción de cultivos para satisfacer la alta demanda de alimentos y energía. Gracias al estudio metagenómico del suelo, el patrón espacial y las características moleculares de las comunidades microbianas pueden fungir como indicadores (biomarcadores) de los procesos ecosistémicos para monitorear y gestionar sosteniblemente la salud del suelo. En este sentido, la presente revisión describe las estrategias teóricas y metodológicas empleadas para evaluar y comprender la distribución y evolución de bacterias, hongos, nematodos y arqueas. El objetivo del trabajo es promover prácticas agrícolas que aprovechen dicha diversidad para el correcto funcionamiento de la biología del suelo y, más ampliamente, de los servicios del ecosistema.

Palabras clave: bacterias, diversidad microbiana del suelo, interacción planta-microbios, manejo de la tierra, nutrientes del suelo.

There is a growing interest in the challenges associated with structures of soil microbial communities that contribute to the stability of agroecosystems and increase crop production to meet the high demand for food and energy in modern agriculture. Currently, major advances in soil metagenomics and spatial patterning of microbial communities and community-level molecular features can be exploited as “biomarker” indicators of ecosystem processes for sustainable health monitoring. This review describes the past, present and ongoing theoretical and methodological strategies used to evaluate and better understand the distribution and evolution of bacteria, fungi, nematodes and archaea with the aim of promoting agricultural practices that use said diversity for the proper functioning of the soil biology and, more broadly, ecosystem services.

Keywords: bacteria, soil-microbial diversity, plant-microbes interaction, land management, soil nutrient.



Introducción

Las comunidades microbianas del suelo (CMS) poseen patrones espaciales estructurados, desde la escala micro hasta la global, basados en la distribución de la microflora del suelo en relación con el espacio y la heterogeneidad ambiental [1], [2], [3]. La materia orgánica del suelo (MOS) asociada a elementos como el nitrógeno (N), el fósforo (P) y el azufre (S) aporta algunos efectos benéficos: el aumento de la capacidad de intercambio iónico, la retención de agua, la mejora de la agregación y la reducción de la erosión, así como el potencial de captar gases de efecto invernadero [4].

Varios grupos de investigación han contribuido a este tema al publicar informes agrícolas donde se evalúa la adaptación de los suelos a diversos tratamientos de labranza [5], [6]. En [7] se evaluó la composición de las comunidades de bacterias, acidobacterias y hongos en varios tipos de suelo (humedal, de bosque y cultivo); se determinó que el cultivo agrícola de los humedales modifica los nutrientes del suelo (C, N y P) e influye en la diversidad y estructura de las CMS. El estudio confirmó los efectos del cambio de uso del suelo (la transición de humedales a tierras de cultivo y plantaciones forestales) en el microbioma. A microescala, factores como la porosidad, el acondicionamiento de C del sustrato, la disponibilidad de nutrientes y el nivel de protección de los agregados de microorganismos de las perturbaciones circundantes variaron entre los diferentes microhábitats [8]. En los bosques, ecosistemas semiáridos, el patrón de la biota y los nutrientes del suelo están correlacionados con los lugares de vegetación que crean islas de fertilidad [9].



Las alteraciones de las prácticas de gestión agrícola afectan las funciones estructurales del suelo, incluida su agregación; de esta forma, la conversión de un terreno forestal a agrícola tiende a perjudicar la diversidad microbiana [10]. Dicha afectación se debe a que genera un cambio de especies microbianas fisiológicamente adaptadas a entornos de baja energía; en consecuencia, estos organismos requieren una estricta regulación transcripcional, generación de energía y rápida biosíntesis de ADN, ARN y proteínas durante los periodos de disponibilidad.



El objetivo del trabajo es promover prácticas agrícolas que aprovechen estudios que van desde el metagenómico del suelo, el patrón espacial, hasta las características moleculares de las comunidades microbianas para el correcto funcionamiento de la biología del suelo y, más ampliamente, de los servicios del ecosistema.

Un enfoque multidimensional que vincule la taxonomía, la función y un conjunto más amplio de variables ambientales podría permitir a los investigadores describir la diversidad, ocupación de nichos y factores ecológicos en los suelos agrícolas. Por ejemplo, a través de prácticas de gestión de la tierra es posible explorar los filos copiotróficos dominantes: las *Proteobacterias*, *Acidobacterias*, *Planctomicetos*, *Bacteroidetes* y *Firmicutes* observados en respuesta a la entrada de nutrientes, como la fertilización con N [11]. Las funciones microbianas pueden clasificarse como “amplias” (hidrólisis de disacáridos) o “estrechas” (nitrificación, fijación de nitrógeno y la oxidación de metano). Por su parte, los *verrucomicrobios* en suelos oligotróficos, lo que están positivamente correlacionados con el ciclo de compuestos recalcitrantes de C y negativamente con el metabolismo del N [12].

Durante la última década, las técnicas de genómica ambiental han proporcionado un mayor entendimiento de la composición microbiana (bacterias, hongos, nematodos, arqueas, entre otros) (Figura 1). En este sentido, el presente trabajo se propone examinar el conocimiento actual de la función microbiana del suelo y categorizar las prácticas avanzadas de gestión de la tierra para taxones filogenéticos y funcionales específicos.

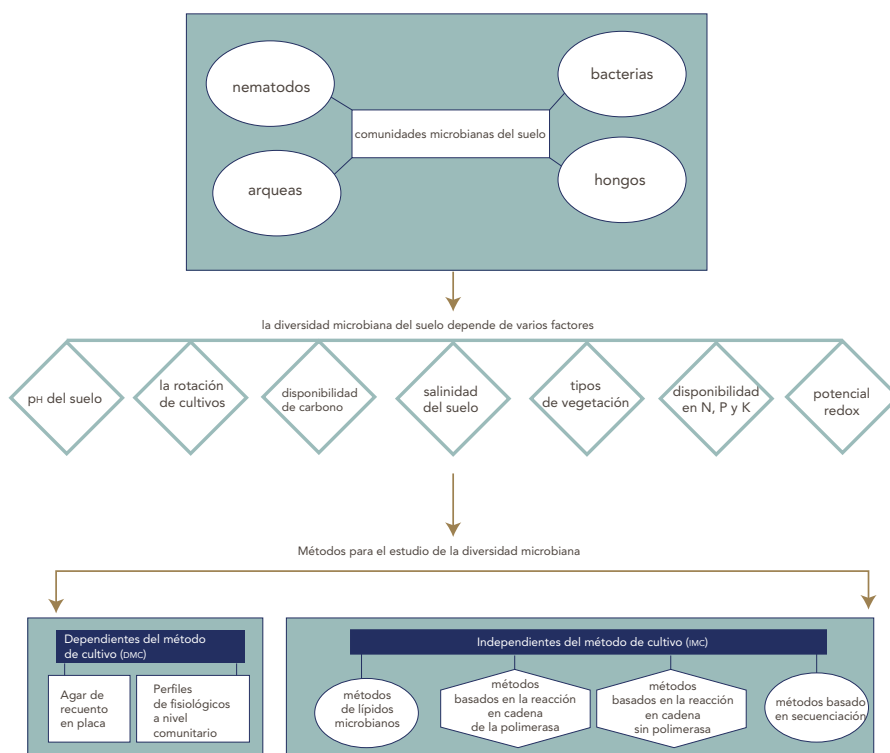


FIGURA 1. Diversidad microbiana del suelo: estrategia metodológica, panorama espacial e interés funcional.

Métodos de estudio de la diversidad microbiana

Las CMS pueden identificarse a través de caracterizaciones bioquímicas y moleculares, tanto independientes del método de cultivo (IMC) como dependientes del mismo (DMC) [13]. La secuenciación de nueva generación está dirigida a las regiones hipervariables del gen que codifica el ARNR 16S. Esta herramienta ha sido aplicada a la exploración de la composición, diversidad y distribución de la comunidad microbiana, al igual que a la descripción de las funciones de los microbios en diversos ecosistemas [14]. Por otro lado, los análisis más frecuentes en los estudios son:

- Huellas moleculares por electroforesis en gel de gradiente desnaturalizante (DGGE por sus siglas en inglés).
- PCR cuantitativo (reacción en cadena de la polimerasa).
- Polimorfismo de longitud de fragmentos de restricción terminal.
- Composición de la comunidad (secuenciación de illumina).
- Huellas bioquímicas de ésteres metílicos de ácidos grasos.



TABLA 1.

Informes sobre cambios en las propiedades microbianas del suelo tras la conversión de bosques a cultivos agrícolas, así como los métodos utilizados.

Asimismo, se ha dispuesto de perfiles fisiológicos a nivel de comunidad y patrones de consumo de nutrientes del suelo (*biolog-ecoplates*) para estudiar la diversidad microbiana en el terreno [15], [16], [17].

Con las técnicas de pirosecuenciación es posible definir los atributos ecológicos de los grupos seleccionados, a la vez que clasificar los parámetros ambientales con base en la precisión de sus distribuciones espaciales. Esta metodología reveló una posible brecha entre las actividades de los microorganismos del suelo e hizo evidente que las especies poco abundantes podían ser altamente activas en el suelo. Por otra parte, las combinaciones de pirosecuenciación y estudios basados en Illumina se han empleado para determinar la diversidad y las distribuciones espaciales de las comunidades microbianas [18].

SISTEMAS	MÉTODOS	BACTERIA/ ARQUEA	HONGOS	CONCLUSIÓN	PAÍS Y REFERENCIA
Bosque de abetos -agricultura orgánica	Longitud-heterogeneidad-PCR	-	-	La estructura de la comunidad bacteriana es específica en el uso del suelo. La actividad enzimática es mayor en la capa orgánica del suelo forestal.	Finlandia [20]
Bosque Montano -cultivos diversos	DGGE	Disminución	Disminución	Cambios en la estructura y función de las CMS. La DGGE está vinculada al uso del suelo, no a la ubicación.	Argentina [21]
Bioma de la selva amazónica	q PCR	Incremento / disminución	-	No hay diferencias significativas en las estructuras funcionales para las fracciones del suelo y el tiempo.	Brasil [22]
Parque Regional de Massaciucoli Toscana	Huellas de ADN	Incremento	Incremento	Grandes diferencias en la riqueza y diversidad de las comunidades bacterianas y fúngicas.	Italia [23]
Meseta tibetana	Ácido graso fosfolípido	Incremento	Incremento	Las variables totales de la capa orgánica del bosque aumentaron (bacterias, hongos, etc.).	China [24]
Borneo malayo	PCR, secuencia Illumina	Incremento / disminución	-	No aminora la diversidad de bacterias, pero sí las diferencias en los grupos taxonómicos y los cambios en la composición de la comunidad.	Asia [25]

El creciente interés por la tecnología de microarreglos se debe a la complejidad de las CMS, así como a la diversidad de genes funcionales y de expresión génica según los patrones de diseño de las sondas. Este estudio permite encontrar vínculos entre las proxy (enzimas y respiración basal) y la abundancia de genes funcionales. Por otra parte, el impacto de los regímenes de cultivo sobre el C del suelo y las comunidades microbianas está mediado por la distribución del tamaño de los agregados: mayormente pronunciado en los macro-agregados que en los micro-agregados. A su vez, la hibridación fluorescente *in situ* (FISH por sus siglas en inglés) en combinación con la técnica dirigida al ARNr 16S se aprovechó para estudiar la estructura de las CMS y la dinámica de la actividad de microbios específicos (bacterias nitrificantes, bacterias reductoras de sulfato, organismos acumuladores de polifosfato). Así, la combinación de FISH con la tinción de la biomasa microbiana total que posee una alta afinidad por el ADN facilita el reconocimiento de microorganismos activos [19].

El microbioma en el suelo: diversidad, distribución e impacto

La estructura de las CMS está estrechamente relacionada con el tipo de vegetación, calidad de la MOS, región geográfica, temperatura, agua, disponibilidad de nutrientes y pH del suelo. Por otra parte, en [26] se examinaron los suelos a nivel general y de la rizosfera. Se implementaron métodos de perfiles fisiológicos (placas BioLog Eco) y enfoques basados en el ADN (pirosecuenciación) para medir los cambios en las comunidades bacterianas durante el crecimiento de rizosferas de soja en el campo.

El análisis de ácidos grasos de fosfolípidos (PLFA) sirve para cuantificar la biomasa microbiana y la composición de la comunidad, especialmente en sedimentos y suelos [27]. Los enfoques moleculares sugieren que las comunidades bacterianas de la rizosfera sufrieron cambios significativos a nivel de filo, mientras las *Proteobacterias* resultaron dominantes, las *Acidobacterias* y los *Firmicutes* fueron inferiores durante el crecimiento. En paralelo, el análisis de las unidades taxonómicas operativas mostró que en las comunidades bacterianas de la rizosfera, al igual que *Bacillus*, *Bradyrhizobium* y *Rhizobium*, las rizobacterias promotoras del creci-



miento vegetal (PGPR por sus siglas en inglés) cambiaron de manera específica para cada etapa. Estos informes evidenciaron la correlación existente entre las comunidades bacterianas de la rizosfera y el crecimiento de la planta de soja.

Las comunidades fúngicas del suelo son esenciales para la retención de nutrientes (lixiviación de N y pérdidas de N_2O), dado que proporcionan rutas de transporte y reciclaje de C; asimismo, estos especímenes son más resistentes a las perturbaciones del cambio climático (como la sequía) que sus contrapartes de manejo intensivo dominado por bacterias [28]. El incremento de la proporción hongos-bacterias en el suelo se ha relacionado con el aumento del C y, consecuentemente, con la proporción C:N; el mismo efecto se extiende a diversas aportaciones orgánicas como el compostaje a base de coníferas, los regímenes de humedad del suelo y recubrimiento de cultivos con arveja [29]. En pocas palabras, la acumulación de C en el suelo da mayor soporte a la diversidad de las CMS en comparación a las zonas de cultivo circundantes [30].

En [31] se describió un experimento de campo a largo plazo en el que se compararon los sistemas de agricultura ecológica y convencional en busca de correlaciones entre la abundancia de taxones y el régimen de fertilización. Los resultados exhibieron una mayor presencia de filos bacterianos y varios taxones fúngicos en los suelos fertilizados con estiércol. En otras instancias, se han empleado enfoques moleculares para revelar el rol funcional de los hongos asociados a las raíces que participan en la dinámica del C del ecosistema del bosque boreal. Una comparación cuantitativa, basada en PCR, de la abundancia de hongos y bacterias a lo largo de un gradiente de pH del suelo reveló que tres grupos principales (*Ascomycetos*, *Basidiomycetos* y *Quitridiomycetos*) gobernaban la comunidad fúngica, independientemente del pH [32].

Otro punto de vista sugiere que los árboles de bosques templados se asocian con comunidades de hongos (micorrízicos arbusculares, HMA o ectomicorrízicos) para facilitar su acceso a nutrientes y agua, alterando así el C del suelo y el ciclo de nutrientes [33]. Por su parte, en los bosques tropicales, la proporción de N inorgánico a orgánico del suelo estuvo fuertemente influenciada por la estructura de suelo, flora y clima (SFC) [34]; asimismo, los efectos de las ectomicorrízicas (ECM) en el ciclo del N permitieron la monodominancia de las especies de árboles en un bosque montano tropical [35].

Los nematodos son un importante, abundante y diverso grupo de invertebrados, miembros de la comunidad biótica del suelo y cuya evaluación composicional podría proporcionar una visión única de los procesos biológicos del suelo. Esta consecuencia se debe a que diferentes grupos de nematodos están especializados según sus fuentes de alimento, por lo que desempeñan roles esenciales en el ecosistema. Además, las comunidades cumplen diversos objetivos que los distinguen como valiosos bioindicadores de la salud del suelo, por ejemplo, el suministro de alimento a múltiples hongos, bacterias y parásitos de plantas. En este sentido, algunos investigadores han realizado estudios basados en la secuenciación de eucariotas, incluidos los nematodos, utilizando ADN ambiental extraído directamente de suelos y sedimentos. El experimento hizo posible establecer una huella metabólica de nematodos, lo que permite la cuantificación funcional de la biomasa, la actividad metabólica y el flujo de energía de c en la red alimentaria del suelo [36], [37].

Las arqueas desempeñan funciones ecológicas fundamentales en la MOS que implican energía, pH y factores geoquímicos, incluida la oxidación o la reducción de metales, así como la alteración de las condiciones químicas del entorno. La comparación global de las arqueas del suelo realizada en [38] determinó que el 2 % de las 454 secuencias obtenidas eran arqueas debido al cebador 16s generalizado que se utilizó, lo que indica una abundancia relativa menor en comparación con las bacterias.

TABLA 2.

Técnicas actuales y emergentes utilizadas en la detección de las CMS y sus correspondientes modelos de cultivo.

DIVERSIDAD MICROBIANA	SESIÓN	MÉTODO	RESULTADOS	CULTIVO Y CITACIÓN
Bacteria, arquea	Sesión de drenaje (abril), sesión inundada (agosto)	PCR (16S rARN) y pirosecuencia	La actividad microbiana, la presencia de procariontas, la diversidad y la estructura de la comunidad se modificaron en función de la estación, el pH y la fertilización a largo plazo.	<i>Oryza sativa</i> [39]
Bacteria, hongos	Fertilizante inorgánico y fertilizante orgánico, sin control de fertilizantes	Amplificación de genes y secuencia profunda	Se alteraron significativamente las propiedades del suelo, los índices de riqueza y composición microbiana.	<i>Oryza sativa</i> [40]
Nematodos	Labranza convencional, labranza cero y orgánica	Meta-código de barras y análisis morfológico	Se reportaron doce nematodos con un umbral de similitud del 99 %, 3034 únicos y 30 familias. El análisis morfológico recuperó 21 familias de nematodos.	<i>Triticum</i> , <i>Glycine</i> , <i>Vicia villosa</i> [41]



Bacteria	Suelo en su totalidad y rizosfera	PCR y secuencia Illumina Miseq	La abundancia relativa de la mayoría de los filos bacterianos se incrementó significativamente en los suelos de la rizosfera y en su totalidad.	<i>Glycine</i> y <i>Zea mays</i> [42]
Bacteria, hongos	Abril, junio, septiembre (efecto de diferentes labranzas (0-5, 5-10, 10-20 cm))	PLFA	Los PLFA bacterianos fueron el registro más bajo, mientras que los PLFA fúngicos fueron mayores en septiembre, como lo muestra la relación hongos:bacterias con el aumento de la fertilización con N.	<i>Zea mays</i> [43]
Hongos	De septiembre a junio (trigo) y de junio a agosto (leguminosas)	Secuenciación de genes y PLFA	Los efectos de las rotaciones de cultivos de cobertura aumentaron varias OTU de AMF en el suelo sub-superficial. Se reportó temporada de cultivo de trigo a diferencia del barbecho registrado en verano. No hubo aumento significativo de carbón orgánico del suelo.	<i>Triticum</i> , <i>Fabaceae</i> [44]

AMF: hongos micorrízicos arbusculares; OTU: unidades taxonómicas operacionales; PLFA: ácidos grasos de fosfolípidos (por sus siglas en inglés).

Mejora de la interacción planta-microbios

Las plantas interactúan con las CMS tan intensa, recíproca y frecuentemente [45] que resulta necesario un análisis integrado basado en el tipo funcional de las plantas, composición de la CMS y procesos biogeoquímicos del suelo. Un estudio de este tipo permitiría comprender los efectos de las retroalimentaciones por encima y por debajo del suelo en su función ecológica [46], [47].

En [48] se mostró que la incorporación de los microbios en los modelos biogeoquímicos mejoraba sustancialmente la predicción de la dinámica del C del suelo. La evidencia sugiere que una mayor diversidad de plantas permite el aprovechamiento del C y, a su vez, puede producir impactos positivos en los microorganismos asociados a las raíces (hongos micorrízicos arbusculares y bacterias Gram negativas) [49]. Dichos microorganismos absorben el C recién fotosintetizado, contribuyendo así al ciclo de C al introducirlo al sistema del suelo. Estas interacciones se producen entre las PGPR y la raíz, mediando la adquisición de nutrientes y la tolerancia a las enfermedades por parte de la planta. Las rizobacterias (*Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Herbaspirillum* y *Pseudomonas*) son un grupo diverso de microbios [50] que participan en la estimulación del crecimiento de las plantas mediante la fijación del

N₂ atmosférico; asimismo, están implicadas en la producción de fitohormonas, el antagonismo contra los patógenos, solubilización del fosfato, producción de sideróforos y formación de biopelículas. Las raíces de las plantas liberan una variedad de compuestos a la rizosfera que sirven como fuentes de C y energía para los microorganismos [51].

Conclusión

Las CMS participan en cuantiosos procesos edáficos imprescindibles de los agroecosistemas, por lo que su diversidad es fundamental para mantener una óptima calidad del suelo. Esta revisión engloba la distribución espacial junto con estudios ecológicos como las prácticas de manejo de la tierra, las interacciones planta-microbio y las estrategias metodológicas avanzadas. Los métodos modernos de adquisición de datos permiten un mejor análisis de la función microbiana del suelo y proporcionan información sobre las prácticas agrícolas que permitirán aumentar la producción de alimentos de forma sostenible. Una visión completa de los atributos ecológicos y las distribuciones espaciales de las CMS debería mejorar la predicción de los cambios, su estructura y, a su vez, el funcionamiento del suelo.

Declaración de interés en competencia

Los autores declaran que no tienen competencia financiera conocida, intereses ni relaciones personales que influyeran el trabajo reportado en este documento.

Declaración del autor

No tenemos ningún conflicto de interés en la publicación de este artículo en esta revista. Todos los autores han accedido a su publicación.



Referencias

- [1] M. Miransari, "Soil microbes and the availability of soil nutrients", *Acta Physiologiae Plantarum*, vol. 35, pp. 3075–3084, 2013.
- [2] E. E. Kuramae, E. Yergeau, L. C. Wong, A. S. Pijl, J. A. van Veen y G. A. Kowalchuk, "Soil characteristics more strongly influence soil bacterial communities than land-use type", *FEMS microbiology Ecology*, vol. 79, pp. 12–24, 2012.
- [3] A. M. Keith, B. Boots, C. Hazard, R. Niechoj, J. Arroyo, G. D. Bending, T. Bolger, J. Breen, N. Clipson, F. M. Doohan y C. T. Griffin, "Cross-taxa congruence, indicators and environmental gradients in soils under agricultural and extensive land management", *European Journal of Soil Biology*, vol. 49, pp. 55–62, 2011.
- [4] D. Finn, P. M. Kopittke, P. G. Dennis y R. C. Dalal, "Microbial energy and matter transformation in agricultural soils", *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 111, pp. 176–192, 2017.
- [5] B. Küstermann, J. C. Munch y K. J. Hülsbergen, "Effects of soil tillage and fertilization on resource efficiency and greenhouse gas emissions in a long-term field experiment in Southern Germany", *European Journal of Agronomy*, vol. 49, pp. 61–73, 2013.
- [6] K. J. Van Groenigen, A. Hastings, D. Forristal, B. Roth, M. Jones y P. Smith, "Soil C storage as affected by tillage and straw management: An assessment using field measurements and model predictions", *Agriculture, Ecosystem & Environment*, vol. 140, pp. 218–225, 2011.
- [7] X. Sui, R. Zhang, B. Frey, L. Yang, M. H. Li y H. Ni, "Land use change effects on diversity of soil bacterial, Acidobacterial and fungal communities in wetlands of the Sanjiang Plain, northeastern China", *Scientific Reports*, vol. 9(1), pp. 1–14, 2019.
- [8] A. P. Smith, E. Marín, M. A. De Graaff y T. C. Balser, "Microbial community structure varies across soil organic matter aggregate pools during tropical land cover change", *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 77, pp. 292–303, 2014.
- [9] M. Delgado, F. Covelo, F. T. Maestre y A. Gallardo,

“Biological soil crusts affect small-scale spatial patterns of inorganic N in a semiarid Mediterranean grassland”, *Journal of Arid Environment*, vol. 91, pp. 147–150, 2013.

- [10] J. L. Rodrigues, V. H. Pellizari, R. Mueller, K. Baek, E. D. Jesus, F. S. Paula, B. Mirza, G. S. Hamaoui Jr., S. M. Tsai, B. Feigl y J. M. Tiedje, “Conversion of the Amazon rainforest to agriculture results in biotic homogenization of soil bacterial communities”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 110, no. 3, pp. 988–993, 2013.
- [11] S. Frenk, A. Dag, U. Yermiyahu, I. Zipori, Y. Hadar y D. Minz, “Seasonal effect and anthropogenic impact on the composition of the active bacterial community in Mediterranean orchard soil”, *FEMS Microbiology Ecology*, vol. 91, no. 9, pp. 1–12, 2015.
- [12] N. Fierer, J. Ladau, J. C. Clemente, J. W. Leff, S. M. Owens, K. S. Pollard, R. Knight, J. A. Gilbert y R. L. McCulley, “Reconstructing the microbial diversity and function of pre-agricultural tallgrass prairie soils in the United States”, *Science*, vol. 342, no. 6148, pp. 621–624, 2013.
- [13] R. Jacoby, M. Peukert, A. Succurro, A. Koprivova y S. Kopriva, “The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition-current knowledge and future directions”, *Frontiers in Plant Science*, vol. 8, pp. 1–19, 2017.
- [14] J. F. Biddle, S. Fitz, S. C. Schuster, J. E. Brenchley y C. H. House, “Metagenomic signatures of the Peru Margin subseafloor biosphere show a genetically distinct environment”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 105, pp. 10583–10588, 2008.
- [15] Lagomarsino, S. Grego y E. Kandeler, “Soil organic carbon distribution drives microbial activity and functional diversity in particle and aggregate-size fractions”, *Pedobiologia*, vol. 55, no. 2, pp. 101–110, 2012.
- [16] R. M. Peralta, C. Ahn y P. M. Gillevet, “Characterization of soil bacterial community structure and physicochemical properties in created and natural wetlands”, *Science of the Total Environment*, vol. 443, pp. 725–732, 2013.
- [17] Y. Wang, H. F. Sheng, Y. He, J. Y. Wu, Y. X. Jiang, N. F. Y. Tam y H. W. Zhou,



“Comparison of the levels of bacterial diversity in freshwater, intertidal wet-land, and marine sediments by using millions of Illumina tags”, *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 78, no. 23, pp. 8264–8271, 2012.

- [18] A. K. Bartram, M. D. Lynch, J. C. Stearns, G. Moreno-Hagelsieb y J. D. Neufeld, “Generation of multi-million 16S rRNA gene libraries from complex microbial communities by assembling paired-end Illumina reads”, *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 77, pp. 3846–3852, 2011.
- [19] T. Zhang, M. F. Shao y L. Ye, “454 Pyrosequencing reveals bacterial diversity of activated sludge from 14 sewage treatment plants”, *ISME Journal*, vol. 6, no. 6, pp. 1137–1147, 2011.
- [20] K. Wallenius, H. Rita, A. Mikkonen, K. Lappi, K. Lindström, H. Hartikainen, A. Raateland y R. M. Niemi, “Effects of land use on the level, variation and spatial structure of soil enzyme activities and bacterial communities”, *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 43, no. 7, pp. 1464–1473, 2011.
- [21] M. S. Montecchia, O. S. Correa, M. A. Soria, S. D. Frey, A. F. García y J. L. Garland, “Multivariate approach to characterizing soil microbial communities in pristine and agricultural sites in Northwest Argentina”, *Applied Soil Ecology*, vol. 47, no. 3, pp. 176–183, 2011.
- [22] D. Goss, L. W. Mendes, C. D. Borges, J. L. Rodrigues y S. M. Tsai, “Amazon forest-to-agriculture conversion alters rhizosphere microbiome composition while functions are kept”, *FEMS microbiology*, vol. 95, no. 3, pp. 1–13, 2019.
- [23] F. Vitali, G. Mastromei, G. Senatore, C. Caroppo y E. Casalone, “Long lasting effects of the conversion from natural forest to poplar plantation on soil microbial communities”, *Microbiological Research*, vol. 182, pp. 89–98, 2016.
- [24] R. He, K. Yang, Z. Li, M. Schädler, W. Yang, F. Wu, B. Tan, L. Zhang y Z. Xu, “Effects of forest conversion on soil microbial communities depend on soil layer on the eastern Tibetan Plateau of China”, *PloS one*, vol. 12, no. 10, pp. 1–13, 2017.
- [25] L. Lee Cruz, D. P. Edwards, B. M. Tripathi y J. M. Adams, “Impact of logging and forest conversion to oil palm

- plantations on soil bacterial communities in Borneo", *Applied Environmental Microbiology*, vol. 79, no. 23, pp. 7290–7297, 2013.
- [26] Sugiyama, Y. Ueda, T. Zushi, H. Takase y K. Yazaki, "Changes in the bacterial community of soybean rhizospheres during growth in the field", *PLoS One*, vol. 9, pp. 1–9, 2014.
- [27] N. Lewe, S. Hermans, G. Lear, L. T. Kelly, G. Thomson Laing, B. Weisbrod, S. A. Wood, R. A. Keyzers y J. R. Deslippe, "Phospholipid fatty acid (PLFA) analysis as a tool to estimate absolute abundances from compositional 16S rRNA bacterial metabarcoding data", *Journal of Microbiological Methods*, vol. 188, pp. 106271, 2021.
- [28] Williams y K. Hedlund, "Indicators of soil ecosystem services in conventional and organic arable fields along a gradient of landscape heterogeneity in southern Sweden", *Applied Soil Ecology*, vol. 65, pp. 1–7, 2013.
- [29] M. A. Cregger, C. W. Schadt, N. G. McDowell, W. T. Pockman y A. T. Classen, "Response of the soil microbial community to changes in precipitation in a semiarid ecosystem", *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 78, no. 24, pp. 8587–8594, 2012.
- [30] L. D'Acunto, M. Semmartin y C. M. Ghersa, "Uncultivated margins are source of soil microbial diversity in an agricultural landscape", *Agriculture, Ecosystem & Environment*, vol. 220, pp. 1–7, 2016.
- [31] M. Hartmann, B. Frey, J. Mayer, P. Mäder y F. Widmer, "Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming", *The ISME journal*, vol. 9, pp. 1177–1194, 2014.
- [32] J. Rousk, P. C. Brookes y E. Bååth, "Investigating the mechanisms for the opposing pH relationships of fungal and bacterial growth in soil", *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 42, no. 6, pp. 926–934, 2010.
- [33] R. P. Phillips, E. Brzostek y M. Midgley, "The mycorrhizal-associated nutrient economy: a new framework for predicting carbon-nutrient couplings in temperate forests", *New Phytologist*, vol. 199, no. 1, pp. 41–51, 2013.
- [34] B. G. Waring, R. Adams, S. Branco y J. S. Powers, "Scale-dependent variation in nitrogen cycling and soil fungal communities along



gradients of forest composition and age in regenerating tropical dry forests", *New Phytologist*, vol. 209, no. 2, pp. 845–854, 2016.

- [35] Corrales, S. A. Mangan, B. L. Turner y J. W. Dalling, "An ectomycorrhizal nitrogen economy facilitates monodominance in a neotropical forest", *Ecology Letters*, vol. 19, no. 4, pp. 383–392, 2016.
- [36] H. Ferris, "Form and function: Metabolic footprints of nematodes in the soil food web", *European Journal of Soil Biology*, vol. 46, no. 2, pp. 97–104, 2010.
- [37] H. Ferris, S. Sánchez Moreno y E. B. Brennan, "Structure, functions and interguild relationships of the soil nematode assemblage in organic vegetable production", *Applied Soil Ecology*, vol. 61, pp. 16–25, 2012.
- [38] S. T. Bates, D. Berg Lyons, J. G. Caporaso, W. A. Walters, R. Knight y N. Fierer, "Examining the global distribution of dominant archaeal populations in soil", *The ISME journal*, vol. 5(5), pp. 908–917, 2010.
- [39] J. H. Ahn, J. Song, B. Y. Kim, M. S. Kim, J. H. Joa y H. Y. Weon, "Characterization of the bacterial and archaeal communities in rice field soils subjected to long-term fertilization practices", *Journal of Microbiology*, vol. 50(5), pp. 754–765, 2012.
- [40] J. Wang, Y. Song, T. Ma, W. Raza, J. Li, J. G. Howland, Q. Huang y Q. Shen, "Impacts of inorganic and organic fertilization treatments on bacterial and fungal communities in a paddy soil", *Applied Soil Ecology*, vol. 112, pp. 42–50, 2017.
- [41] A. M. Treonis, S. K. Unangst, R. M. Kepler, J. S. Buyer, M. A. Cavigelli, S. B. Mirsky y J. E. Maul, "Characterization of soil nematode communities in three cropping systems through morphological and DNA metabarcoding approaches", *Scientific Reports*, vol. 8(1), pp. 1–12, 2018.
- [42] J. Liu, Z. Yu, Q. Yao, X. Hu, W. Zhang, G. Mi, X. Chen y G. Wang, "Distinct soil bacterial communities in response to the cropping system in a Mollisol of northeast China", *Applied Soil Ecology*, vol. 119, pp. 407–416, 2017.
- [43] B. Sun, S. Jia, S. Zhang, N. B. McLaughlin, X. Zhang, A. Liang, X. Chen, S. Wei y S. Liu, "Tillage, seasonal and depths effects on soil microbial properties in black soil of Northeast China", *Soil*

- and Tillage Research, vol. 155, pp. 421–428, 2016.
- [44] Somenahally, J. I. DuPont, J. Brady, J. McLawrence, B. Northup y P. Gowda, "Microbial communities in soil profile are more responsive to legacy effects of wheat-cover crop rotations than tillage systems", *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 123, pp. 126–135, 2018.
- [45] Q. Guo, L. Yan, H. Korpe-lainen, Ü. Niinemets y C. Li, "Plant-plant interactions and N fertilization shape soil bacterial and fungal communities", *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 128, pp. 127–138, 2019.
- [46] S. M. Juice, C. A. Walter, K. E. Allen, D. M. Berardi, T. W. Hudiburg, B. N. Sulman y E. R. Brzostek, "A new bioenergy model that simulates the impacts of plant-microbial interactions, soil carbon protection, and mechanistic tillage on soil carbon cycling", *Global Change Biology Bioenergy*, vol. 14(3), pp. 346–363, 2022.
- [46] T. R. Sveen, T. Netherway, J. Juhanson, J. Oja, P. Borgström, M. Viketoft, J. Strengbom, R. Bommarco, K. Clemmensen, S. Hallin y M. Bahram, "Plant-microbe interactions in response to grassland herbivory and nitrogen eutrophication", *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 156, pp. 1–10, 2021.
- [46] O. Hararuk, M. J. Smith y Y. Q. Luo, "Microbial models with data-driven parameters predict stronger soil carbon responses to climate change", *Global Change Biology*, vol. 21(6), pp. 2439–2453, 2015.
- [48] P. G. Mellado, M. Lange, D. Bachmann, A. Gockele, S. Karlowsky, A. Milcu, C. Piel, C. Roscher, J. Roy y G. Gleixner, "Plant diversity generates enhanced soil microbial access to recently photosynthesized carbon in the rhizosphere", *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 94, pp. 122–132, 2016.
- [49] M. M. Qaisrani, A. Zaheer, M. S. Mirza, T. Naqqash, T. B. Qaisrani, M. K. Hanif, G. Rasool, K. A. Malik, S. Ullah, M. S. Jamal y Z. Mirza, "A comparative study of bacterial diversity based on culturable and culture-independent techniques in the rhizosphere of maize (*Zea mays L.*)", *Saudi Journal of Biological Science*, vol. 26(7), pp. 1344–1351, 2019.
- [50] T. E. Cheeke, R. P. Phillips, E. R. Brzostek, A. Rosling, J. D. Bever y P. Fransson, "Domi-



nant mycorrhizal association of trees alters carbon and nutrient cycling by selecting for microbial groups with distinct enzyme function", *New Phytologist*, vol. 214(1), pp. 432–442, 2017.

REVALORIZACIÓN SUSTENTABLE DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES DE LA PRODUCCIÓN DE JITOMATE

SUSTAINABLE REVALORIZATION OF AGRO-INDUSTRIAL
WASTE FROM TOMATOES PRODUCTION

Luis Fernando Monroy Garduño
María Andrea Andrade Gómez
Pedro Estrada Ortiz
Beatriz Itzel Baeza López
Eric Téllez Ojeda
Rubén Moreno Hernández
Claudia Gutiérrez Antonio
Sergio Iván Martínez Guido*

* Universidad Autónoma de Querétaro, México

* sergio.martinezg@uaq.mx, dciguido@gmail.com



Resumen

Los residuos agrícolas se han convertido en un problema global debido a la falta de una estrategia para su manejo; la mayoría de ellos termina en rellenos sanitarios o en el peor de los casos quemados, lo que deviene en el desaprovechamiento de su potencial. En otras instancias, México es el principal proveedor de jitomate a nivel mundial, puesto que contribuye con el 3.46 % del producto interno bruto. No obstante, dicha producción también conlleva la generación de grandes volúmenes de residuos. Bajo este contexto, el presente trabajo se centra en la elaboración de biocombustibles sólidos (pellets) a partir de residuos agrícolas orgánicos generados en la producción de jitomate. El objetivo de la propuesta es integrar los pellets a la cadena productiva como fuente de calor en los invernaderos sustituyendo al gas LP. Se llevó a cabo un estudio respecto a los residuos en la producción de jitomate; para dicho análisis se consideraron la cantidad de biomasa residual generada como base para la producción de pellets combustibles, las condiciones climáticas y el potencial energético en forma de biocombustible. Los resultados mostraron que los residuos generados en la producción de jitomate son capaces de suministrar más del 77 % de la energía requerida para la calefacción de invernaderos. Este porcentaje genera un ahorro económico superior a los 918 dólares y reduce un 87 % el impacto ambiental por periodo productivo, en comparación con el gasto de gas LP. En este sentido, la reintegración de los residuos como fuente de energía verde contribuye a transitar a la economía circular al generar biocombustibles que reducen la dependencia a los combustibles fósiles.

Palabras clave: biocombustibles sólidos, economía circular, residuos agrícolas, revalorización.

Agricultural waste has become a global problem due to the lack of a strategy for its management; most of it ends up in landfills or, in the worst cases, burned, which results in the wasting of its potential. In other instances, Mexico is the main supplier of tomatoes worldwide, contributing 3.46 % of the gross domestic product. However, such production also entails the generation of



Abstract

large volumes of waste. In this context, the present work focuses on the elaboration of solid biofuels (pellets) from organic agricultural residues generated in tomato production. The objective of the proposal is to integrate pellets into the production chain as a heat source in greenhouses, replacing LP gas. A case study was carried out on tomato production residues, considering the amount of residual biomass generated as a basis for the production of fuel pellets, climatic conditions and energy potential in the form of biofuel. The results showed that the residues generated in tomato production are capable of supplying more than 77 % of the energy required for greenhouse heating. This percentage generates an economic saving of more than 918 usd and reduces the environmental impact per production period by 87 %, compared to the use of LP gas. In this sense, the reintegration of this waste as a source of green energy contributes to the transition to a circular economy by generating biofuels that reduce dependence on fossil fuels.

Keywords: solid biofuels, circular economy, agricultural waste, revalorization.

Introducción

En la actualidad la producción agrícola enfrenta desafíos como el aumento de la demanda, altos índices de desnutrición, efectos del cambio climático, sobreexplotación de recursos, disminución de la biodiversidad y pérdida de espacios fértiles. Estos problemas ponen en riesgo la capacidad del sector alimentario actual y oscurecen la proyección a futuro.

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura [1], a fin de lograr una agricultura sostenible es imprescindible satisfacer las necesidades de las generaciones presentes y futuras; sin embargo, al mismo tiempo, se debe garantizar la equidad social y económica, la rentabilidad y la salud ambiental. Dichos requisitos forman parte de la estrategia *Hambre cero*, incluida en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Así, la agricultura protegida junto con los sistemas productivos bajo ambientes controlados (inver-



naderos, producción vertical y tecnologías hidropónicas/acuapónicas) son herramientas promisorias para la seguridad alimentaria. A su vez, los sistemas protegidos ofrecen rendimientos viables ante problemas de cambio climático (como la inestabilidad del clima), de plagas y enfermedades, así como de calidad de los suelos [2].

De acuerdo con Tsataras *et al.* [3], los sistemas productivos controlados mejoran la eficiencia en el uso del agua en comparación con los de campo abierto. Asimismo, se postula que, al promover la recirculación del agua, este tipo de tecnologías (invernaderos) propicia la reducción de fertilizantes entre un 20 y 30 %. A esas ventajas se suman:

- Productividad más elevada y constante.
- Mayor eficiencia en el uso de la tierra, los fertilizantes, los pesticidas, la mano de obra y la energía.
- Capacidad para satisfacer la demanda de manera rentable durante los meses más fríos, en comparación con la producción en campo abierto, ya que en algunos países las condiciones climáticas paralizan el sistema.
- Mejor control de las condiciones sanitarias y fitosanitarias para cumplir con los requisitos del mercado y reducir el daño a los cultivos.
- Reducción de la vulnerabilidad y del riesgo asociados a condiciones meteorológicas adversas que afectan negativamente los cultivos y la calidad del producto.
- Mayor capacidad de respuesta a los requisitos, cada vez más exigentes, de los consumidores con respecto al uso de pesticidas, condiciones sanitarias y protección de los trabajadores.

Se llevó a cabo un estudio de caso respecto a los residuos en la producción de jitomate; para dicho análisis se consideró la cantidad de biomasa residual generada como base para la producción de pellets combustibles, las condiciones climáticas y el potencial energético en forma de biocombustible.

No obstante, aún con estos beneficios, la producción protegida puede caer en una complejidad excesiva o requerir de equipos cuyo control implica un alto costo, lo que genera un impacto negativo a nivel económico y ambiental [4]. En términos ambientales, diversas investigaciones han buscado la mejora de este tipo de tecnologías enfocándose en aspectos como la reducción de los gastos de agua y energía requeridos para la irrigación y el bombeo [5]. Asimismo, se ha estudiado la relación entre el consumo de energía y la geometría del sistema [6], al igual que

el impacto del diseño de las tecnologías sobre la productividad [7]. En esta misma vía, el modelado, simulación y optimización de las variables involucradas en el rendimiento productivo han sido otros campos de análisis [8], así como el desarrollo de maquinaria inteligente [9].

En términos energéticos, la producción bajo invernaderos conforma los procesos productivos agrícolas más exigentes. Su consumo de energía representa entre el 20 y 40 % del costo total de producción, según el tipo de cultivo. Adicionalmente, en todo modelo de producción agrícola se genera una elevada cantidad de residuos a lo largo de la cadena productiva sin importar la tecnología implementada. De acuerdo con Dupuis [10], tales remanentes gozan de un alto potencial como fuente de energía alterna (Tabla 1). Sin embargo, el aprovechamiento de los grandes volúmenes de desechos es casi nulo, a pesar de su rico contenido de compuestos como la lignina, hemicelulosa y celulosa. Estos recursos valiosos son atractivos para su transformación en biocombustibles, en aras de una economía circular en los procesos productivos a través de estrategias sustentables de manejo.

TABLA 1.

Potencial energético de algunos residuos agrícolas.

Fuente: Dupuis [10].

CULTIVO	POTENCIAL DE RESIDUOS (TON/HA)	POTENCIAL ENERGÉTICO (TJ/AÑO)
ARROZ	13.772	3994.19
CAFÉ	3.468	12420
CAÑA DE PALMERA	43.442	381.6
MAÍZ	4.688	1186.37
PALMA DE ACEITE	5.228	4039.48
PLÁTANO	92.332	859.2
TOTAL 32.475	161.43	22880.84

En síntesis, el presente trabajo propone rescatar los residuos generados de la producción de jitomate en invernadero y revalorizarlos mediante su transformación en pellets. Se incluye una evaluación de la viabilidad económica y ambiental como fuente energética para el proceso de calefacción dentro de la misma producción.



Metodología

Revisión bibliográfica

La primera etapa se centró en el estudio de las necesidades productivas del jitomate en invernaderos, incluyendo las condiciones climáticas. Se llevó a cabo una investigación detallada sobre el manejo del cultivo en invernaderos con énfasis en el estudio de la temperatura óptima.

Análisis de producción de residuos generados

Tras la revisión bibliográfica, se pesaron desechos generados por poda para cuantificar la cantidad de residuos de jitomate y valorar su disponibilidad por ciclo productivo. De igual forma, se cotejaron las composiciones fisicoquímicas a partir de datos bibliográficos reportados. El poder calorífico y los contenidos de humedad y lignina fueron las variables de principal interés para la producción de pellets.

Una vez recolectados, se redujo el tamaño de los residuos con ayuda de una trituradora de forraje para facilitar el procedimiento al aumentar el área de contacto e incrementar la velocidad de deshidratación. Posterior a la deshidratación, se procedió con la pelletización, un proceso de densificado, donde se comprime el material orgánico por medio de rodillos giratorios hasta que tomen la forma de un gránulo o pellet. El proceso facilita el manejo de grandes porciones de materia, a la vez que concentra una mayor cantidad de energía en un menor volumen.

Balance energético

En esta etapa se realizaron los cálculos necesarios para evaluar la capacidad y potencial de los pellets producidos en la etapa anterior, por medio de la fórmula de capacidad calorífica (Ecuación 1). Dicha fórmula permite calcular el calor requerido (Q) para aumentar la temperatura dentro del invernadero (entre 3-5 °C) a partir de la multiplicación de poder calorífico (c), el diferencial de temperatura (ΔT) y la cantidad de aire (m). Con el objetivo de mantener la temperatura interior del invernadero, se consideró la totalidad de los residuos generados en la producción de

jitomates. Aunado a lo anterior, se efectuó un análisis económico de la viabilidad del biocombustible sólido producido, en comparación con el gas LP consumido para calefacción.

$$Q=cm\Delta T \quad \text{Ecuación 1}$$

Por otro lado, la Ecuación de enfriamiento de Newton (Ecuación 2) fue implementada para completar el balance de energía, estimando con ello el diferencial de temperaturas en el invernadero. En la expresión k representa la constante de enfriamiento por convección (en este caso, se consideró la del aire); T_A , la temperatura del ambiente; T , la temperatura del invernadero; dT , el diferencial de temperatura, y dt el tiempo transcurrido.

$$\frac{dT}{dt} = k(T - T_A) \quad \text{Ecuación 2}$$

Análisis de viabilidad económica y ambiental

Se calculó el gasto económico referente a la energía necesaria para mantener la temperatura óptima de producción dentro del invernadero al usar gas LP, así como su análogo correspondiente a la combustión de pellets. De igual forma, se analizó el ciclo de vida [11] con base en el marco normativo de la ISO-14040 [12]. A su vez, el inventario de emisiones se contabilizó mediante el GREET[®] Model [13].

Estudio de caso

En México hay aproximadamente 48 000 hectáreas de agricultura protegida, de las cuales cerca de 28 000 se destinan a fines hortícolas. Esta actividad tiene un crecimiento proyectado de 3 000 ha nuevas por año, genera más de 3.2 millones de toneladas de productos anuales y cuenta con un valor comercial superior a los 3000 MDD. Los invernaderos y casas-sombra representan una de las economías más crecientes del sector primario, considerando que dan origen a un aproximado de 453 mil empleos directos: 166 mil fijos y 287 mil temporales.

El 57 % de la superficie agrícola protegida se concentra en tres estados: Sinaloa (20 %), Jalisco (20 %) y Michoacán (17 %) [14]. Esta limitada distribución evidencia la necesidad de desarrollar tecnologías que promuevan



TABLA 2.

Temperaturas promedio mensuales de Amazcala, El Marqués, Querétaro.

Fuente: Weather Spark [15].

la implementación de la agricultura sostenible. Por tanto, se evaluó la viabilidad económica y ambiental de un invernadero de 3744.5 m³ ubicado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Amazcala.

La localidad de Amazcala se sitúa en el Municipio de El Marqués en el Estado de Querétaro a 1919 msnm; sus 6793 habitantes la posicionan en el tercer lugar de las comunidades más pobladas del municipio. El promedio de la temperatura anual de la comunidad es de 17 °C, con una máxima de 25 °C y una mínima de 10 °C [15]. Los promedios máximos y mínimos mensuales, necesarios para realizar los balances energéticos dentro del invernadero, se detallan en la Tabla 2.

TEMPERATURA (°C)	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
MÁXIMA	22	24	26	28	29	27	26	26	25	25	24	22
PROMEDIO	13	15	17	20	21	20	19	19	18	17	15	13
MÍNIMA	5	7	9	11	13	14	14	14	13	11	8	5

Análisis y discusión de los resultados

Revisión bibliográfica

De acuerdo con el *Manual técnico del cultivo de tomate* [16], la temperatura adecuada oscila entre los 20 y 30 °C durante el día y de 10 a 17 °C durante la noche, aunque el promedio óptimo de desarrollo está entre los 18 y 24 °C (Tabla 2). Con esta información se definieron las horas en que se requeriría calefacción para el ciclo productivo. El estudio de caso abarcó de mayo a octubre, y durante estos meses también se cuantificaron los residuos generados.

Con el propósito de respetar el termo-periodo y maximizar el beneficio productivo, se aprecia en la Tabla 2 el combustible necesario ajustado en cantidad y dependiente del mes en que se encuentra. De esta forma, mientras algunos meses, como mayo, requirieron de un aumento de 4 °C por un periodo de 4 horas al día, en otros, como septiembre, fue necesaria una alza de 3 °C durante 5 h. A su vez, en octubre hubo que incrementar la temperatura en 5 °C por un tiempo de 6 h. Si se toman como base estas tres relaciones de tiempo y temperatura se puede proyectar un requerimiento de aproximadamente 850 horas efectivas de calefacción para el periodo de producción

Análisis de los residuos generados de la producción de jitomate

Conforme a lo reportado por Reyes *et al.* [17], los desechos de la producción de jitomate poseen un poder calorífico aproximado de 4700 kcal/kg (19.74 MJ/kg de acuerdo con la Tabla 3). Según la norma ISO 17225-6 [12], estos materiales cumplen con el poder calorífico mínimo requerido en pellets compuestos de residuos agroindustriales, aproximadamente 3463 kcal/kg. Cabe mencionar que los residuos de jitomate casi duplican la humedad máxima del 15 % permitida en este tipo de biocombustibles (Tabla 4), por lo que se aplicó un proceso de deshidratación solar.

TABLA 3.

Poder calorífico de algunos materiales combustibles.

Fuente: Reyes [17].

MATERIAL	PODER CALORÍFICO (MJ/kg)
RESIDUOS DE JITOMATE	19.74
CARBÓN MINERAL	21
GAS LP	49
CASCARILLA DE ARROZ	15.8
PELLETS DE MADERA	17
FIBRA DE COCO	16.3



TABLA 4.

Composición química de los residuos de cultivo de jitomate.

Fuente: Reyes et al.[17].

COMPUESTO	PORCENTAJE POR CADA TON DE RESIDUO DE JITOMATE
HEMICELULOSA	14.2
CELULOSA	39.35
LIGNINA	12.25
PROMEDIO DE HUMEDAD	34.2

Balance energético

En función de la capacidad de producción de 3744.5 m³ en el invernadero, se estimó una generación de 2.92 toneladas de residuos por cada ciclo productivo, tomando en consideración la masa cuantificada de residuos. Tras los procesamientos de trituración y deshidratación descritos en la sección de Metodología, se obtuvo un total de 1.82 toneladas de pellets. Este tipo de biocombustible, además de ser una fuente de energía calorífica para el propio invernadero, funge como proveedor de dióxido de carbono para el mismo ciclo productivo.

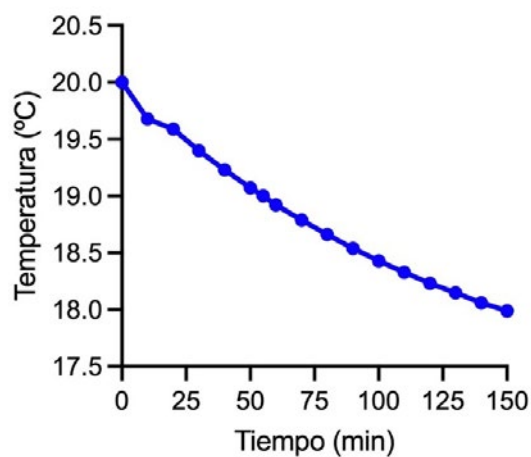
Una vez obtenidos los pellets, se calculó el flujo de calor requerido para elevar la temperatura en un rango de 3-5 °C en el interior del invernadero. Con esa finalidad, se partió de la valoración de la masa de aire en el espacio de estudio (aproximadamente 4841.74 kg); después, se determinó el flujo de calor por sustitución en la Ecuación 1. Al final, se llegó a la conclusión de que, para alcanzar un aumento de 3 °C, se requiere una masa de 3.15 kg de gas LP (poder calorífico de 49 000 kJ/kg) por cada grado/h, o 7.74 kg/h de pellets.

Los cálculos de transferencia de calor para alcanzar al equilibrio térmico interior y exterior revelaron que, a partir de las 2.5 horas, la temperatura cae por debajo de los requerimientos del cultivo (Figura 1). Por lo tanto, y como se había mencionado anteriormente, cada mes tiene una diferen-

cia en cuanto al volumen de pellets necesarios. A manera ilustrativa, en la Tabla 5 se presentan los datos de septiembre.

FIGURA 1.

Curva de la ecuación trazada a partir de la Ley de enfriamiento de Newton.



Para el cálculo de las variables en cada una de las ecuaciones fueron considerados los parámetros enlistados en la Tabla 5.

TABLA 5.

Datos calculados de GLP y pellets consumidos en el mes de septiembre.

En el mes de septiembre se consumieron aproximadamente 464.25 kg de las 1.82 toneladas totales de pellets. Se concluye que, en su conjunto, los 1821.6 kg producidos alcanzan a cubrir el 77 % de la necesidad energética del ciclo.

VARIABLE	VALOR	UNIDADES
MASA DE AIRE	4841.74	kg
CALOR ESPECÍFICO (c_p): AIRE	1.052	kJ/kg K
DELTA DE TEMPERATURA (ΔT)	4	K
CALOR	20374.03	kJ
CALOR ESPECÍFICO (c_p): PELLETS	19740	kJ/kg K
MASA DE PELLETS	1.03	kg
TIEMPO DE QUEMA	6	minutos
FLUJO DE PELLETS	10.32	kg/h
USO DIARIO	1.5	horas
MASA DE PELLETS POR DÍA	15.48	kg/día
MASA DE PELLETS POR MES	464.45	kg/mes
FLUJO DE GAS LP	4.16	kg/h



Viabilidad económica

Conforme a lo reportado por la Comisión Reguladora de Energía de México [18], el precio del gas LP en la comunidad de Amazcala consta de 1.251 dólares por kg. En consecuencia, el costo de calefacción por hora asciende a 5.21 dólares, es decir, 234 dólares mensuales. Por otra parte, de acuerdo con Martínez Guido *et al.* [19], la producción de pellets a partir de residuos orgánicos tiene un costo de 34 dólares por tonelada.

A partir de los valores mostrados en la Tabla 6 se infiere que la producción de cada kg de pellets cuesta 0.034 dólares, lo que equivale al 97 % menos del precio por cada kg de gas LP. Asimismo, se calcula que en caso de sustituir el 77 % de la demanda de energía con pellets, se tendría un ahorro del 71 % por ciclo productivo. No obstante, cabe destacar que solo es posible satisfacer el 77 % de la demanda energética del invernadero, debido a la limitante de la cantidad de residuos agrícolas generados.

TABLA 6.

Estimación económica.

VARIABLE	VALOR	UNIDADES
CANTIDAD DE PELLETS REQUERIDOS POR CICLO	2360	kg
PELLETS PRODUCIDOS	1821	kg
COSTO DE PELLETS PRODUCIDOS	61	dólares
PELLETS FALTANTES	539	kg
GAS LP COMPLEMENTARIO	217	kg
AHORRO TEÓRICO DE GAS LP	1189	dólares
COSTO DE GAS LP FALTANTE	271	dólares
AHORRO REAL POR CICLO	854	dólares
FLUJO DE GAS LP REQUERIDO POR CICLO	951	kg
FLUJO DE GAS LP CUBIERTO CON PELLETS	733	kg
PORCENTAJE CUBIERTO	77	%

Viabilidad ambiental

Como se mencionó anteriormente en la sección de Metodología, se llevó a cabo una evaluación ambiental mediante el estudio ACV [11], normado por la ISO-14040 [12]. El análisis de ciclo de vida compara el daño ambiental causado por ambas alternativas energéticas para generar una visión sobre las posibles ventajas de sustituir un combustible convencional como el gas LP. El alcance de la prueba (Figura 2) hace notar la disponibilidad de ambas fuentes de energía para mantener la temperatura del invernadero. En particular, el caso de los pellets producidos a partir de residuos de jitomate se considera un proceso cerrado: la biomasa residual de la producción primaria es quemada para el control de la temperatura interna; las emisiones resultantes son fijadas por el cultivo a través del proceso de fotosíntesis [20]. Cabe destacar que el uso de gas natural también genera emisiones perjudiciales que son liberadas a la atmósfera.

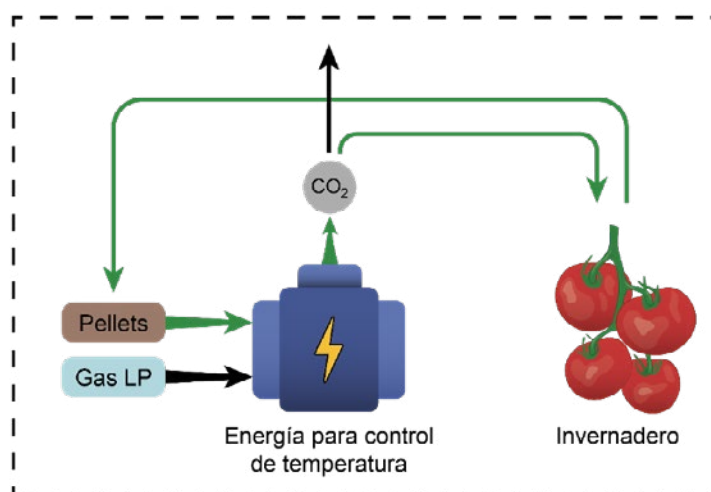


FIGURA 2.

Sistema delimitado para el ACV. En cuanto al estudio de caso, la unidad funcional empleada contaba con potencia de 1 kWh.

A partir de la Figura 2 es posible identificar los límites del sistema analizado. Para elaborar el inventario de emisiones de ambos sistemas se recurrió al modelo de gases de efecto invernadero, emisiones reguladas y uso de energía en diversas tecnologías (GREET®), diseñado en el Argonne National Laboratory [13]. En la Tabla 7 se cuantificaron las emisiones generadas por ambas fuentes (pellets y gas) en el control térmico del invernadero. Las cifras de emisiones aparecen enlistadas en kg por kWh. En la columna "Diferencia" se presenta la comparativa entre el porcentaje de emisiones generadas por la biomasa (pellets) y de gas LP.



TABLA 7.

Inventario de emisiones generadas por ambas fuentes de calor.

kg/kWh			
EMISIONES	BIOMASA	GAS LP	DIFERENCIA (%)
CO ₂ total	2.589×10^{-02}	3.523×10^{-01}	92.65
VOC	9.915×10^{-05}	5.252×10^{-05}	-88.79
CO	1.229×10^{-04}	3.508×10^{-04}	64.97
NO _x	2.156×10^{-04}	3.347×10^{-04}	35.58
PM ₁₀	3.413×10^{-05}	2.195×10^{-05}	-55.49
PM _{2.5}	1.988×10^{-05}	2.168×10^{-05}	8.30
SO _x	1.390×10^{-03}	7.054×10^{-05}	-1870.51
CH ₄	9.086×10^{-05}	1.049×10^{-03}	91.34
N ₂ O	1.718×10^{-04}	4.876×10^{-06}	-3423.38

VOC representa los compuestos orgánicos volátiles liberados a la atmósfera.

PM₁₀ representa las partículas de polvo, cenizas, hollín, metal, cemento o polen dispersas en la atmósfera cuyo diámetro aerodinámico es menor que 10 µm.

PM_{2.5} representa las partículas de polvo, cenizas, hollín, metal, cemento o polen dispersas en la atmósfera cuyo diámetro aerodinámico es 2.5 µm.

Para evaluar el impacto ambiental generado por ambas opciones de control térmico se aplicó el Eco-indicador 99 [21]. Dicha herramienta considera tres categorías de daño: salud humana, ecosistemas y recursos naturales; es importante señalar que los cálculos se realizaron tomando en cuenta la unidad funcional descrita previamente. En este sentido, en la categoría de daños a la salud por problemas respiratorios se contabilizaron 8.53×10^{-6} DALY¹ por el uso de pellets y 3.72×10^{-6} DALY por el de gas LP (Tabla 8). En la categoría de daños a la salud por cambio climático, se registraron 1.15×10^{-6} DALY debidos a la combustión de pellets y 4.81×10^{-6} por gas LP (Tabla 9). Por otro lado, en cuanto a los daños ocasionados al ecosistema (Tabla 10), la quema de pellets causó 5.22×10^{-7} PDF (unidades

¹ De acuerdo con la metodología del Eco-indicador 99, un DALY representa la cantidad estimada de días perdidos por el ser humano a causa de contaminantes, es decir los días restados a su vida promedio.

de daño por acidificación y eutrofización), y la de gas LP sumó 3.86×10^{-7} . En términos de daño a los recursos naturales, se produjeron 6.59×10^{-5} MJ residuales del uso de gas LP para la generación de 1 kWh de energía, mientras el impacto es nulo cuando se emplean pellets como fuente energética. El balance ambiental global evidencia que, por cada kWh suministrado por los pellets para mantener la temperatura dentro del invernadero, se obtiene 87 % menos eco-puntos, en comparación con el gas LP (Tabla 11). A tal efecto, el reciclaje de los residuos de jitomate tiene un impacto ambiental menos grave que el combustible convencional para la regulación térmica dentro del invernadero.

TABLA 8.

Categoría: daños respiratorios en humanos (DALY).

EMISIONES	SUSTANCIAS ORGÁNICAS		SUSTANCIAS INORGÁNICAS	
	PELLETS	GAS LP	PELLETS	GAS LP
VOC	4.15×10^{-09}	2.20×10^{-09}	-	-
CH ₄	7.55×10^{-11}	8.71×10^{-10}	-	-
NO _x	-	-	1.24×10^{-06}	1.93×10^{-06}
PM ₁₀	-	-	8.33×10^{-07}	5.36×10^{-07}
PM _{2.5}	-	-	9.04×10^{-07}	9.87×10^{-07}
SO _x	-	-	4.94×10^{-06}	2.50×10^{-07}
N ₂ O	-	-	6.10×10^{-07}	1.73×10^{-08}
TOTAL (POR TIPO DE SUSTANCIA)	4.23×10^{-09}	3.07×10^{-09}	8.52×10^{-06}	3.72×10^{-06}
TOTAL (GLOBAL)	8.53×10^{-06}	3.72×10^{-06}		

TABLA 9.

Categoría: daños a la salud humana por cambio climático (DALY).

EMISIONES	PELLETS	Gas LP
CO ₂ Total	3.52×10^{-07}	4.79×10^{-06}
CH ₄	2.60×10^{-08}	1.43×10^{-08}
N ₂ O	7.70×10^{-07}	6.63×10^{-11}
TOTAL	1.15×10^{-06}	4.81×10^{-06}



TABLA 10.

Categoría: daños a la calidad del ecosistema por acidificación y eutrofización (PDF).

EMISIONES	PELLETS	Gas LP
NO _x	2.39×10^{-07}	3.72×10^{-07}
SO _x	2.82×10^{-07}	1.43×10^{-08}
TOTAL	5.22×10^{-07}	3.86×10^{-07}

TABLA 11.

Impacto ambiental generado por cada alternativa energética (Eco-puntos).

FUENTE DE CALOR	PELLETS	Gas LP
Salud humana (DALY)	8.97×10^{-06}	8.52×10^{-06}
Calidad del ecosistema (PDF)	5.21×10^{-07}	3.85×10^{-07}
Recursos naturales (MJ residuales)	-	6.59×10^{-05}
Total (Eco-puntos)	9.49×10^{-06}	7.48×10^{-05}

Conclusiones

Como fue posible observar, los residuos agroindustriales son una materia prima beneficiosa en la fabricación de biocombustibles debido a su composición fisicoquímica y potencial energético. Asimismo, se identificó una reducción significativa en términos de impacto ambiental, lo que convierte a los desechos en fuentes energéticas sustentables, en comparación con su contraparte convencional. Adicionalmente, la disponibilidad de residuos orgánicos permite planificar su uso e integración como fuentes de energía alterna a las cadenas de suministro principales,

o incluso a otros procesos. En pos de una economía circular, la reintegración de los desperdicios agrícolas a su misma cadena productiva contribuye al alargamiento del ciclo de vida de los subproductos generados y residuos. Por último, al optar por este tipo de estrategias se reducen los costos de producción a largo plazo, lo que a su vez suscita una mayor ganancia para los productores.



Referencias

- [1] FAO. "Alimentación y agricultura sostenibles", Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, 2022. <https://www.fao.org/sustainability/background/es/>
- [2] G. Forkuor, W. Amponsah, P. Oteng-Darko, G. Osei, "Safeguarding food security through large-scale adoption of agricultural production technologies: The case of greenhouse farming in Ghana", *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 6, 2022, DOI: 10.1016/j.clet.2021.100384
- [3] I. Tsafaras, J. Campen, C. Stanghellini, H. Zwart, W. Voogt, K. Scheffers, A. Alharbi, K. Assaf, "Intelligent greenhouse design decreases water use for evaporative cooling in arid regions", *Agricultural Water Management*, vol. 250, 2021, DOI: 10.1016/j.agwat.2021.106807
- [4] M. Naseer, T. Persson, I. Righini, C. Stanghellini, H. Maessen, M. Verheul, "Bio-economic evaluation of greenhouse designs for seasonal tomato production in Norway", *Biosystems Engineering*, vol. 212, pp 413-430, 2021, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2021.11.005
- [5] N. Katsoulas, A. Sapounas, F. Zwart, J. Dieleman, C. Stanghellini, "Reducing ventilation requirements in semi-closed greenhouses increases water use efficiency", *Agricultural Water Management*, vol. 156, pp 90-99, 2015, DOI: 10.1016/j.agwat.2015.04.003
- [6] U. Çakir, E. Şahin, "Using solar greenhouses in cold climates and evaluating optimum type according to sizing, position and location: A case study", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 117, pp 245-257, 2015, DOI: 10.1016/j.compag.2015.08.005
- [7] B. H. Vanthoor, J. C. Gazquez, J. J. Magan, M. N. Ruijs, E. Baeza, C. Stanghellini, E. J. van-Henten, P.H. de-Visser, "A methodology for model-based greenhouse design: Part 4, economic evaluation of different greenhouse designs: A Spanish case", *Biosystems Engineering*, vol. 111, pp. 336-349, 2012, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2011.12.008
- [8] A. Pakari, S. Ghani, "Evaluation of a novel greenhouse design for reduced cooling loads during the hot season in subtropical regions", *Solar Energy*, vol. 181, pp 234-242,

- 2019, DOI: [10.1016/j.sole-ner.2019.02.006](https://doi.org/10.1016/j.sole-ner.2019.02.006)
- [9] W. Hongkang, L. Li, W. Young, M. Fanjia, W. Haihua, N. A. Sigrimis, "Recurrent Neural Network Model for Prediction of Microclimate in Solar Greenhouse", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, pp. 790-795, 2018, DOI: [10.1016/j.ifacol.2018.08.099](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.099).
- [10] I. Dupuis, "Estimación de los residuos agrícolas generados en la isla de Tenerife resumen del estudio de GPA S.L. para el cabildo insular de Tenerife (No. 1)", *Servicio técnico de agricultura y desarrollo rural*, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1145/1067268.1067287>
- [11] E. Ruiz. "El análisis de ciclo de vida. Metodología de decisión y evaluación ambiental en el sector de la edificación", Tesis de grado. Universidad Politécnica de Valencia, 2016.
- [12] Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia, ISO 14040, International Standard Organization, 2021 <https://envira.es/es/iso-14040-principios-relacionados-gestion-ambiental/>
- [13] GREET® Model, The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies Model (2021). Argonne National Laboratory. <https://greet.es.anl.gov/>
- [14] Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI. *México en cifras: Querétaro*, 2021. <https://inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?agg=22#collapse-Resumen>
- [15] Weather Spark. *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Amazcala, México*. 2022. <https://es.weatherspark.com/y/5020/Clima-promedio-en-Amazcala-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- [16] Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, 2016. *Manual técnico del cultivo de tomate (Solanum Lycopersicum)*. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-10921.pdf>
- [17] Y. Reyes, M. Arteaga, Y. Morejón, A. Fuentes, "Valoración del potencial energético de los residuos agroindustriales de tomate para su empleo como biocombustible", Carrillo, vol. 10(2), pp. 1-9, 2020. <https://www.redalyc.org/journal/5862/586263256006>
- [18] Comisión Reguladora de Energía. *Precios de gasolina, diésel y gas LP*, septiembre 2022. <https://www.gob.mx/cre/documentos/>



precios-maximos-aplica-
bles-de-gas-lp?idiom=es

- [19] S. I. Martínez, J. F. García, C. Gutiérrez, A. Dominguez, F. I. Gómez, J. M. Ponce, "The integration of pelletized agricultural residues into electricity grid: Perspectives from the human, environmental and economic aspects", *Journal of Cleaner Production*, vol. 321, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128932>
- [20] S. I. Martínez, J. F. García, C. Gutiérrez, F. I. Gómez, "Optimal agriculture residues revalorization as a biofuel alternative in electric power grids", *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 49, pp. 595-600, 2022. Doi: [10.1016/B978-0-323-85159-6.50099-3](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85159-6.50099-3)
- [21] M. Goedkoop, R. Spriensma, "The Eco-Indicator 99: A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment", PRé: Product Ecology Consultants, Países Bajos. https://pre-sustainability.com/legacy/download/EI99_annexe_v3.pdf

Recibido el 11 de enero de 2023, aceptado el 22 de mayo de 2023.

ABUNDANCIA, CARACTERIZACIONES MOLECULARES Y PRODUCCIÓN MASIVA DE COMUNIDADES MICROBIANAS BENÉFICAS (NEMATODOS ENTOMOPATÓGENOS) DEL SUELO

ABUNDANCE, MOLECULAR CHARACTERIZATIONS
AND MASS PRODUCTION OF BENEFICIAL MICROBIAL
COMMUNITIES (ENTOMO-PATHOGENIC NEMATODES)
FROM THE SOIL

Gobinath Chandrakasan*
Juan Fernando García Trejo
Óscar Alatorre Jácome
Enrique Rico García

Universidad Autónoma de Querétaro, México.

*gobinath.chandrakasan@uaq.mx



Licencia Creative Commons Reconocimiento - NoComercial - CompartirIgual 4.0 Internacional (cc by-nc-sa 4.0).



Resumen

Los nematodos entomopatógenos (NEP) se consideran una de las mejores alternativas para el control biológico de plagas de insectos. Entre sus principales características, los NEP muestran una alta eficiencia en el control activo de macroinvertebrados, poseen altas tasas de fecundidad y fertilidad, son inocuos en plantas y vertebrados, asimismo como su cultivo y manejo demandan costos asequibles. Con el fin de obtener cepas activas de NEP (utilizadas como biocontrol para proteger de los insectos fitopatógenos a las plantas), se recolectaron diversas muestras de suelo de cultivo agrícola y forestal, a su vez, fueron caracterizadas fisicoquímicamente. Posteriormente, se utilizaron larvas de *Galleria mellonella* para el aislamiento de NEP, estos últimos fueron identificados en función de sus características morfológicas, y reproducidos a escala laboratorio mediante técnicas de agitación orbital. Como resultado, se detectó que en 10 % de las muestras hay presencia de NEP. Gracias a que se utilizaron métodos de biología molecular y análisis metagenómicos, se identificaron dos taxones de NEP: *Steinernema* spp. y *Heterorhabditis* spp., con una abundancia relativa del 8 y 2 %, respectivamente. Por último, se llevaron a cabo ensayos para el establecimiento de un cultivo axénico a mediana escala de los nep; se implementaron técnicas tradicionales, como el cultivo en matraz bola y el agitado orbital bajo condiciones de crecimiento controladas, con el fin de evitar mayores inversiones en insumos costosos. Como conclusión, el cultivo de los nep presenta una alternativa real y sostenible para el biocontrol de plagas que afectan diferentes cultivos agrícolas.

Palabras clave: bio-control, *Galleria mellonella*, nematodos benéficos, PCR, *Steinernema* spp.

Entomopathogenic Nematodes (EPN) are considered one of the best alternatives for the biological control of insect pests. Among their main characteristics, EPNS show high efficiency in the active control of macroinvertebrates, have high fecundity and fertility rates, are harmless to plants and vertebrates, and their cultivation and management present affordable costs. In order to obtain active strains of EPN used as biocontrol to protect plants from phytoparasitic nematodes, various samples were collected from agricultural and forestry cultivation. The soil samples were characterized phys-



Abstract

iochemically, subsequently *Galleria mellonella* larvae were used for the isolation of EPN, the latter were identified based on their morphological characteristics, and reproduced on a laboratory scale using orbital shaking techniques. As a result, in 10 % of the samples the presence of EPN was detected. Using methods of molecular biology and metagenomic analysis identified two EPN taxa: *Steinernema* spp. and *Heterorhabditis* spp. and, with a relative abundance of 8 and 2 %, respectively. Finally, tests were carried out for the establishment of a medium-scale axenic culture of EPNs, using traditional techniques without excessively expensive inputs, such as conical flask culture and orbitally shaken flasks under controlled growth conditions, in order to avoid further investment in infrastructure. In conclusion, the cultivation of these EPN presents a real and sustainable alternative for the bio-control of pests that affect different agricultural crops.

Keywords: biocontrol, *Galleria mellonella*, beneficial nematodes, PCR, *Steinernema* spp.

Introducción

El control biológico es una estrategia para el manejo de insectos, malezas y enfermedades que aprovecha las asociaciones biológicas de antagonismo natural entre estos organismos. De origen tanto polifilético como heterogéneo, el catálogo de especies registradas para los fines de control biológico comprende desde bacterias simples hasta vertebrados complejos [1]. Un grupo de microorganismos eucariontes protozoarios que ha sido ampliamente estudiado son los nematodos: gusanos redondos, alargados, no segmentados, incoloros, sin apéndices visibles, de vida libre y parasitaria. Los nematodos beneficiosos, al contrario que los fitopatológicos, atacan a las plagas de insectos de manera específica. La introducción de nematodos entomopatógenos como agentes de control biológico en la agricultura aporta varias ventajas:



1. Son seguros para el medio ambiente y los cultivos.
2. Tienen un enfoque preciso de acción, ya que solo parasitan a insectos y artrópodos perjudiciales, sin afectar a organismos beneficiosos, como abejas o enemigos naturales de las plagas.
3. Demuestran eficacia contra una amplia gama de plagas de insectos, incluyendo las larvas de escarabajos, gusanos del maíz, mosquitos y orugas de mariposas [2].

Los nematodos capaces de infectar y matar insectos se denominan *nematodos entomopatógenos* (NEP) [3], [4] y pertenecen a las familias *Steinernematidae* y *Heterorhabditidae*. Las condiciones ambientales pueden afectar su supervivencia, virulencia y potencial reproductivo; no obstante, su distribución es prácticamente global, con registros de ocurrencia en todos los suelos del mundo, a excepción de la Antártida [5]. Los NEP sostienen una relación mutualista con bacterias simbióticas de los géneros *Xenorhabdus* spp. y *Photorhabdus* spp. Estas últimas son endosimbiontes localizados a lo largo del intestino de las larvas juveniles en estado infeccioso.

El cultivo de nematodos entomopatógenos presenta una alternativa sostenible para el biocontrol de plagas que afectan diferentes cultivos agrícolas. Estos animales poseen una alta eficiencia en el control activo de macroinvertebrados y altas tasas de fecundidad y fertilidad, se consideran una de las mejores alternativas para el control biológico de insectos.

Los nematodos son invertebrados cuyo ciclo de vida consta de seis etapas; en la tercera es cuando los juveniles infecciosos (IJ, *infective juveniles*, la única etapa de vida libre de los NEP) emprenden su búsqueda de hospederos, a quienes terminan alcanzando por atracción química. Los IJ comportan las bacterias endosimbiontes a lo largo del tracto intestinal en el caso de la familia *Heterorhabditidae*, o en una vesícula especial en la familia *Steinernematidae* [6], [7]; invaden al insecto huésped a través de sus orificios naturales (cavidad bucal, ano y espiráculos) o en algunos casos a través de la cutícula. Una vez dentro del insecto hospedero, las bacterias simbióticas se liberan y acaban por inducirle la muerte. Posteriormente, los simbioses bacterianos establecen y mantienen las condiciones adecuadas para la reproducción del nematodo, proporcionando nutrientes y sustancias antimicrobianas que inhiben el crecimiento de una amplia gama de microorganismos dentro y fuera del cadáver [8]. Los NEP completan su desarrollo y habitan el cadáver del anfitrión de dos a tres generaciones. Al agotarse la comida, los IJ lo abandonan en busca de nuevos huéspedes.

Gracias a estos procesos, ya hay varios productos comerciales basados en NEP disponibles para el control de plagas. Y se han realizado encuestas en varios países para optimizar las condiciones ecológicas locales para el aislamiento de nuevas cepas [9]. Los NEP también se consideran adecuados en hábitats donde los pesticidas agroquímicos carecen de la eficiencia requerida. Este es el caso de los hábitats crípticos. No obstante, dado que en estos microhábitats la tasa de mortalidad de IJ por factores extrínsecos es mínima, se espera seguir recabando evidencia sobre su potencial. El fundamento para esta perspectiva es que existen reportes favorables del desempeño en la supervivencia y la persistencia de los NEP [10].

La producción comercial de NEP consta de tres enfoques básicos: producción *in vivo*, fermentación sólida *in vitro* y fermentación líquida *in vitro* [11]. Se considera que esta última aporta mayor rentabilidad económica; por tanto, constituye el grueso de la industria. Sin embargo, el método requiere personal altamente capacitado y costos elevados de puesta en marcha. Se pueden adoptar varios métodos para mejorar el cultivo *in vitro*, incluida la optimización de los medios y las características de fermentación [12]. Por otra parte, el cultivo *in vivo* a nivel comercial explota grandes cantidades de insectos: los especímenes se inoculan con NEP y de los huéspedes infectados se obtiene la cosecha a granel; generalmente se basa en el sistema de trampa blanca, el estándar para el cultivo a escala de laboratorio. Aunque no son la única, las larvas de *Galleria mellonella* constituyen la especie más común para la producción masiva *in vivo*.

El objetivo de este artículo es corroborar la potencialidad de aislamiento y caracterización de cepas selectas de nematodos entomopatógenos (NEP) como agentes de control biológico en la producción sostenible de alimentos. Se espera explotar la virulencia y efectividad del recurso a mediana y gran escala.



Materiales y métodos

Aislamiento de NEP

Las muestras de suelo se recolectaron y procesaron durante una semana mediante el método de cebo para insectos (trampa *Galleria*). Una muestra de suelo representativa de 250 g se colocó en una caja de plástico, para posteriormente inocularse con cinco larvas de estadio tardío de *Galleria mellonella*. Las cajas se almacenaron a 25 °C con un margen de ± 2 °C. Después de cinco días, las larvas muertas fueron recolectadas y transferidas a una trampa blanca [13] para confirmar y recolectar los IJ.

La trampa blanca consiste en un recipiente de plástico con una placa de Petri invertida de 5 cm de diámetro colocada en el fondo. Se dispuso un papel filtro Whatman 4 encima de la placa de modo que sus bordes entablaran contacto con el agua. Posteriormente, se humedeció el papel filtro con agua hasta saturarlo, luego se le colocaron larvas muertas. Después de 5 a 11 días, los IJ emergieron del cadáver y se asentaron en el agua. Todas las muestras se cebaron tres veces con larvas para obtener el máximo número de nematodos beneficiosos.

Extracción de ADN e identificación molecular de NEP

La caracterización molecular se llevó a cabo mediante el análisis de secuencias de ADN ribosómico. En genes nucleares, se emplearon las regiones del espaciador del transcrito interno (ITS) de *Steinernematidae* spp. y *Heterorhabditis* [14]. La extracción de ADN genómico se efectuó moliendo de 1 a 4×10^4 unidades de IJ en un mortero bajo nitrógeno líquido hasta que se formó un polvo blanco fino. Se recogió el polvo y se añadió 1 ml de tampón de extracción (Tris-Cl 10 mM, SDS al 1 %, NaCl 0.4 M, EDTA 5 mM, pH 8). Luego se incubaron 50 μ l de soluciones de proteína κ (0.01 g/ml) y posteriormente se mezclaron durante 30 min a 37 °C y posteriormente durante 60 min a 65 °M.

Seguidamente, la solución se extrajo por duplicado con volúmenes idénticos de fenol-cloroformo-álcohol isoamílico (25:24:1) (v:v:v) y finalmente con cloroformo-álcohol isoamílico (24:1) (v/v). El ADN se precipitó de la fase acuosa final añadiendo 2 volúmenes de etanol al 96 % (v/v) y 0.1 volúmenes de acetato de amonio 3 M y colocando la mezcla a 70 °C durante 30 min. El

ADN precipitado se sedimentó en una microcentrífuga y se secó al vacío a temperatura ambiente. El sedimento se suspendió en 50 µl de tampón TE (Tris-HCl 0.01 M, EDTA 0.001 M, pH -7.5) y se almacenó a 4 °C. La concentración de ácido nucleico se midió en un espectrofotómetro UV-Vis a 260 nm.

La reacción en cadena de la polimerasa (PCR por sus siglas en inglés) para la amplificación de los espaciadores internos transcritos (ITS) del ADN ribosómico se propició con la ayuda de un termociclador y los conjuntos de cebadores referidos por el cebador directo 18S (5'-GTTTCCGTAGGTGAACCTGC-3') y el inverso (5'-ATATGCTTAAGTTCAGCGGGT-3'). La condición de ciclo incluida fue: 1 ciclo de 94 °C durante 5 minutos, seguido de 35 ciclos de 94 °C en 30 segundos, 55 °C transcurridos 45 s y 72 °C en el curso de 60 segundos y una extensión final de 72 °C durante 1.3 minutos. Los productos de la PCR se separaron en gel de agarosa al 1.5 % teñido con bromuro de etidio y se visualizaron bajo luz ultravioleta con un sistema de imágenes transiluminador. La búsqueda BLAST indicó una similitud superior al 98 % entre las secuencias de productos de PCR de la muestra recuperada. La secuencia del árbol filogenético fue construida por Untitled ClustalW (Slow/Precisa, IUB).

Aislamiento de bacterias simbióticas (*Xenorhabdus* spp.)

En este procedimiento, las bacterias simbióticas se aislaron de especies de IJ individuales recién cosechadas. Las NEP se cultivaron en larvas de estadio tardío de *G. mellonella* según [15] a 25 °C y se almacenaron a 20 °C durante una semana antes de su uso. Las bacterias simbióticas aisladas de *Steinernema* spp. se extrajeron de una piscina de IJ recién emergidas que se desinfectaron sumergiéndolas en una solución de hipocloruro de sodio al 10 % durante 10 min y luego se enjuagaron dos veces con agua destilada estéril. Los IJ esterilizados en la superficie se destruyeron mediante agitación vorticial y el asa llena de suspensión se sembró en placas de agar NBTA (agar nutritivo 0.004 y 2, 3, 5-cloruro de trifeniltetrazolio y azul de bromotimol al 0.025 %) siguiendo el procedimiento de [16]. Se seleccionaron colonias individuales y subcultivaron en NBTA nuevo y este proceso se repitió hasta adquirir colonias puras de simbiontes bacterianos para cada especie de nematodo.

La extracción de ADN se realizó con bacterias simbiotes en el cultivo de dos días de edad a 27 ± 2 °C según [17]. Las colonias bacterianas permanecieron suspendidas en 100 µl de agua bidestilada y se desgastaron



manteniéndolas a 99 °C durante 15 minutos, seguido de centrifugación a 13 000 rpm y el sobrenadante se utilizó para la reacción de PCR. La subunidad pequeña (16 s) de ARNr se amplificó con los siguientes cebadores y condiciones de PCR:

- Cebador directo: (16 s 20) 5'-AGA GTTTGATCCTGG CTC-3'
- Imprimación inversa: (16 s 1390) 5'-GAC GGG CGG TGT GTA CAA-3'
- Condiciones de ciclo: incluida 1 ciclo de 94 °C durante 5 min, seguido de 35 ciclos de 94°C por 30 seg, 50 °C por 30 seg y 72 °C por 1 min y una extensión final de 72 °C por 15 min.

Los productos de la PCR se separaron en gel de agarosa al 1.5 % teñido con bromuro de etidio y se visualizaron bajo luz ultravioleta con un sistema de imágenes transiluminador.

Producción masiva in vitro de NEP usando agitador orbital

Se eligió solo una *Xenorhabdus* spp. en función de su virulencia y patogenicidad, que se sembró en placas NBTA y se incubó durante 48 h a 30 °C. Luego, un asa de una colonia aislada de la bacteria en fase I, se transfirió a 50 ml de medio STB [18] y se incubó durante 36 h a 30 °C y 150 rpm. Posteriormente, se inocularon 150 ml de medio de producción (PM) [19] con caldo de cultivo *Xenorhabdus* spp., STB al 5 % (v/v) y se incubaron durante 60 h a temperatura ambiente 30 °C y 150 rpm. Siguió la composición del medio STB:

- 3 % (p/v) de caldo de tripticasa de soja
- 0.5 % (p/v) de extracto de levadura
- pH-7

Este medio se utilizó para producir *Xenorhabdus* spp., para inocular el medio de producción de NEP y su composición PM fue:

- 2.3 % (p/v) de extracto de levadura
- 1.25 % (p/v) de yema de huevo deshidratada
- 0.5 % (p/v) de cloruro de sodio
- 4 % (v/v) de aceite de canola

Se empleó este método para cocultivar la NEP y su bacteria simbiótica. Los métodos de fermentación se pueden seguir con matraces especiales de tamaño, forma y agitación diseñados con ligeras modificaciones por [20]. Para determinar las concentraciones de nematodos se diluyeron de 10 a 1000 veces con agua estéril. Se usaron triplicados de muestras de 0.1 ml para el recuento microscópico de nematodos totales utilizando microscopía de campo de luz con un aumento de 40x con el recuento resultante multiplicado por el factor de dilución respectivo. El experimento fue realizado por duplicado y cada bioensayo se repitió cuatro veces. Los resultados de las pruebas por duplicado fueron combinadas para el análisis final, realizado con el software SigmaPlot® 12 (Systat Software, Inc., San Jose, CA, EE. UU.).

Resultados y discusión

Aislamiento y extracción de NEP del suelo

En el presente estudio se describe la abundancia y caracterización molecular, incluyendo la producción en masa de NEP potencial, que se localizó en una zona cultivada y otra no cultivada de Amazcala, Querétaro (Tabla 1). Se recolectaron un total de 100 muestras de suelo de diferentes áreas agrícolas (Figura 1 (a)). En condiciones de laboratorio, las muestras recolectadas se procesaron en una semana utilizando el método de cebo de insectos (trampa *Galleria*, Figura 1 (b y e)). Se colocó una muestra representativa de 250 g en una caja de plástico y se inoculó con cinco estadios tardíos de larvas de *G. mellonella* (Figura 1 (c)). Las cajas se almacenaron a 25 ± 2 °C. Después de cinco días, las larvas muertas fueron recolectadas y transferidas a una trampa blanca para confirmar y recolectar (Figura 1 (d)) juveniles infectantes (IJ). Para la multiplicación en masa de los nematodos (Figura 1 (f)), los IJ aislados se liberaron en un vaso de precipitados de 25 ml y luego se dejaron reposar durante unos treinta minutos. Se descartó el sobrenadante que contenía los residuos y los nematodos se asentaron en el fondo del vaso de precipitados. Con frecuencia, se añadió agua destilada, de tres a cuatro veces, a los IJ que contenían el vaso de precipitados, hasta que la suspensión apareciera transparente. Después, los IJ se almacenaron a una concentración de aproximadamente 1-4 10³ IJ/ml en agua destilada con formalina al 0.1 % en



TABLA 1.

Ocurrencia y distribución de NEP y sus características del suelo de diferentes zonas de muestreo de suelo.

un matraz de cultivo tisular, se almacenaron a 19.5 ± 0.5 °C en incubadora DBO, para evitar la falta de oxígeno y la mortalidad de IJ. Los nematodos extraídos se analizaron en el microscopio óptico (Figura 1). La observación arrojó especies de *Steinernema* spp. y *Heterorhabditis* spp. en el suelo. Los nematodos se cultivaron rutinariamente en larvas de *G. mellonella* [21].

SITIO DE MUESTREO	CULTIVOS AGRÍCOLAS/ TIERRA	NEP RECUPERADOS		TIPO DE SUELO	TEMPERATURA DEL SUELO (°C)	CONTENIDO ORGÁNICO (%)	PH	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (MS/CM)	TOTAL (%) DE STEINERNEMA SPP.	TOTAL (%) DE HETERORHABDITIS SPP.	TOTAL (%) DE NEP RECUPERADOS
		STEINERNEMA SPP.	HETERORHABDITIS SPP.								
Zona I (cultivos agrícolas)	Tomate	++	-	Arcilla	31	4.8	7.13	0.83			
	Pepino	++	-	Arcilla	28	3.9	7.24	1.19			
	Maíz	++	-	Arena	29	4.2	6.90	0.82	8 %	2 %	10 %
Zona II (tierra sin cultivar)	Pastos	+	-	Limo	28	3.3	6.90	0.86			
	Árboles	+	-	Limo	31	3.5	7.01	1.23			
	Plantas perennes	-	++	Limo	29	3.7	7.13	0.83			



FIGURA 1.

Procesamiento de muestras de suelo y Extracción de NEP.

(a) muestra de suelo recolectada del campo agrícola; (b) la larva de la polilla de la cera mayor (*G. mellonella*) (Pyralidae, Lepidoptera) se utilizó como insecto modelo para el aislamiento de NEP; (c) el cebo en Galería de muestras de suelo con larvas sanas en una caja de plástico bien cerrada con orificio de oxígeno, después de 5 a 7 días de cebo muestra larvas muertas si su suelo contiene NEP; (d) cadáver de *G. mellonella* infectados con *Steinernema* spp en tres diferentes medios de cultivo. (e) método de reventado de blancos para extracción de IJ de NEP; (f) aparición de IJ en larvas de *G. mellonella*; (g) vista microscópica de NEP. cuyo diámetro aerodinámico es 2.5 μ m.

Identificación molecular y análisis filogenético

Para autenticar los genes nucleares aislados recuperados, se llevó a cabo un análisis *in silico* de las secuencias obtenidas con los datos de la región espaciadora del transcrito interno (ITS). Los aislamientos mostraron el patrón de desarrollo típico de *Steinernema* spp. y *Heterorhabditis* spp. Las investigaciones taxonómicas revelaron que, de los 10 aislamientos, GC-06, GC-15, GC-26, KTM-08, GC-38, GC-41, KTM-32 y GC-48 pertenecen a *Steinernema* spp. GC-64, GC-89 conciernen a *Heterorhabditis* spp. (Tabla 2). Se eligió solo un NEP (KTM-08) para un estudio molecular adicional basado en la virulencia y la patogenicidad. El resultado de la amplificación de las ITS produjeron una secuencia de nucleótidos de 600 pares de bases (pb) que forman parte del 18 s parcial (ITS 1, ITS 2, Figura 2 (a)). La secuencia obtenida del aislado NEP tenía un 99 % de similitud con la de *Steinernema* spp. de aislamientos estrechamente relacionados; en cambio, la similitud con las secuencias de otros *Steinernema* spp. relacionados se puede observar en la Figura 2. Por otro lado, también existen reportes de la especie *S. siamkayai* del continente asiático [22], [23]. En este caso, esta especie se encontró dentro de campos de cultivo y prados en zonas cálidas. No obstante, también hay reportes de ocurrencias de aislamiento de *S. siamkayai* alrededor del mundo, en todo tipo de hábitats y condiciones climáticas.

TABLA 2.

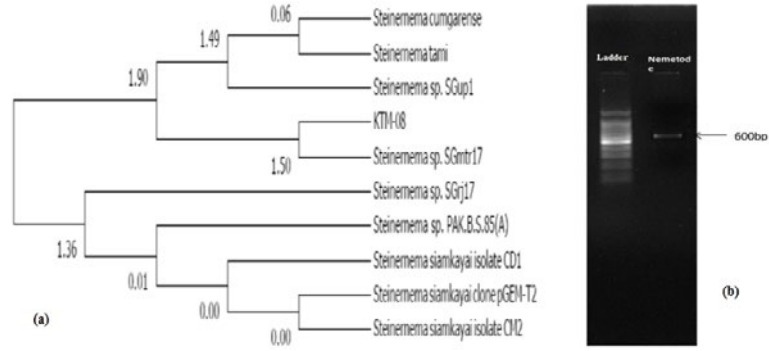
Atributos de infectividad en IJ de NEP en larvas de *G. mellonella*.

RECUPERADO AISLAR CÓDIGO DE MUESTRA	APARICIÓN LARVAS CADAVÉRICAS DE GALLERIA INFECTADAS	(%) DE TASA DE INFECTIVIDAD (HORAS)		TIEMPO PROMEDIO DE DURACIÓN DE LA INFECCIÓN (HORAS)	PRODUCCIÓN Y DESARROLLO DE NEP EN CADÁVER (DÍAS)	TIEMPO DE DURACIÓN DE LA EMERGENCIA IJ (DÍAS)
		STEINERNEMA SPP.	HETERORHABDITIS SPP.			
GC-06	Negro	45	-	24 - 48	4 - 5	6
GC-15	Negro	35	-	72 - 96	6 - 7	6
GC-26	Negro	40	-	24 - 48	5 - 6	7
KTM-08	Negro	50	-	24 - 48	4 - 5	8
GC-38	Negro	45	-	24 - 48	4 - 5	6
GC-41	Marrón	35	-	48 - 72	5 - 6	7
KTM-32	Marrón	40	-	48 - 72	6 - 7	7
GC-48	Marrón	30	-	48 - 96	6 - 7	6
GC-64	Marrón grisáceo	-	45	48 - 96	5 - 6	7
GC-89	Rojo	-	40	24 - 48	4 - 5	6



FIGURA 2.

Resultados del an3lisis gen3tico de NEP de *Steinernema*.



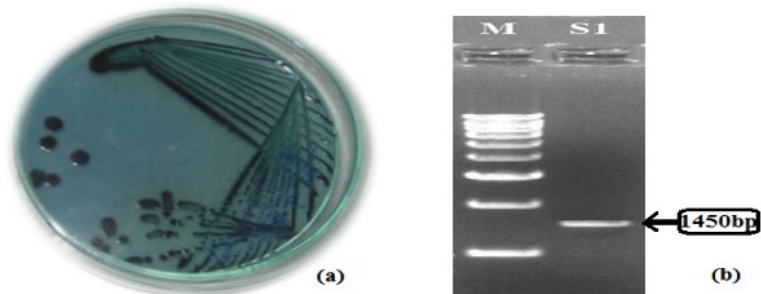
(a) 3rbol filogen3tico de *Steinernema siamkayai* (KTM-08); (b) im3genes de PCR para especies de *Steinernema* spp. de tierras agr3colas utilizando cebadores espec3ficos de especies ITS m3s marcador de ADN.

Aislamiento e identificaci3n de bacterias simbi3ticas

Para el nivel primario se observ3 la identificaci3n de colonias bacterianas simbi3ticas en base a la absorci3n de colorantes de azul de bromotimol y trifenil tetrazolio de placas NBTA (Figura 3 (a)). En las observaciones basadas en la morfolog3a de la colonia azul-verde, las tres cepas aisladas pertenec3an al g3nero *Xenorhabdus* spp. aislados de IJ de *Steinernema* spp. Para una mayor autenticaci3n, se identificaron bacterias simbi3ticas aisladas a nivel molecular a trav3s de la secuenciaci3n del gen codificante al 16 S ARNr. El simbiote se amplific3 mediante el uso de cebadores de PCR que representan regiones del ARNr 16 S conservadas en bacterias. Las cepas produjeron una 3nica banda de aproximadamente 1450 pb (Figura 3 (b)).

FIGURA 3.

Muestra el crecimiento de bacterias simbi3ticas en la placa petri y caracterizaci3n molecular.



(a) Colonias de color azul que muestran *Xenorhabdus stockiae*; (b) im3genes de fragmentos amplificados por PCR de ARNr 16s en *X. stockiae*.

Se recuperaron NEP de diferentes especies (10 %) y su prevalencia ha sido reportada con antelación bajo diferentes condiciones ambientales. Parámetros como el clima, altitud, vegetación y diversidad de hábitats son factores diferenciales en las caracterizaciones de sus nichos ecológicos. Por eso, tener evidencia de ocurrencia de una riqueza de diez especies de NEP del suelo agrícola, es un indicador importante de su asociación con insectos plaga. Todas las muestras positivas se recuperaron de suelos arcillosos. Con las fuentes consultadas, se puede encontrar la coincidencia en que la movilidad y supervivencia de NEP se ve favorecida en suelos con alto contenido de arena [24], [25]. Con los resultados de este estudio se demuestra la riqueza, diversidad y abundancia de las poblaciones de NEP en diferentes ambientes (arables y forestales). Se observa que cada especie tiene un patrón de distribución característico, y con ayuda de la cladograma a nivel de ADN nuclear, se perciben polimorfismos que efectivamente confirman las adaptaciones y la diferencia de poblaciones según las condiciones ambientales de estos organismos. Por otro lado, la presencia de *Steinernematidae* en la mayoría de las áreas estudiadas indica el papel potencial de estos nematodos en la regulación natural de las poblaciones de insectos. Y, de hecho, se tiene una ratio de 4:1 S:H en ocurrencia de especies en las muestras estudiadas.

Cultivo masivo *in vitro* de NEP

Hasta ahora, se han abordado las propiedades de poblaciones de NEP en sus ambientes nativos. No obstante, para saber si estas poblaciones son viables para ser cultivadas fuera de su ambiente natural, se requirió llevar a cabo cultivos exógenos e *in vitro* con semilla obtenida de las poblaciones silvestres. Dentro de los procesos de producción en masa de NEP es fundamental conocer las condiciones óptimas para realizar de manera exitosa el cultivo líquido *in vitro* de la mayor cantidad de organismos. Las variables que se consideraron en este estudio, para el cultivo masivo de NEP, son mencionadas en la Tabla 3. Entre ellos, los objetivos fundamentales son el tiempo de cultivo, la temperatura y el pH. De manera subjetiva y secundaria, se tiene el volumen del medio y del matraz y las revoluciones por minuto (RPM) que se emplean para mantener en resuspensión el cultivo. En suma, se intenta hacer una mezcla homogénea



con una agitación constante. Para este objeto, las técnicas referidas en la investigación fueron empleadas por [26] y [27]. Los presentes estudios exploran la producción de cultivos líquidos de *S. siamyakai*. En la Tabla 3 se mencionan las condiciones empleadas para el cultivo masivo de NEP.

El cultivo comenzó con esterilización de las larvas NEP con IJ suspendidos en una solución líquida de hiamina al 0.125 % por 20 minutos. Posteriormente, el concentrado de la muestra de IJ fue lavado con abundante agua esterilizada. A continuación, se procedió a inocular los IJ en cajas de petri con el fin de establecer los primeros stocks de cultivo axénico las bacterias *Xenorhabdus spp.* Para esto, se utilizó el medio de cultivo STB:

1. La primera etapa consistió en inocular 50 ml de medio contenidos en matraces con volumen de 250 ml por 36 horas.
2. En la segunda se compensó el medio ya consumido con otros 120 ml de medio, por 48 horas adicionales.
3. Después que el crecimiento bacteriano alcanzó la densidad poblacional de 4×10^3 IJ/ml, se logró llegar a la fase estacionaria.

Finalmente, para alcanzar la fase de cultivo masivo, se transfiere el cultivo a un biorreactor de matraz de agitación. Esta fase corresponde a 10 muestras, cada biorreactor con 10 ml de medios de producción con IJ desinfectados (Tabla 3).

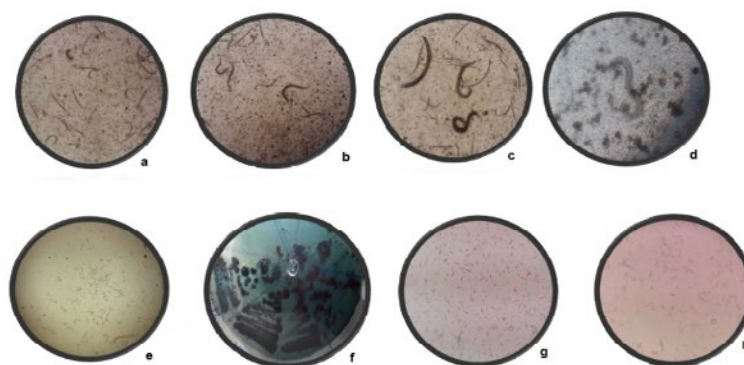
TABLA 3.

VARIABLES DE CRECIMIENTO EMPLEADAS EN BACTERIAS SIMBIÓTICAS (*Xenorhabdus spp.*) USANDO MEDIOS LÍQUIDOS DE PRODUCCIÓN DE *Steinernema spp.* CONTROLADOS POR MEDIDAS FÍSICAS Y MECÁNICAS.

MEDIO	DÍAS/HORAS	pH	TEMPERATURA	RPM (REVOLUCIONES POR MINUTO)	VOLUMEN DE MEDIOS (ML)	VOLUMEN DEL MATRAZ (ML)
Medio STB	36 horas	7.2	30	130	50	250
Medio de producción	48 horas	8.0	30	130	120	500
Biorreactor de matraz de agitación diseñado	8 días	8.2	25	130	10	120

FIGURA 4.

Microfotografías de luz de las etapas de desarrollo de *Steinernema* sp. Durante la incubación en medio de producción.



(a) IJ 2; (b) IJ 4; (c) hembras jóvenes/hermafroditas; (d) adulto; (e) oviposición y J1; (f) fase primaria y secundaria del crecimiento bacteriano; (g) colonias bacterianas en los medios de producción; (h) colonias bacterianas en medios STB.

La cría de bacterias simbióticas tiene por objetivo aprovecharlas para potenciar tanto la virulencia como la productividad de IJ en cultivos líquidos *in vitro* de NEP (Figura 4) [28]. Sin embargo, durante la producción de NEP, los IJ se recuperaron y se desarrollaron rápidamente en diferentes etapas:

- Figura 4 (a) el día 1, muestra el IJ2.
- Figura 4 (b) el día 3, muestra J4.
- Figura 4 (c) el día 5, muestra las hembras jóvenes/hermafroditas.
- Figura 4 (d) el día 6, muestra al adulto.
- Figura 4 (e) el día 8, muestra a los adultos productores de huevos.

En la Figura 4 (paneles g y h), se percibe un desarrollo sobresaliente observado en el proceso de población de nematodo que ocurrió alrededor del día 5. Tanto el medio STB como el PM favorecieron el crecimiento de *Xenorhabdus* spp., que creció en placas NBTA inoculadas con muestras de caldo de cultivo. En cambio, en el panel 4f se muestran las fases primarias y secundarias que se dieron durante el cultivo.

En el caso de la curva de crecimiento de la densidad del cultivo, los valores se pueden observar en la Figura 5. En este caso, se explicita el lugar gráfico de las densidades de nematodos en función del tiempo y el modo de fermentación utilizado para la producción en masa. Durante los primeros 3 días de procesos, la densidad de nematodos no cambió, el resultado se mantuvo en 4×10^3 IJ/ml. Las concentraciones máximas de nematodos después de ocho días, seguido de los pro-

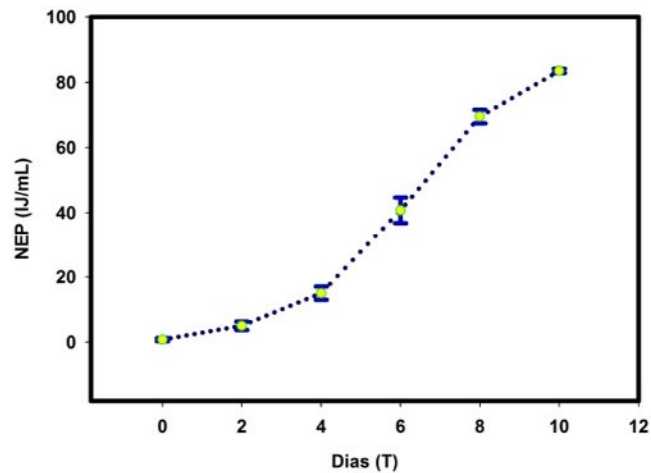


FIGURA 5.

Aumento de las densidades de *Steinernema* spp. en relación con el tiempo y el proceso de producción. Al final del período de producción: la densidad inicial de NEP es de 4×10^3 IJs/ml y la concentración final de NEP final es de 85×10^3 IJ/ml, con el 95 % de ellos en la etapa infectiva juvenil (IJ).

cesos de inoculación, fueron 85×10^3 IJ/ml. Este resultado confirma lo reportado anteriormente en la literatura, y también coincide el registro ocular correspondiente a una adecuada recuperación de NEP y al creciente número de hembras reproductivas [29], [30].

Por tanto, se ha registrado un crecimiento de 11 veces su densidad sobre la población original, en tan solo 10 días.



Conclusión

En el presente trabajo se realizó la caracterización de NEP silvestres y su domesticación. Se describe la metodología para llevar a cabo este proceso en otros niveles variados de poblaciones no comerciales de NEP. Su ejecución plantea un modelo probado de cultivo de poblaciones de organismos entomopatógenos que son inocuos al ambiente y que no representan un riesgo antes, durante y después del cultivo de alimentos. Así mismo, se describen aspectos relevantes de las poblaciones silvestres y parámetros útiles de producción de NEP a nivel de laboratorio. Al probarse la metodología, se abre un nuevo panorama para futuras investigaciones de sinecología comparativa, así como la nueva documentación de casos de éxito (de este modelo) que prescinde de compuestos dañinos al ambiente. Cabe destacar que, dada su simpleza, la técnica puede implementarse en pequeños laboratorios en diversos ambientes, con lo cual no se depende directamente de proveedores ni de abastos. Las líneas de investigación que abre el presente estudio para evaluar en profundidad los alcances de estos métodos anteriormente descritos

son bastante amplias, desde fenómenos sinecológicos hasta agroecológicos, pasando por todos los niveles de complejidad de las interacciones ecológicas para propiciar cultivos más sostenibles y rendimientos más productivos.



Referencias

- [1] G. Chandrakasan, M. T. Ayala, J. F. G. Trejo, G. Marcus, M. Maruthupandy, C. C. Kanisha, M. Murugan, F. A. AL-mekhlafi y M. A. Wadaan, "Bio controlled efficacy of *Bacillus thuringiensis* cry protein protection against tomato fruit borer *Helicoverpa armigera* in a laboratory environment", *Physiological and Molecular Plant Pathology*, vol. 119, pp. 101827, 2022.
- [2] A. Thanwisai, P. Muangpat, W. Meesil, P. Janthu, A. Dumida, C. Subkrasae, J. Ardpairin, S. Tandhavanant, T. P. Yoshino y A. Vitta, "Entomopathogenic Nematodes and Their Symbiotic Bacteria from the National Parks of Thailand and Larvicidal Property of Symbiotic Bacteria against *Aedes aegypti* and *Culex quinquefasciatus*", *Biology*, vol. 11, no. 11, pp. 1658, 2022.
- [3] M. E. Aalaoui, F. Mokrini, A. A. Dababat, R. Lahlali y M. Sbaghi, "Moroccan entomopathogenic nematodes as potential biocontrol agents against *Dactylopius opuntiae* (Hemiptera: Dactylopiidae)", *Scientific Reports*, vol. 12, no. 7590, pp. 1-7, 2022.
- [4] G. Chandrakasan, P. Seetharaman, S. Gnanasekar, M. Kadarkarai y S. Sivaperumal, "Xenorhabdus stockiae KT835471-mediated feasible biosynthesis of metal nanoparticles for their antibacterial and cytotoxic activities", *Artificial Cells, Nanomedicine and Biotechnology*, vol. 45, no. 8, pp. 1675-1684, 2017.
- [5] J. Ramakrishnan, L. Salame, A. Nasser, I. Glazer y D. Ment, "Survival and efficacy of entomopathogenic nematodes on exposed surfaces", *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, p. 4629, 2022.
- [6] G. O. Poinar y G. M. Thomas, "Significance of *Achromobacter nematophilus* Poinar and Thomas (*Achromobacteriaceae: Eubacteriales*) in the development of the nematode, DD-136 (*Neoplectana* sp. *Steinernematidae*)", *Parasitology*, vol. 56, no. 2, pp. 385-390, Mayo 1966.
- [7] A. F. Bird y R. J. Akhurst, "The name of the intestinal vesicle in Nematodes of the family *Steinernematidae*", *International Journal for Parasitology.*, vol. 13, no. 6, pp. 599-606, Dic. 1983.

- [8] S. Forst y K. Neelson, "Molecular Biology of the Symbiotic-Pathogenic Bacteria *Xenorhabdus* spp. and *Photorhabdus* spp.", *Microbiology Reviews*, vol. 60, no. 1, pp. 21-43, 1996.
- [9] M. D. Kaya, G. Okçu, M. Atak, Y. Çikili y Ö. Kolsarici "Seed treatments to overcome salt and drought stress during germination in sunflower (*Helianthus annuus* L.)", *European Journal of Agronomy*, vol. 24, no. 4, pp. 291-295, 2006.
- [10] Z. Mráček, S. Bečvář, P. Kindlmann y J. Jersáková, "Habitat preference for entomopathogenic nematodes, their insect hosts and new faunistic records for the Czech Republic", *Biological Control*, vol. 34, no. 1, pp. 27-37, 2005.
- [11] D. I. Shapiro-Ilan y W. A. Gardner, "Improved control of *Curculio caryae* (Coleoptera: Curculionidae) through multi-stage pre-emergence applications of *Steinernema carpocapsae*", *Journal of Entomological Science*, vol. 47, no. 1, pp. 27-34, Ene. 2012.
- [12] L. G. Leite, D. I. Shapiro-Ilan, S. Hazir y M. A. Jackson, "Effect of inoculum age and physical parameters on *in vitro* culture of the entomopathogenic nematode *Steinernema feltiae*", *Journal of Helminthology*, vol. 91, no. 6, pp. 686-695, 2016.
- [13] G. F. White, "A method for obtaining infective nematode larvae from cultures", *Science*, vol. 66, no. 1709, pp. 302-303, 1927.
- [14] S. P. Stock, J. F. Campbell y S. A. Nadler, "Phylogeny of *Steinernema* Travassos, 1927 (Cephalobina: Steinernematidae) inferred from ribosomal DNA sequences and morphological characters", *Journal of Parasitology*, vol. 87, no. 4, pp. 877-889, 2001.
- [15] S. R. Dutky, J. V. Thompson y G. E. Cantwell, "A technique for the mass propagation of the DD-136 nematode," *Journal of Insect Physiology*, vol. 6, no. 4, pp. 417-422, 1964.
- [16] R. J. Akhurst, "Morphological and functional dimorphism in *Xenorhabdus* spp., bacteria symbiotically associated with the insect pathogenic nematodes *Neoaplectana* and *Heterorhabditis*", *Journal of General Microbiology*, vol. 121, pp. 303-309, 1980.
- [17] P. Tailliez, S. Pages, N. Ginière y N. E. Boemare, "New insight into diversity in the genus *Xenorhabdus*, including



the description of ten novel species", *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, vol. 56, no. 12, pp. 2805-2818, 2006.

- [18] E. J. Buecher y I. Popiel, "Liquid culture of the entomogenous nematode *Steinernema feltiae* with its bacterial symbiont", *Journal of Nematology*, vol. 21, no. 4, pp. 500-504, 1989.
- [19] N. Chavarría-Hernández y M. de la Torre, "Population growth kinetics of the nematode, *Steinernema feltiae*, in submerged monoxenic culture," *Biotechnology Letters*, vol. 23, no. 4, pp. 311-315, 2001.
- [20] S. J. Pérez-Campos, A. I. Rodríguez-Hernández, M. R. López-Cuellar, A. Zepeda-Bastida y N. Chavarría-Hernández, "In vitro liquid culture of the entomopathogenic nematode, *Steinernema colombiense*, in orbitally shaken flasks", *Biocontrol Science and Technology*, vol. 28, no. 9, pp. 901-911, 2018.
- [21] D. I. Shapiro-Ilan, E. E. Lewis, R. W. Behle y M. R. McGuire, "Formulation of entomopathogenic nematode-infected cadavers", *Journal of Invertebrate Pathology*, vol. 78, no. 1, pp. 17-23, 2001.
- [22] H. B. Khatri-Chhetri, L. Waeyenberge, H. K. Manandhar y M. Moens, "Natural occurrence and distribution of entomopathogenic nematodes (*Steinernematidae* and *Heterorhabditidae*) in Nepal", *Journal of Invertebrate Pathology*, vol. 103, no. 1, pp. 74-78, 2010.
- [23] K. Lalitha, K. Nithya, B. G. Bharathi, S. Venkatesan y M. S. Shivakumar, "Long-term storage does not affect the infectivity of entomopathogenic nematodes on insect hosts", *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 107, no. 7, pp. 419-431, 2022.
- [24] S. Hazir, N. Keskin, S. P. Stock, H. K. Kaya y S. Özcan, "Diversity and distribution of entomopathogenic nematodes (*Rhabditida: Steinernematidae* and *Heterorhabditidae*) in Turkey", *Biodiversity and Conservation*, vol. 12, no. 2, pp. 375-386, 2003.
- [25] N. E. Kary, G. Niknam, C. T. Griffin, S. A. Mohammadi y M. Moghaddam, "A survey of entomopathogenic nematodes of the families *Steinernematidae* and *Heterorhabditidae* (*Nematoda: Rhabditida*) in the north-west of Iran," *Nematology*, vol. 11, no. 1, pp. 107-116, 2009.

- [26] M. D. Dunn, P. D. Belur y A. P. Malan, "A review of the in vitro liquid mass culture of entomopathogenic nematodes," *Biocontrol Science and Technology*, vol. 31, no. 1, pp. 1-21, 2021.
- [27] C. I. Cortés Martínez y N. Chavarría Hernández, "Production of entomopathogenic nematodes in submerged monoxenic culture: a review", *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 117, no. 12, pp. 3968-3985, 2020.
- [28] N. E. Boemare y R. J. Akhurst, "The Genera *Photorhabdus* and *Xenorhabdus*" in *The Prokaryotes: Vol. 6, Proteobacteria: Gamma subclass*, New York: Springer-Verlag, pp. 451- 494, 2002.
- [29] D. Upadhyay, R. Kooliyottil, S. Mandjiny, F. L. Inman y L. D. Holmes, "Mass production of the beneficial nematode *Steinernema carpocapsae* utilizing a fed-batch culturing process", *International Journal of Phytopathology*, vol. 2, no. 1, pp. 52-58, Abr. 2013.
- [30] A. Hirao y R. U. Ehlers, "Influence of inoculum density on population dynamics and dauer juvenile yields in liquid culture of biocontrol nematodes *Steinernema carpocapsae* and *S. feltiae* (Nematoda: Rhabditida)," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 85, no. 3, pp. 507-515, 2010.



EFECTO DE LA LUZ EN LA PRODUCCIÓN DE *HERMETIA ILLUCENS*: REVISIÓN

EFFECT OF LIGHT ON *HERMETIA ILLUCENS* PRODUCTION: REVIEW

Saúl López Juárez
Quilaztli Carolina Escobar Montoya
Juan Fernando García Trejo
Ana Angélica Feregrino Pérez
Benito Parra Pacheco
Humberto Aguirre Becerra*

Universidad Autónoma de Querétaro, México

* humbertoagbe@hotmail.com



Abstract

Black soldier fly (*Hermetia illucens*) is an organism capable of transforming organic waste into compounds that can be used in production chains; in terms of circular economy, this capacity is of great commercial interest. Currently, the insect is bred indoors and in greenhouses, under natural light conditions; however, the shortening of sunlight periods throughout the year limits fly reproduction, making it necessary to introduce complementary artificial lighting. The application of this resource has shown that the characteristics of light, such as intensity, photoperiod and electromagnetic spectrum have effects on the life expectancy of adult flies, oviposition times, number of postures, fertility and fecundity, among other parameters. Consequently, modulating supplementary artificial lighting in isolated indoor cultures could enhance the production of soldier fly larvae. This review aims to build a compendium of

Resumen

La mosca soldado negra (*Hermetia illucens*) es un organismo capaz de transformar residuos orgánicos en compuestos aprovechables en cadenas productivas; en términos de la economía circular, dicha capacidad resulta de gran interés comercial. Actualmente, el insecto se cría en interiores e invernaderos, bajo condiciones de luz natural; sin embargo, el acortamiento de los periodos de luz solar a lo largo del año limita la reproducción de las moscas, haciendo necesario introducir iluminación artificial complementaria. La aplicación de este recurso ha demostrado que las características de la luz, tales como intensidad, fotoperiodo y espectro electromagnético tienen efectos en la esperanza de vida de las moscas adultas, tiempos de oviposición, número de posturas, fertilidad y fecundidad, entre otros parámetros. En consecuencia, modular la iluminación artificial complementaria en cultivos interiores aislados podría potenciar la producción de larvas de mosca soldado. Esta revisión pretende construir un compendio de aquellos artículos que estudiaron la aplicación de sistemas de iluminación en la producción de mosca soldado negra; el objetivo final es establecer las bases para la selección de una fuente lumínica óptima en el cultivo de este organismo.

Palabras clave: dormancia, espectro electromagnético, huevo, LED, posturas, rendimiento.



those articles that studied the application of lighting systems in the production of black soldier fly; the final objective is to establish the basis for the selection of an optimal light source in the cultivation of this organism.

Keywords: dormancy, electromagnetic spectrum, egg, LED, batches, yield.

Introducción

La mosca soldado negra (MSN), *Hermetia illucens*, es capaz de convertir residuos orgánicos en compuestos incorporables a cadenas productivas; puede transformarse en harina para la alimentación animal, fertilizantes en la agricultura y lípidos para la producción de biodiesel [1], [2] (Figura 1). La MSN presenta una destacada adaptabilidad a distintos tipos de residuos orgánicos, desde heces hasta carne, vegetales y demás desechos alimentarios. Por otro lado, el tracto digestivo de las larvas puede disminuir los microorganismos patógenos presentes en la materia residual [2], [3], [4].

FIGURA 1.
Esquema del papel de la mosca soldado negra en la biotransformación de residuos orgánicos.



El rendimiento productivo de MSN a lo largo del año está sujeto a los cambios ambientales de temperatura, humedad y luz, y su ciclo biológico dura normalmente entre 39 y 47 días [4] (Figura 2); en ocasiones más, dependiendo de las condiciones climáticas [5].



Esta revisión pretende construir un compendio de aquellos artículos que estudiaron la aplicación de sistemas de iluminación en la producción de mosca soldado negra. El objetivo final es establecer las bases para la selección de una fuente lumínica óptima en el cultivo de este organismo.

En la entomocultura son habituales las estructuras expuestas a la iluminación natural [6], [7], [8]. Sin embargo, el apareamiento de MSN disminuye cuando las condiciones lumínicas fluctúan, tanto en circunstancias naturales como de laboratorio, incluso si la humedad y temperatura permanecen constantes. Por desgracia, tales fluctuaciones causan producciones irregulares —a menudo insuficientes— de huevecillos a lo largo del tiempo [9]. Una solución consiste en construir granjas en interiores que permitan regular y mantener los parámetros ambientales de manera artificial, instalando fuentes de luz estables en la producción de huevecillos [10].



FIGURA 2.

Fases del ciclo biológico de la mosca soldado negra.

Se han reportado fuentes de iluminación LED, lámparas de cuarzo, halógeno, fluorescentes y otras combinaciones para la crianza de MSN [11], y cada una tiene consecuencias en el apareamiento y en la postura [10], [12]. Sin embargo, permanecen inciertos los detalles específicos de las variables como el fotoperiodo, el espectro electromagnético, la intensidad luminosa y la irradiancia.



El objetivo de este artículo fue realizar una revisión bibliográfica de estudios relacionados con la aplicación de sistemas de iluminación artificiales; en específico, los efectos en la producción de mosca soldado negra y su potencial como base para la selección de fuentes lumínicas apropiadas para el cultivo.

Metodología

La revisión bibliográfica se elaboró a partir de fuentes primarias y secundarias mediante servicios de búsqueda como Google Scholar, Conrycyt y Redalyc [13]. Se utilizaron palabras clave como: "*Hermetia illucens*", "black soldier fly", "light", "artificial illumination" "led", "intensity", "spectrum", "indoor", "mating", "photoperiod", "diapause", "egg", "oviposition" y sus combinaciones.

Los datos extraídos del análisis de resultados, discusiones y conclusiones de los diferentes autores se enfocaron en los tópicos relacionados con la aplicación de sistemas de iluminación natural y artificial en la producción de MSN.

Resultados y discusión

Intensidad lumínica

Este parámetro cambia de forma natural a lo largo del día y el año, y difiere entre regiones según la geografía [9]. Las variaciones durante el año son determinantes en una gran variedad de organismos, porque promueven la regulación de sus ciclos biológicos [14]. En la MSN, se han reportado umbrales de intensidad mínima para el apareamiento de $63 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$; es decir, ningún encuentro se da a cualquier valor por debajo de esta cifra [7]. La instalación de lámparas en sistemas de producción disminuye las fluctuaciones en la intensidad lumínica ocasionada por el ambiente [10]. Las respuestas en la biología de la MSN expuesta a distintas condiciones lumínicas se muestran en la Tabla 1.

TABLA 1.

Respuestas de la MSN a distintos tipos de intensidad lumínica.

La intensidad de la luz es un factor determinante para el inicio del apareo. Existe una correlación positiva entre la intensidad y el número de apareamientos; sin embargo, no se reportan pruebas sobre el efecto de la intensidad en el número de posturas [7]. Una investigación [10] arroja resultados que aparentemente mejoran la postura en MSN a

CONDICIONES	RESPUESTA	REFERENCIA
<p>Cambio en la intensidad lumínica desde 63 a 200 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Lámparas Sylvania Gro Lux (40-watt), Pro Ultralight System (430-watt) y luz natural (ventana de 60 × 90 cm) como control. Temperatura de 22 °C y humedad relativa (HR) 60-70 %, 8 horas de luz por día. Jaula: 1.5 × 1.5 × 3 m. Dieta: Gainesville (Hogsette, 1985). Población: 750 adultos (<15 horas de edad).</p>	<p>Hay correlación positiva entre la intensidad y el número de encuentros entre hembra y macho. El apareamiento es nulo en intensidades bajas. Más del 75 % de los apareamientos ocurren en intensidades superiores a 200 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. La hora del día afecta la frecuencia de encuentros. No se observan apareamientos bajo lámparas artificiales. Se sugiere que la luz natural es esencial en el apareamiento y fertilización de los huevos.</p>	[7]
<p>Lámpara cuarzo-yodo (500-watt QVF135, 350 a 2500 nm, 135 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), lámpara rare-earth (450-watt, 350-450 nm, 160 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) y luz natural (invernadero). Jaula: 1.8 × 1.2 × 1.5 m. Dieta: 50 % salvado de trigo, 30 % harina de alfalfa y 20 % harina de maíz. Población: 1000 adultos recién emergidos. Temperatura de 28 °C y HR 60 %, 9 horas de luz por día.</p>	<p>No se observaron apareamientos bajo la lámpara rare-earth. La de cuarzo-yodo presentó menos apareamientos en comparación con la luz natural. Las larvas y pupas obtenidas de los tratamientos no presentaron diferencias en el tiempo de desarrollo. La longitud de onda y la intensidad tienen un efecto en el apareamiento.</p>	[8]
<p>Lámparas LED de 790 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en la parte superior de la jaula y 47 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en la inferior durante 16 horas al día, de 06:00 a 22:00 horas; luz solar entre 600 y 2000 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 2 horas por día, de 10:00 a 12:00 horas. Jaula: 27 × 27 × 27 cm. Dieta: 100 g salvado, 60 g dieta de conejos, 10 g levadura seca y 240 ml agua. Población: 50 hembras y 50 machos, todos adultos.</p>	<p>Oviposición y patrones de postura similares en ambos tratamientos. La longevidad de machos cambia entre ambos tratamientos. La luz solar promueve mayor fertilidad e incubabilidad en comparación la lámpara LED.</p>	[15]
<p>Cambio en la irradiancia de 0.92 a 431 W/m^2; luz LED con picos en 440 nm y 540 nm, 14 horas diarias de luz.</p>	<p>92 % del apareamiento ocurre en el primer día. La probabilidad de apareo incrementó de un 23 % a 70 %. El apareo disminuye con el paso del tiempo en un mismo día.</p>	[12]
<p>Luz LED (23 y 5 W/m^2) con picos en 365, 450 y 515 nm en comparación con una lámpara fluorescente (24 y 14 W/m^2). Jaula: 30 × 30 × 30 cm. Población: 10 machos y 10 hembras. Temperatura de 26 °C, HR 70 %, pupas en oscuridad, 12 horas de luz por día a 23 W/m^2.</p>	<p>Las MSN expuestas a intensidades mayores de luz LED producen más huevos fértiles. Las expuestas a intensidades menores viven más. No hay diferencia significativa aparente en la producción de larvas y huevos.</p>	[10]
<p>Luz natural de 500 a 2500 lux (1382 promedio). Preferencia de sitios de oviposición: hojas secas, madera, cartón y plástico. Jaula: 60 × 60 × 60 cm. Población: 50 parejas de tamaño homogéneo. Atrayente de pollo al 60 % de humedad. Temperatura de 29.9 °C promedio y HR de 78.3 % promedio y 12 horas de luz por día aproximadamente.</p>	<p>Mayor oviposición de 11:00 a 15:00 horas, cuando la intensidad de luz (1600 a 2240 lux) y la temperatura (30.4 a 33 °C) presentaron los niveles máximos.</p>	[25]



través de la modificación de la intensidad lumínica; no obstante, el experimento no mostró diferencia significativa entre los tratamientos, quizás debido a las pocas repeticiones.

La comparación entre fuentes de iluminación artificiales y naturales evidencia que la luz solar juega un papel fundamental en la reproducción de MSN, mejorando la postura y la fertilidad. Los resultados sugieren que el sol funge como la fuente principal de los sistemas productivos de MSN, y recomiendan utilizar luz artificial complementaria en situaciones de poca iluminación causada por días nublados. Pero estos tratamientos rara vez consideran fuentes artificiales con intensidades lumínicas cercanas a la natural (mayores que $600 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Por otra parte, no todos los reflectores artificiales cumplen con un espectro electromagnético similar a la luz solar [7], [8], [15].

Existen artículos que reportan la intensidad lumínica en condiciones naturales, sin el uso de condiciones de iluminación estandarizadas [7], [8], [15]. Por ejemplo, [24] compara distintas intensidades de aireación en sistemas aislados de producción de larva; incluye las condiciones de humedad relativa, temperatura e intensidad de luz ambientales, y registra para esta última valores entre 3.90 y 25 469 lux. En [25] se analiza la preferencia de sitios de oviposición (hojas secas, madera, cartón y plástico) de las MSN hembras; además, la intensidad lumínica natural promedio se midió en 1382 lux con mínimos de 500 y máximos de 2500.

Dado que las características de la luz solar a lo largo del año varían con la longitud y latitud, la luz natural resulta difícil de comparar. [10] Ofrece una alternativa para los grupos control en el estudio de distintos espectros de luz; conocido como CIE D_{65} , se trata de un estándar de iluminación semejante a la luz natural. Por otra parte, el cotejo entre distintas fuentes de iluminación artificial se dificulta cuando no están descritas a cabalidad por sus creadores.

Espectro electromagnético

La mayoría de los insectos son sensibles a la luz UV [16]. La MSN adulto posee receptores capaces de detectar rangos del espectro electromagnético de 300 a 700+ nm [10]. Varios artículos han puesto a prueba distintas

fuentes de luz con variaciones en el espectro electromagnético, y han reconocido efectos en el tiempo de desarrollo y la postura, principalmente (Tabla 2). [10], también se detalló el espectro electromagnético al que responde el ojo compuesto de la MSN; el dato resulta fundamental para la fabricación de fuentes de iluminación, ya que promueve el ahorro de recursos energéticos al prescindir del rango que no genera respuesta de los fotorreceptores de la MSN. Por otra parte, aún se desconocen las intensidades óptimas basadas en este espectro y su efecto cuantitativo en la producción. Futuras investigaciones deben comprobar que las lámparas con el espectro electromagnético que sugieren los autores incrementan la producción de huevecillos y la fertilidad.

TABLA 2.

Artículos basados en la experimentación con rangos del espectro electromagnético.

CONDICIONES	RESPUESTA	REFERENCIA
<p>Comparación de 3 fuentes de luz: LED de 400 a 750 nm y pico en 438 nm; lámpara de 311 a 711 nm y picos en 430, 541, 612, y lámpara de halógeno de > 300 nm. Intensidad de 59 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ a media altura de la caja en todos los tratamientos. 16 horas de luz por día.</p> <p>Dieta: pienso de pollo molido al 60 % de humedad.</p> <p>Población: 40 machos y 40 hembras (<24 horas de edad)</p> <p>Jaula: caja de polipropileno 39 × 28 × 28 cm.</p> <p>Temperatura de 27 °C y HR 60 %.</p>	<p>El sitio de oviposición varió según la fuente de luz.</p> <p>La lámpara de halógeno generó tiempos de vida más cortos y aumentó la fecundidad.</p>	[11]
<p>Comparación de fuentes lumínicas con temperaturas de color de 3000, 4000 y 6500 K. 12 horas de luz por día.</p> <p>Dieta: Pienso de pollo.</p> <p>Jaula: 60 × 60 × 90 cm.</p> <p>Población: 200 adultos aleatorios, de pupas < 24 horas de edad.</p> <p>Temperatura de 25 °C y HR de 40 ± 10 %,</p>	<p>La diferencia en la temperatura de color no afecta el periodo de oviposición.</p> <p>El día con mayor oviposición cambia entre los tratamientos.</p> <p>La fecundidad no varía entre los tratamientos.</p>	[17]
<p>Evaluación de la sensibilidad ocular de la MSN a diferentes espectros de luz (255-760 nm).</p> <p>Dieta: alimento para pollo.</p> <p>Temperatura de 26 °C y HR 70 %.</p>	<p>Fotorreceptores R1-6 sensibles a luz UV (367 nm) y azul (440 nm). Receptor R8Y con sensibilidad máxima a espectro de 535 nm (luz verde).</p> <p>Los fotorreceptores presentan mayor excitación ante espectros producidos de manera artificial, en comparación con luz fluorescente y un control de luz CIE D₆₅.</p>	[10]

[11] y [17] experimentaron con el espectro electromagnético y constataron un efecto en las características de la postura. Sin embargo, el cambio indiscriminado del espectro electromagnético entre los tratamientos oscurece el efecto puntual de los diferentes tipos de luz en la postura. Asimismo, los tratamientos deben considerar densidades poblacionales estandarizadas que permitan maximizar la producción en jaula, así como las condiciones ambientales de temperatura, humedad y fotoperiodo.



Fotoperiodo

El fotoperiodo depende de las estaciones del año. En México se estiman 13:23 horas de luz como máximo para el periodo junio-julio 2023, mientras que en diciembre-enero se espera un mínimo de 10:53 horas de luz, aproximadamente 2 horas y media de diferencia. Del mismo modo, el acortamiento del día está acompañado por la disminución de la temperatura [18] y la consecuente aparición del efecto dormancia en los insectos: disminuyen su tasa metabólica y retrasan su desarrollo como respuesta a la llegada del invierno [19]. Se sabe que el efecto también se presenta en la MSN, de modo que los sistemas de crianza en interiores proveen una alternativa para mantener los cultivos en condiciones adecuadas de temperatura e iluminación naturales [20]. Conocer el efecto del fotoperiodo sobre la biología de la MSN podría contribuir a maximizar la producción de huevo y minimizar el tiempo de desarrollo (Tabla 3).

TABLA 3.

Artículos basados en la experimentación con distintos fotoperiodos.

CONDICIONES	RESPUESTA	REFERENCIA
<p>Prepupas expuestas a tiempos de 0, 4, 8 y 12 horas de luz; 2,8, 5478, 724 y 8450 lux respectivamente. 14 horas de luz artificial por día.</p> <p>Dieta: residuos orgánicos triturados.</p> <p>Jaula: 10 dm³.</p> <p>Población: 20 adultos en jaula de vuelo. 100 larvas iniciales por repetición.</p> <p>Temperatura de 29 °C y HR 68 %.</p>	<p>Adultos emergieron en todos los tratamientos.</p> <p>Las pre-pupas con 0 horas de luz tomaron menos tiempo en emerger.</p> <p>Fecundidad en adultos aumenta en tiempos menores de exposición a la luz.</p> <p>Porcentaje de emergencia aumenta en pupas expuestas a menos luz.</p> <p>La longevidad de adultos disminuye en pupas expuestas a más luz.</p>	[21]
<p>MSN (huevo a pupa) expuesta a 0, 8 y 12 horas de luz; 2,49, 4215 y 5650 lux respectivamente.</p> <p>Jaula: 1.8 × 1.8 × 1.5 m (en invernadero).</p> <p>Dieta: Gainesville (Hogsette, 1985).</p> <p>Temperatura de 27 °C y HR 70 %.</p>	<p>El tratamiento con 0 horas de luz genera larvas con tiempos promedio de vida de 29 días; 11.1 y 9.47 días para 8 y 12 horas respectivamente.</p> <p>Mayores tasas de emergencia en moscas expuestas a 8 y 12 horas de luz.</p> <p>Adultos expuestos a más horas de luz prolongan su tiempo de vida.</p> <p>Mayor postura de huevos en MSN en tratamientos de 0 y 8 horas de luz.</p>	[22]
<p>Comparación de diferentes fotoperiodos: 2, 6, 12 y 18 horas de luz. Con espectro de 380 a 780 nm con 40 μmol m⁻²s⁻¹ en la parte inferior de la jaula.</p> <p>Población: 6500 ind/m³, con proporción de sexos de 0.64 hembra dominante.</p> <p>Dieta: residuo cervicero y cáscara de zanahoria.</p> <p>Jaula: 45 × 45 × 45 cm.</p> <p>Temperatura de 26±1 °C y HR 60±5 %</p>	<p>El tiempo de oviposición cambió entre los tratamientos.</p> <p>La duración del día no afectó la eclosión de huevos.</p> <p>La fertilidad y la oviposición son mayores de 6 a 18 horas de luz en comparación con 2 horas de luz.</p> <p>El pico de oviposición ocurre antes en fotoperiodo de 12 y 18 horas de luz en comparación con 2 y 6 horas.</p> <p>La tasa de eclosión no muestra diferencias entre tratamientos.</p>	[23]

La etapa larvaria de la MSN es conocida por su respuesta fotofóbica, sin embargo, experimentos que utilizan luz en las distintas etapas de la MSN han encontrado diferencias en el tiempo de desarrollo de la pupa. En [21] se advirtió que las prepupas expuestas a la luz demoraban más en desarrollarse y que la emergencia mejoraba en ausencia de luz. En contraste, otro estudio realizó un experimento similar, donde la MSN fue expuesta desde las etapas de huevo a pupa a distintos fotoperiodos; los resultados mostraron que la emergencia aumenta en MSN cuando se expone a mayores cantidades de luz [22]. Quizás las discrepancias se deban a la exposición a la luz en las distintas etapas de la MSN; por eso es necesario estandarizar la prueba considerando la ausencia de luz, intensidad, fotoperiodo y espectro en todas las etapas de la MSN.

Aparentemente, la aplicación de fotoperiodos mayores a 6 horas favorece la producción de huevecillo en comparación a fotoperiodos más cortos. Además, hay que recalcar que en [23] se realizó una prueba preliminar para determinar qué densidad poblacional maximiza la postura en una jaula de vuelo. Debido a los resultados entre los fotoperiodos de 6 a 18 horas, es recomendable estrechar el rango experimental de operación en futuras investigaciones; según las aseveraciones del equipo basadas en la extrapolación de sus resultados, debe considerarse una mayor densidad y los espectros de luz recomendados anteriormente [10].

Perspectivas

De naturaleza multifactorial, la luz es una variable esencial en el desarrollo de la MSN. Actualmente existen bases científicas para estudiar el desempeño de los sistemas de iluminación artificial en términos de intensidad, espectro electromagnético, tiempo de exposición y sus efectos en algunos aspectos biológicos de la MSN. Sin embargo, futuras investigaciones deben enfocarse a los modos de predecir y controlar los efectos de la luz en los aspectos biológicos del organismo, puesto que la información disponible a la fecha todavía resulta insuficiente. Entre los tópicos a estudiar con detenimiento se encuentra el establecimiento de umbrales mínimos y máximos de intensidad lumínica, la cual debe ser considerada estrictamente con el espectro electromagnético a utilizar.



Actualmente pocos estudios ponderan las variables determinantes en el apareamiento y la oviposición: densidad poblacional, tamaño de jaula de vuelo, gradiente de intensidad y espectro electromagnético a lo largo de la jaula, proporción y maduración sexual, hidratación en jaula, tipos de atrayente, mecanismo de colecta de huevo, entre otros. Es importante que los diseños experimentales a utilizar en futuros ensayos consideren la información generada por otros artículos enfocados en la MSN, con la finalidad de obtener resultados comparables.

Aún son desconocidos los efectos a largo plazo de la exposición de insectos a fuentes de luz artificial; entonces es importante tomar en cuenta que la información actual de los ciclos biológicos no está basada en producciones intensivas. Además, hace falta efectuar estudios longitudinales sobre el efecto de las fuentes de luz artificial en la dinámica poblacional y comportamiento genético de los insectos.

Conclusiones

A pesar de que la luz natural genera buenos rendimientos en producción de huevos y larvas, su variabilidad debido a factores climáticos provoca inestabilidad en los cultivos a lo largo del año. Los sistemas de luz artificial constituyen una alternativa para aquellas producciones donde la luz natural presenta alta variabilidad debido a las condiciones climáticas. Sin embargo, aún existen retos a superar en la investigación para mejorar los sistemas de iluminación existentes, principalmente los factores que optimicen la producción y viabilidad de los huevecillos.

Futuras investigaciones deben considerar el análisis integral de las variables ambientales que afectan la producción de la MSN: el espectro electromagnético, fotoperiodo e intensidad lumínica, así como la implementación de sistemas híbridos de luz artificial y natural.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado. Sin su patrocinio, llevar a cabalidad este trabajo habría sido imposible.

Fuentes de financiamiento

Apoyo económico de manutención otorgado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología con número de beca **1176922**.



Referencias

- [1] T. R. Green y R. Popa, "Enhanced ammonia content in compost leachate processed by black soldier fly larvae", *Applied Biochemistry and Biotechnology*, vol. 166, pp. 1381-1387, 2012.
- [2] C. H. Lalander, J. Fidjeland, S. Diener y S. Eriksson, "Vinneras, B. High waste to biomass conversion and efficient *Salmonella* spp. Reduction using black soldier fly for waste recycling", *Agronomy for Sustainable Development*, vol 35, pp. 261-271, 2015.
- [3] Y. S Wang y M. Shelomi, "Review of black soldier fly (*Hermetia illucens*) as animal feed and human food", *Foods*, vol. 6, pp. 91, 2017.
- [4] J. De Smet, E. Wynants, P. Cos y L. Van Campenhout, "Microbial community dynamics during rearing of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) and impact on exploitation potential", *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 84, 2018.
- [5] A. C. Samayoa y S. Y. Hwang, "Degradation capacity and diapause effects on oviposition of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae)", *Journal of economic Entomology*, vol. 111, no. 4, pp. 930-934, 2009.
- [6] J. K. Tomberlin, P. H. Adler y H. M. Myers, "Development of the black soldier fly (*Diptera: Stratiomyidae*) in relation to temperature", *Environmental entomology*, vol. 38, pp. 930-934, 2009.
- [7] J. K. Tomberlin y D. C. Sheppard, "Factors Influencing Mating and oviposition of black soldier Flies (Diptera: Stratiomyidae) in a Colony", *Journal of Entomological Science*, vol. 37, pp. 345, 2002.
- [8] J. Zhang, L. Huang, J. He, J. K. Tomberlin y J. Li, C. Lei, "An artificial light source influences mating and oviposition of black soldier flies, *Hermetia illucens*", *Journal of Insect Science*, vol. 3, 2010.
- [9] U. Julita, L. L. Fitri, R. E. Putra y A. D. Permana, "Mating Success and Reproductive Behavior of Black Soldier Fly *Hermetia illucens* L. (Diptera: Stratiomyidae) in Tropics", *Journal of Entomology*, vol. 17, pp. 117-12, 2020.
- [10] D. G. Oonincx, N. Volk, J. J. E. Diehl, J. J. A. Van Loon, and G. Belušič, "Photoreceptor spectral sensitivity of the compound eyes of black

- soldier fly (*Hermetia illucens*) informing the design of LED based illumination to enhance indoor reproduction", *Journal of insect physiology*, vol. 95, pp. 133-139, 2016.
- [11] C. D. Heussler, A. Walter, H. Oberkofler, H. Insam, W. Arthofer, B. C. Schlick Steiner y F. M. Steiner, Influence of three artificial light sources on oviposition and half-life of the Black Soldier Fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae): Improving small-scale indoor rearing, *PLoS One*, vol. 13, no. 5, 2018.
- [12] J. C. Schneider, "Effects of light intensity on mating of the black soldier fly (*Hermetia illucens*, Diptera: Stratiomyidae)", *Journal of Insects as Food and Feed*, vol. 6, pp. 111-119, 2020.
- [13] J. A. Girao-Goris, A. Olmedo-Salas, E. Ferrer-Fernández, "El artículo de revisión", *Revista Iberoamericana de Enfermería Comunitaria*, 2007.
- [14] C. G. H. Steel y X. Vafopoulou, "Circadian orchestration of developmental hormones in the insect, *Rhodnius prolixus*", *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology*, vol. 144, pp. 351-364, 2006.
- [15] S. Nakamura, R. T. Ichiki, M. Shimoda y S. Morioka, "Small-scale rearing of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae), in the laboratory: low-cost and year-round rearing", *Applied Entomology and Zoology*, vol. 51, pp. 161-166, 2016.
- [16] C. J. Van Der Kooi, D. G. Stavenga, K. Arikawa, G. Belušič y A. Kelber, "Evolution of Insect Color Vision: From Spectral Sensitivity to Visual Ecology", *Annual Review of Entomology*, vol. 66, pp. 435-461, 2021.
- [17] P. Klüber, D. Bakonyi, H. Zorn y M. Rühl, "Does Light Color Temperature Influence Aspects of Oviposition by the Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae)?", *Journal of Economic Entomology*, vol. 113, no. 5, pp. 2549-2552, 2020.
- [18] Time and Date AS. "Mexico City, Ciudad de México, Mexico - Sunrise, Sunset, and Daylength". Timeanddate.com. <https://www.timeanddate.com/sun/mexico>.
- [19] D. A. Hahn y D. L. Denlinger, "Meeting the energetic demands of insect diapause: nutrient storage and utilization", *Journal of Insect Physiology*, vol. 53, pp. 760-773, 2007.



- [20] K. Tougeron, "Diapause research in insects: historical review and recent work perspectives", *Entomologia Experimentalis et Applicata*, vol. 167, pp. 27-36, 2019.
- [21] L. Ferdousi y N. Sultana, "Impact of daylight duration on pupation and adult emergence of black soldier fly (*Hermetia Illucens*)", *International Journal of Entomology Research*, vol. 6, no. 1, pp. 142-145, 2021.
- [22] L. A. Holmes, S. L. VanLaerhoven y J. K. Tomberlin, "Lower temperature threshold of black soldier fly (*Diptera: Stratiomyidae*) development", *Journal of Insects as Food and Feed*, vol. 2, pp. 255-262, 2016.
- [23] B. Hoc, G. Noël, J. Carpentier, F. Francis y R. Caparrós-Megido, "Optimization of black soldier fly (*Hermetia illucens*) artificial reproduction", *PloS One*, vol. 14, no. 4, 2019.
- [24] M. Y. Abduh, M. P. Perdana, M. A. Bara, L. W. Anggraeni y R. E. Putra, "Effects of aeration rate and feed on growth, productivity and nutrient composition of black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae", *Journal of Asia-Pacific Entomology*, vol. 25, no. 2, 2022.
- [25] U. Julita, L. L. Fitri, R. E. Putra y A. D. Permana, "Ovi-trap Preference in the black soldier fly, *Hermetia illucens* L. (Diptera: Stratiomyidae)", *Journal Biological Sciences*, vol. 24, pp. 562-570, 2021.

EFECTO DEL ELICITORES QUÍMICOS Y UN FÍSICO SOBRE LA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE Y ANTIMICROBIANA DE PIMIENTO

EFFECT OF THE CHEMICAL AND PHYSICAL ELICITORS ON THE ANTIOXIDANT AND ANTIMICROBIAL ACTIVITY OF PEPPER

Ignacio Tovar Zamora
Ramón Gerardo Guevara González
Israel Macías Bobadilla
Rosario Guzman Cruz
Juan Manuel Vera Morales
Irineo Torres Pacheco
Marcela Vargas Hernández*

Universidad Autónoma de Querétaro, México

**marcela.vhz@gmail.com*



Resumen

La especie de Chile con mayor proliferación de cultivo en el mundo es el *Capsicum annuum*. Los frutos de esta especie contienen metabolitos secundarios que pueden inducirse mediante la aplicación de elicitores. El objetivo del presente estudio es evaluar el efecto del peróxido de hidrógeno (H_2O_2), ácido salicílico (AS) y riego deficitario controlado (RDC) sobre las variables fenológicas de la planta, la actividad antioxidante y antimicrobiana *in vitro* de los frutos de pimiento. El diseño experimental fue al azar y los tratamientos consistieron en la aplicación exógena de H_2O_2 (6, 14, y 18 mM), AS (0.01, 0.1 y 0.5 mM) y RDC (50 %). La concentración total de fenoles, flavonoides y taninos se cuantificó por el método colorimétrico.

Se determinó la actividad antioxidante por los métodos de DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidracilo) y ABTS (2,2'-acino-bis (3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfónico); además, se evaluó la actividad antimicrobiana *in vitro* contra *Staphylococcus aureus*. La concentración más alta de fenoles y flavonoides correspondieron a los tratamientos AS 0.5 mM, H_2O_2 14 mM y 18 mM y RDC 50 %. El mayor nivel de taninos se encontró en los tratamientos AS 0.1 mM y AS 0.01 mM. La actividad antioxidante fue elevada en los tratamientos con las concentraciones más altas de los elicitores de AS y H_2O_2 . Finalmente, los AS 0.01 y 0.5 mM manifestaron actividad antimicrobiana contra *S. aureus*. En consecuencia, las aplicaciones de AS, H_2O_2 y RDC 50 % resultaron una estrategia adecuada para mejorar el crecimiento y desarrollo de la planta de pimiento.

Palabras clave: antioxidantes, elicitores, pimiento, *Staphylococcus aureus*.

Capsicum annuum is the most cultivated species of chili in the world. The fruits of this species contain secondary metabolites that can be induced by the application of elicitors. The objective of this study was to evaluate the effect of hydrogen peroxide (H_2O_2), salicylic acid (SA) and regulated deficit irrigation (RDI) on the plant phenological variables and *in vitro* antioxidant and antimicrobial activity of pepper fruits. The experimental design was completely random and the treatments consisted of exogenous application of H_2O_2 (6, 14, and 18 mM), SA (0.01, 0.1 and 0.5 mM), and RDI (50%). The concentration of phenols, flavonoids and tannins was quantified by colorimetric



Abstract

methods. The antioxidant activity was determined by DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) and ABTS (2,2'-Azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) techniques, in addition the *in vitro* antimicrobial activity was evaluated against *Staphylococcus aureus*. The highest concentrations of phenols and flavonoids corresponded to treatments SA 0.5 mM, H₂O₂ 14 mM and 18 mM and RDI 50%. The highest level of tannins was reported for treatments SA 0.1 mM and AS 0.01 mM. The antioxidant activity was higher in the treatments with the highest concentrations of the elicitors of SA and H₂O₂. Finally, the treatments AS 0.01 and 0.5 mM showed antimicrobial activity against *S. aureus*. Therefore, the application of AS, H₂O₂ and RDC 50% were an adequate strategy to improve the growth and development of the bell pepper plant.

Keywords: antioxidant, elicitors, pepper, *Staphylococcus aureus*.

Introducción

El género *Capsicum* corresponde a las plantas de Chile nativas de las regiones tropicales de América [1]. Existen alrededor de 30 especies, de las cuales cinco están domesticadas, y la *Capsicum annum* ostenta mayor relevancia económica [2]. Es importante añadir que el Chile pimiento a nivel mundial es el protagonista de la familia *Solanáceas* después del jitomate [3]. Los pimientos son una fuente abundante de compuestos antioxidantes, tal como el ácido ascórbico (vitamina C), carotenoides, compuestos fenólicos y flavonoides [4]. En este contexto, los compuestos mencionados presentan actividades biológicas anticancerígenas, antiinflamatorias y antimicrobianas contra bacterias (Gram+ y Gram-) [5].

En la actualidad se han desarrollado diversas estrategias con la finalidad de aumentar la cantidad de compuestos bioactivos en las plantas. Por ejemplo, la aplicación de factores de estrés tanto biótico y abiótico (elicitors) benefician al incremento de su actividad farmacológica [6]. Entre



los elicitores empleados, encontramos el H_2O_2 , ácido salicílico (AS), ácido jasmónico, óxido nítrico, entre otros. El H_2O_2 participa en diversos procesos de respuesta en las plantas, como son la aclimatación al estrés, defensa antioxidante, entrecruzamiento de la pared celular, comportamiento de las estomas, producción de fitoalexina, regulación del ciclo celular y fotosíntesis [7], [8]. A este respecto, se suma el riego deficitario, mismo que consiste en reducir drásticamente la cantidad de agua utilizada para el riego y ofrece un impacto positivo sobre el rendimiento, la eficiencia nutritiva y la maduración del fruto [9], [10].

La capsaicina es el compuesto primigenio del género *Capsicum*, derivado de ello se realizan numerosos estudios sobre la aplicación de elicitores en cultivares picantes [11]. Conviene señalar que, aunque los pimientos contengan compuestos análogos, como los capsinoides, las investiga-

ciones enfocadas en evaluar el efecto de los elicitores sobre su desarrollo, síntesis de bioactivos y actividades biológicas de sus extractos son limitadas. Además, carecen reportes sobre la actividad antimicrobiana de extractos de pimientos contra *S. aureus*, y escasean informes de elicitores sobre el incremento de la actividad antimicrobiana. La bacteria *S. aureus* es del tipo coco grampositiva, comúnmente coloniza la dermis humana y cavidades mucosas como la microflora, en casos determinados actúa como un agente patógeno de enfermedades infecciosas [12], [13]. Debido a lo anterior, el objetivo de la presente es evaluar el efecto de la elicitación a través del H_2O_2 , AS y el estrés hídrico por déficit de riego sobre variables fenológicas, concentración de bioactivos, actividad antioxidante y antimicrobiana contra *S. aureus*.



El objetivo del presente estudio es evaluar el efecto del peróxido de hidrógeno, ácido salicílico y riego deficitario controlado sobre las variables fenológicas de la planta, actividad antioxidante y antimicrobiana *in vitro* de los frutos de pimiento.

Metodología

Material biológico

Las semillas de *C. annuum* var. revolution se adquirieron en la distribuidora Agro Guanajuato. Asimismo, la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro proporcionó la cepa *Staphylococcus aureus* (ATCC 6538).

Establecimiento del cultivo

El cultivo de chiles se realizó en un invernadero de 108 m², ubicado en el Campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro. Las coordenadas estipuladas fueron de entre 20° 31' y 20° 58' de latitud norte y entre 100° 09' y 100° 24' de longitud oeste y 1850 msnm. Las semillas se desinfectaron con 200 ppm de solución de nitrato de potasio, y a *posteriori* se colocaron en un sustrato de peatmoss-vermiculita (1:4).

Al transcurrir dos semanas las semillas se trasplantaron a bolsas de 5 litros con tezontle, las condiciones de crecimiento fueron 26 °C, HR de 60 % y 16 h luz. Los tratamientos consistieron en peróxido de hidrógeno (H₂O₂) a las concentraciones de 6, 14 y 18 mM, AS a una IDEM-de 0.01, 0.1 y 0.5 mM y RDC 50 %, vertidos en la mitad del riego diario recomendado, y como testigo experimental se aplicó agua destilada. Las soluciones se aplicaron en forma foliar hasta el punto de rocío en intervalos de 15 días. El diseño experimental fue completamente al azar con unidades de análisis de seis plantas en tres repeticiones. Las variables a medir fueron la altura, cantidades de frutos y flores. Cabe señalar, en los frutos se midió la longitud, peso fresco y perímetro ecuatorial; además fueron cosechados a los 113 días después de trasplantar al invernadero. A este respecto se unen los pimientos, mismos que se congelaron mediante inmersión en nitrógeno líquido y molieron con hielo seco para obtener la materia fresca, finalmente se almacenaron a -80 °C hasta su uso posterior.

Preparación de extractos metanólicos

La extracción de compuestos se realizó bajo el método de maceración, utilizando como disolvente metanol en una proporción de 1:10 y materia fresca; a su vez la muestra fue trasladada a un agitador por 24 h a 200 RPM (Orbit 1000 model s2030-1000; Labnet, Woodbridge, NJ, EE. UU.). Los extractos se centrifugaron a 5 000 RPM (Sorvall Biofuge Primo R model 75005448; Thermo Scientific, Osterode, Germany); el sobrenadante fue aprovechado para realizar la evaporación del disolvente de los extractos metanólicos en un rotavapor a una temperatura de 40 °C (Schwalbach, Heidolph Instruments Gmb H & Co. KG).



Determinación del contenido de metabolitos secundarios en los frutos de pimiento

Los compuestos fenólicos totales se determinaron conforme al método propuesto por Folin-Ciocalteu [14]. Conviene señalar que, en las pruebas se utilizaron 10 mg/ml de extracto mL^{-1} , es decir, esto pesaron 10 mg de extracto y se añadió 1 mL de metanol de grado reactivo. En los viales se colocaron 40 μL del extracto metanólico, se agregaron 460 μL de agua destilada y 250 μL del reactivo Folin-Ciocalteu (1N). Como siguiente paso se reposaron 5 minutos y se agregó 1.25 ml de una solución de Na_2CO_3 al 20 % para neutralizar; se dejó incubar 2 h. 200 μL de cada muestra de metanol (blanco), después se colocaron en una placa de 96 pozos. Se midió la absorbancia contra el blanco a 760 nm en un lector de microplacas Spectra Max (Molecular Devices Co., Sunnyvale, EE.UU.). Se realizó una curva de calibración con ácido gálico entre 0-1 mg/L^{-1} . Las concentraciones se reportaron como miligramos equivalentes de ácido gálico por mililitro de extracto.

Los flavonoides se determinaron mediante el método descrito por Oomah *et al.* [17]. Nuevamente 50 μL de los extractos metanólicos o blanco prediluido anteriormente se colocaron en una placa de 96 pozos; después se adicionaron 180 μL de agua destilada y 20 μL de una solución de 10g L^{-1} de 2-aminoetildifenilborato (Sigma-Aldrich). Las muestras se midieron a una absorbancia de 404 nm en un lector de microplacas Spectra Max (Molecular Devices Co., Sunnyvale, EE. UU.). La curva de calibración consistió en una solución de rutina (Sigma-Aldrich, 0 -200 $\mu\text{g ml}^{-1}$). Las concentraciones se reportaron como miligramos de equivalentes rutinarios por ml de extracto.

Para la determinación de taninos condensados, el método utilizado fue el de (+)-catequina-vainillina. A 50 μL blanco se les adicionaron 200 μL de una solución 1:1 de HCl 8 % -vainillina 1 %. Las muestras se leyeron a 492 nm en un lector de microplacas Spectra Max (Molecular Devices Co., Sunnyvale, EE. UU.). Para la curva de calibración, se utilizó una solución de catequina (0-1 mg/ml^{-1}). Los resultados se reportaron como miligramos equivalentes de catequina por gramo de muestra.

Actividad antioxidante de los extractos metanólicos de Chile Pimiento

La prueba de ABTS se realizó de acuerdo con la metodología descrita por Nenadis et al. [18]. La curva estándar se realizó con una solución Trolox a una concentración entre 50-800 μmol . Para generar el radical ABTS $\bullet+$ se preparó una solución madre de ABTS 7 mM; para la cual se añadieron 5 ml de la solución acuosa y 88 μl de persulfato de potasio 140 mM ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$), esta solución se almacenó en oscuridad por 12 h. Posteriormente, la solución que contiene el radical se midió a 734 nm y se diluyó en etanol (de 20 a 25 ml) hasta que el valor de absorbancia alcanzó un valor inferior a 1.0. Después, se adicionaron las muestras en una placa de 96 pozos y finalmente se agregaron 230 μl de ABTS $\bullet+$. El blanco se preparó con 20 μl de la muestra y 230 μl de etanol, los controles consistieron en 20 μl de metanol (C1) y agua destilada (C2) con 230 μl de ABTS $\bullet+$. La medición de la absorbancia se realizó a 730 nm durante un período de 0-6 min.

La prueba de DPPH se realizó en una placa de 96 pozos. A continuación, se describe brevemente: a 20 μl de los extractos se les adicionó 200 μl de una solución de DPPH \bullet (metanol a 80 %). Como control positivo se utilizó Trolox y para el negativo se utilizaron todos los reactivos, excepto los extractos. La absorbancia se midió a 520 nm en diferentes tiempos (0, 4, 10, 30, 60, 90 y 120 minutos). Los resultados para ambos métodos se reportaron como μM de Trolox y % ARA (actividad antirradical).

Actividad antimicrobiana *in vitro* de los extractos metanólicos del pimiento

La cepa *Staphylococcus aureus* ATCC se cultivó en caldo de soya tripticasina 24 h a 37 °C, de la misma manera, en agar tripticasina de soya y se incubó nuevamente. Asimismo, aisló una colonia que fue transferida a agar sangre e incubó nuevamente en las mismas condiciones. La cepa fue inoculada en un medio de caldo de tripticasina de soya para obtener una concentración de 1×10^8 UFC. En últimas, fue sembrada en placas de Petri con agar Muller Hilton y colocaron discos con un extracto metanólico de 20 μl a las concentraciones de 100, 200 y 400 mg/ml^{-1} . El extracto de cada tratamiento se suspendió en DMSO. Como testigo positivo se utilizaron Multidiscos Gram positivos II BioRad®:



- Ampicilina (10 µg)
- Cefalotina (30 µg)
- Cefotaxima (30 µg)
- Cefepime (30 µg)
- Cefuroxina (30 µg)
- Dicloxacilina (1 µg)
- Eritromicina (15 µg)
- Gentamicina (10 µg)
- Levofloxacin (5 µg)
- Penicilina (10 µg)
- Tetraciclina (30 µg)
- Trimetoprim-sulfametoxazol (25 µg)

Análisis estadístico

Con los datos se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para detectar diferencias entre los tratamientos, utilizando el paquete estadístico STATGRAPHICS® Centurion XV Version 15.2.06. StatPoint, Inc., Herndon, 2007.

Resultados y discusión

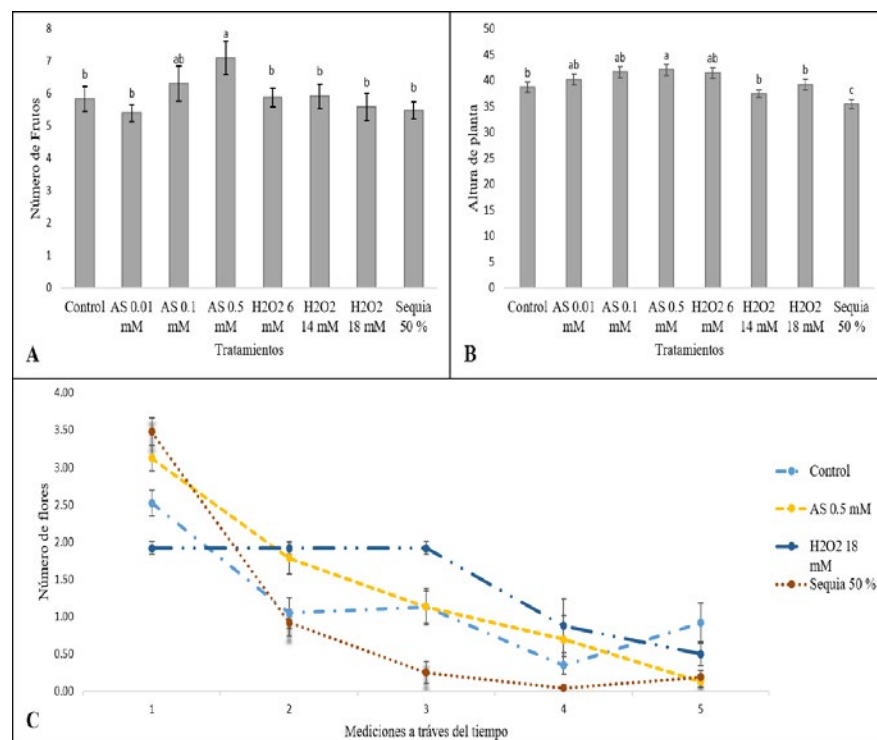
Variabes fenológicas de la planta y fruto

Con la finalidad de evaluar el efecto de los elicitores sobre las plantas de pimiento se midieron las variables independientes a los 113 días de desarrollo. El tratamiento de AS 0.5 mM generó significativamente mayor cantidad de frutos en comparación con los tratamientos aplicados, a excepción del AS 0.1 mM; también se observó mayor altura de la planta en comparación con AS 0.01 mM, H₂O₂ 14 mM y sequía 50 % (Figura 1).

FIGURA 1.

Efecto del AS, H₂O₂ y RDC 50 % sobre las variables fenológicas de la planta:

- a) número de frutos,
- b) altura de la planta y
- c) número de flores a través del tiempo (se muestra cada tratamiento y el control).



Los resultados muestran que el AS aparte de su capacidad de inducir respuestas de defensa contra estrés, también juega un papel sustancial al regular procesos fisiológicos y bioquímicos relacionados con el crecimiento y desarrollo. Entre dichas fases se encuentran la germinación de semillas, el crecimiento vegetativo, floración, rendimiento del fruto, senescencia, termogénesis, cierre estomático, crecimiento rízico y la fotosíntesis. La respuesta del cultivo con el agente (hormesis) será positiva o negativa dependiendo de la relación dosis [17], [19]. No obstante, a pesar de que se ha reportado que el AS es un compuesto importante para la generación de flores [20]; en el presente trabajo se descubrió que la aplicación de este compuesto a 0.5 mM (dosis más alta) evidencia una cantidad baja de flores al momento de realizar la medición. Estos resultados pueden ligarse al hecho de que la planta aceleró su desarrollo y, por ende, los frutos brotaron más rápido después de la aplicación exógena del elicitador. Además, los tratamientos donde fue aplicado AS mostraron un comportamiento hormético (dosis-respuesta) en las variables de altura y número de frutos.

Existen reportes de que algunos procesos en las plantas son inducidos por AS, debido al efecto dosis-respuesta, activándose a bajas cantidades y se inhiben cuando son altas. Lo anterior se relaciona al papel del AS en la regulación del estado redox celular, ya que las bajas concen-

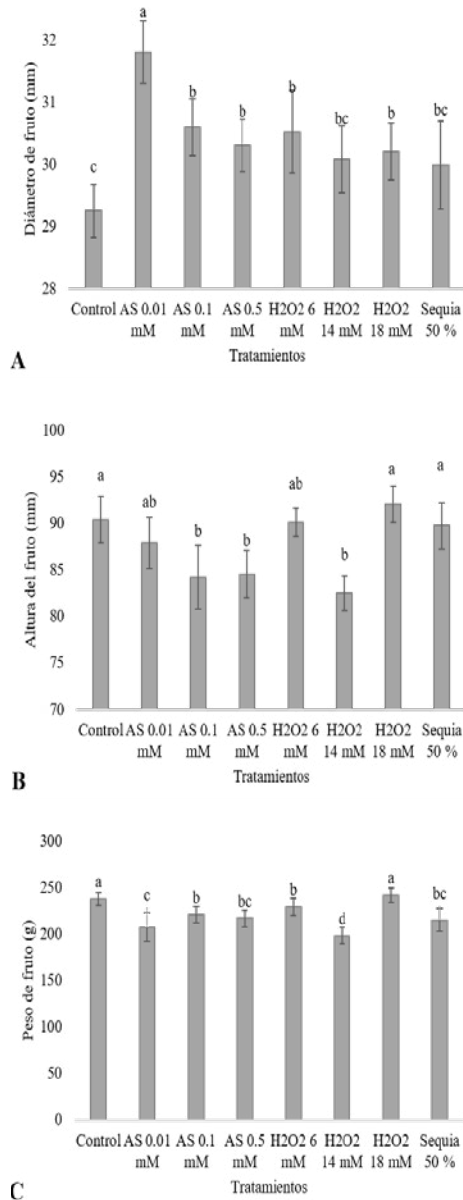


traciones inducen un nivel bajo de ROS. Estas concentraciones de ROS tienen la función de señalización para activar procesos biológicos, y a dosis altas causan estrés oxidativo y muerte celular [17]. Por lo tanto, se sugiere que las concentraciones de ROS 0.01, 0.1 y 0.5 mM fueron las que activaron los procesos de desarrollo en el chile.

Debido a que el AS regula los procesos biológicos del chile a través de la inducción de ROS, del cual forma parte el H_2O_2 , la aplicación de este elicitor también mostró cambios en las variables fenológicas del chile. Como se mencionó anteriormente, la concentración de ROS está relacionada al impacto en el desarrollo de la planta tanto de manera positiva como negativa. Así lo muestran los resultados obtenidos en las variables medidas en el fruto (Figura 2).

FIGURA 2.

Efecto del AS, H_2O_2 y RDC 50 % sobre las variables fenológicas del fruto:
a) diámetro, b) altura
y c) peso.



La concentración más alta de H_2O_2 (18 mM) evidenció un efecto positivo sobre las variables fenológicas del fruto al igual que el control, ya que exhibieron mayor peso en comparación con los demás tratamientos. La misma concentración de H_2O_2 mostró mayor altura en el fruto en comparación con AS 0.1 mM y H_2O_2 14 mM; en contraparte, el control fue el que obtuvo menor diámetro. Existen reportes que posicionan a los elicitores como compuestos estimulantes ante la defensa del vegetal, promueve el metabolismo secundario a costa del primario [16]; en consecuencia, la aplicación de AS y H_2O_2 tuvo un efecto positivo de igual modo que el control sobre el rendimiento de la planta de chile.

Por último, el tratamiento de sequía al 50 % tuvo un impacto negativo sobre el desarrollo de la planta, empero, se observó que el fruto mostró resultados positivos en comparación al control; así mismo, el AS 0.01 mM reportó menor peso de fruto, en comparación con el control. Con la finalidad de maximizar la producción de chile frente a la presencia de sequía existen estrategias como la implementación de riego deficitario controlado [21]. La aplicación de RDC 50 % demostró que la planta de chile fue susceptible al estrés por escasez de agua, impactando de manera negativa el desarrollo de la planta y el peso del fruto. Lo anterior puede relacionarse al estrés hídrico que disminuye la división celular y el alargamiento de las células de las plantas [22].

Determinación del contenido de metabolitos secundarios y capacidad antioxidante de los extractos de *C. annuum* elicitados con H_2O_2 , AS y RDC 50 %

El sofisticado mecanismo de defensa que tiene la planta es encendido por diversos compuestos de señalización. Tales como H_2O_2 , jasmonatos, ácido abscísico, AS, etc. o factores ambientales que potencian la acumulación de bioactivos defensivos, por lo tanto su actividad antioxidante se ve beneficiada. Se evaluó la concentración de compuestos fenólicos, flavonoides y taninos en los frutos de pimiento bajo el efecto de los elicitores químicos y uno físico (Tabla 1).



TABLA 1.

Contenido de compuestos fenólicos, flavonoides y taninos en los extractos de *C. annuum* bajo los efectos de AS, H₂O₂ y RDC 50 %.

TRATAMIENTO	*COMPUESTOS FENÓLICOS	**FLAVONOIDES	***TANINOS
Control	13.03±0.27 ^b	9.28±1.05 ^{ab}	7.346±0.64 ^c
AS 0.01mm	11.45±0.22 ^c	9.14±0.42 ^b	11.92±0.75 ^a
AS 0.1mm	13.27±0.10 ^b	9.73±0.96 ^{ab}	13.45±0.85 ^a
AS 0.5mm	13.54±0.08 ^a	10.30±1.05 ^a	10.38±1.02 ^b
H ₂ O ₂ 6 mM	12.78±0.13 ^b	7.79±1.07 ^b	9.57±0.99 ^b
H ₂ O ₂ 14 mM	15.00±0.19 ^a	9.31±0.61 ^a	6.844±0.71 ^c
H ₂ O ₂ 18 mM	15.07±0.28 ^a	9.53±0.53 ^a	6.315±0.58 ^c
RDC 50 %	15.66±0.74 ^a	9.53±0.26 ^a	9.69±1.02 ^{ab}

* Concentración de fenoles expresados en mg equivalentes de ácido gálico (GAE) g⁻¹ de extracto.

** Concentración de flavonoides en mg equivalentes de (+) - rutina (RUE) g⁻¹ extracto.

*** Concentración de taninos en mg equivalentes de (+) - catequina (CE) g⁻¹ extracto.

Los resultados son el promedio de tres ensayos independientes ± DE.

Letras iguales en la misma columna no tienen diferencia significativa entre tratamientos ($\alpha = 0.05$).

Los tratamientos con mayor abundancia de compuestos fenólicos y flavonoides fueron AS 0.5 mm, H₂O₂ 14 mm, 18 mm y RDC 50 %. Se encontraron datos similares en chiles habaneros de la variedad Jaguar y Chichen Itzá tratados con H₂O₂ a una concentración de 18 mm, los cuales produjeron mayor cantidad de fenoles y flavonoides totales en comparación con el control [18]. La actividad antioxidante por el método de ABTS de los extractos metanólicos fue mayor para los tratamientos AS 0.5 mm, 6 mm, 14 mm, 18 mm H₂O₂ y RDC 50 %. Para el DPPH fueron los tratamientos as 0.5 mm y H₂O₂ 18 mm (Tabla 2).

TABLA 2.

Actividad antioxidante de los extractos meta-nólicos de *C. annuum* bajo el efecto de AS, H₂O₂ y RDC 50 %.

TRATAMIENTO	ABTS		DPPH	
	μM DE TROLOX	% ARA	μM DE TROLOX	% ARA
Control	292.63 ±4.00 ^b	95.57±1.29 ^b	571.76±0.81 ^{ab}	73.33 ±0.11 ^{ab}
AS 0.01mm	290.13 ±2.75 ^b	94.76 ±0.89 ^{bc}	509.47 ±1.69 ^c	64.65 ±0.59 ^c
AS 0.1mm	286.12 ±3.39 ^c	93.46 ±1.10 ^c	488.12 ±4.14 ^c	61.70 ±0.82 ^c
AS 0.5mm	300.06 ±1.24 ^a	97.98 ±0.40 ^a	579.92 ±18.39 ^a	73.93±2.15 ^a
H ₂ O ₂ 6 mM	298.24 ±3.15 ^a	97.39±1.02 ^a	486.56 ±16.77 ^d	60.35±0.82 ^d
H ₂ O ₂ 14 mM	298.54 ±3.14 ^a	97.49±1.01 ^a	554.82 ±14.01 ^c	71.82±2.62 ^c
H ₂ O ₂ 18 mM	301.57 ±2.37 ^a	98.47±0.77 ^a	643.64 ±3.76 ^a	83.33±0.75 ^a
RDC 50 %	294.07 ±6.35 ^{ab}	96.04 ±2.06 ^{ab}	565.34 ±23.22 ^{ab}	71.49 ±6.05 ^c

* La capacidad antioxidante de ABTS y DPPH se indica como μmol equivalentes de Trolox (TE) 10 g⁻¹ de extracto y porcentaje de inhibición (% de actividad antirradical). ARA = actividad antirradical.

Letras iguales en la misma columna no tienen diferencia significativa entre tratamientos (α = 0.05).

El H₂O₂ consigue inducir la expresión de la fenilalanina amonio-liasas (PAL); la enzima central de la ruta de los fenilpropanoides es responsable de la síntesis de compuestos fenólicos y flavonoides [23].

La manera en que el AS induce la producción de H₂O₂, es mediante su intervención en las respuestas antioxidantes para gestionar el estrés oxidativo y con ello evitar el daño a las células de las plantas [24]. En lo que respecta a la sequía, provoca el aumento de la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), como el H₂O₂, en diferentes compartimentos celulares, concretamente los cloroplastos y las mitocondrias [25]. Diversos estudios sustentan el hecho de que el H₂O₂ posee la capacidad



de incrementar el contenido de metabolitos secundarios y aumentar la acumulación de biomas. Los tratamientos con mayor cantidad de fenoles y flavonoides mostraron mayor actividad antioxidante. Esta respuesta se debe a que los compuestos fenólicos, como los flavonoides sustentados en su estructura química, contribuyen de manera imperante en la actividad, posicionando a los flavonoides como protagonistas debido a su alta cantidad de grupos de hidroxilo [26].

La correlación entre la cantidad de compuestos fenólicos, flavonoides, taninos y la capacidad antioxidante se determinó mediante los extractos metanólicos del pimiento (Tabla 3). Entre los fenólicos y flavonoides, se observó una alta correspondencia. La cantidad de metabolitos y la actividad antioxidante es baja, la mayor correlación fue obtenida de los métodos DPPH y ABTS, sin embargo, no tienen un comportamiento lineal. Una diferencia mostrada entre la actividad antioxidante determinada por los métodos ABTS y DPPH es la reacción contraria del radical frente a los compuestos fenólicos, a causa de su estructura. Además, el ABTS reacciona con los fenoles rápidamente y el DPPH lo hace lentamente de 1 a 6 h. Por otro lado, el ABTS tiene una mayor flexibilidad para reaccionar a diferentes pH, asimismo el radical es más estable [27].

TABLA 3.

Correlación entre la cantidad de bioactivos y capacidad antioxidante de los extractos de *C. annuum* elicitados con AS , H_2O_2 y RDC 50 %.

	COMPUESTOS FENÓLICOS	FLAVONOIDES	TANINOS CONDENSADOS	ABTS	DPPH
Compuestos Fenólicos	1				
Flavonoides	0.5844	1			
Taninos	0.0348	0.0246	1		
ABTS	0.1255	0.3605	-0.2562	1	
DPPH	0.1776	0.1251	-0.7051	0.7802	1

Al mismo tiempo, se observó una correlación no lineal entre los metabolitos secundarios y la actividad antioxidante, además de la actividad sinérgica aditiva o antagonista de los compuestos fenólicos para inhibir las especies reactivas de oxígeno [28]. La aplicación de los elicitores en concentraciones más altas ostenta un impacto positivo en la acumulación de bioactivos, actividad antioxidante y en el desarrollo de la planta,

ya sea aumentando su crecimiento o mitigando el efecto de las condiciones extremas de temperatura y humedad.

Los resultados indicaron que los niveles más altos de taninos corresponden a los tratamientos de AS 0.1 mM y AS 0.01 mM. Las concentraciones bajas de AS favorecieron la producción de taninos condensados, mientras que, por el contrario, el tratamiento de AS 0.5 mM favoreció la síntesis de compuestos fenólicos y flavonoides. Es posible que las dosis bajas de AS favorezcan las rutas de síntesis de taninos que implican un costo energético importante para el crecimiento y desarrollo vegetal. Por otro lado, el AS en la concentración de 0.5 mM favoreció la síntesis de moléculas que influyen en el crecimiento y desarrollo vegetal, sugiriendo su función como un bioestimulante, mientras que a dosis bajas actúa como eustresor [29]. Debido a lo anterior, es necesario un estudio hormético más completo sobre el efecto del AS en el crecimiento y desarrollo de las plantas de Chile, además del síntesis de metabolitos defensivos para una mejor explicación del fenómeno [6].

Actividad antimicrobiana *in vitro* de los extractos metanólicos de *C. annuum* elicitados con AS

Un cuantioso número de los compuestos defensivos de la planta se sintetizan para limitar el crecimiento de organismos patógenos. Por lo tanto, existe la posibilidad de presentar actividad antimicrobiana. En el presente estudio se determinó esta actividad en los extractos metanólicos de *C. annuum* bajo la aplicación de los elicitores contra *S. aureus* (Tabla 4). No se encontró actividad antimicrobiana para los tratamientos de H₂O₂ en todas las concentraciones y RDC 50 % (datos no mostrados).

TABLA 4.

Actividad antimicrobiana de los extractos de *C. annuum* bajo el efecto del AS contra *S. aureus*.



Concentración (mg/ml-1)	TRATAMIENTO			
	Control	AS 0.01 mM	AS 0.1 mM	AS 0.5 mM
400	-	11.11±0.03 ^a	-	11.97±0.11 ^a
300	-	9.16±0.15 ^b	-	9.00±0.06 ^b
200	-	8.75±0.11 ^b	-	7.68±0.08 ^c

Los resultados son el promedio de tres ensayos independientes ± DE. Letras iguales en la misma columna no tienen diferencia significativa ($\alpha = 0.05$).



El control positivo consistió en antimicrobianos comerciales, donde se observó actividad antimicrobiana con los medicamentos cefepima (30 μg) y gentamicina con un halo de inhibición de 19.29 ± 0.16 y 22.18 ± 0.20 mm. Con respecto a los extractos de las plantas elicidadas con AS, se observó actividad antimicrobiana en los tratamientos de 0.01 y 0.5 mm contra *Staphylococcus aureus* ATCC concentraciones de 200, 300 y 400 mg/ml^{-1} ; además se observó un efecto dosis-respuesta.

El valor más alto de inhibición fue para el AS 0.5 mm. En el tratamiento control no se presentó actividad antimicrobiana, sucedió lo mismo para las plantas tratadas con AS 0.1 mm. Lo anterior sugiere que la concentración del elicitor provocó un efecto diferencial en la síntesis de los compuestos con actividad antimicrobiana. Estudios previos de nuestro grupo indican que los extractos de chile habanero (*Capsicum chinense*) elicidados con H_2O_2 18 mm presentaron una mayor actividad antimicrobiana a las concentraciones de 10, 25, 50, 100 y 200 mg/ml^{-1} . La información previa evidencia, en comparación con las plantas no elicidadas contra *S. aureus*, una actividad antimicrobiana más alta [18]. Los resultados podrían estar relacionados a que los pimientos *Capsicum chinense* poseen capsaicina, un compuesto cuya actividad antimicrobiana se ha demostrado contra una amplia gama de microorganismos [30]. La actividad antimicrobiana mostrada deriva, probablemente, metabolitos secundarios inducidos en respuesta al AS de las plantas de pimiento.

Conclusiones

Los resultados anteriores mostraron que los elicitores a diferentes dosis pueden impactar de maneras diversas el metabolismo primario de las plantas, lo que se refleja en el rendimiento. En este estudio, los elicitores químicos evaluados presentaron un impacto positivo en las variables morfológicas, mientras que el estrés por falta de agua en las plantas tuvo impacto negativo en las mismas. La aplicación de AS, H_2O_2 y RDC 50 % fueron una estrategia adecuada para mejorar el crecimiento y desarrollo de la planta de pimiento (*Capsicum annum* var. *grossum*). Además, la elicitación con AS 0.5 mm incremento la actividad antimicrobiana de sus extractos contra *S. aureus*. Por otro lado, como perspectiva se considera el estudio de otros niveles de riego deficitario en los cuales se puedan observar impactos positivos en las plantas y frutos de pimientos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo otorgado durante esta investigación.

Fuentes de Financiamiento

La Dra. Marcela Vargas Hernández agradece al FONDEC UAQ 2022 por el apoyo FIN2022-18 otorgado.



Referencias

- [1] U. I. Ramírez Novoa, F. C. Ortiz, S. M. Hernández, J. C. Raya Pérez, A. Cibrián, y E. A. Enriquez. (2018). *Diversidad morfológica del chile piquín (Capsicum annum L. var. Glabriusculum) de Querétaro y Guanajuato, México*. Rev. Mex. De Ciencias agríc., vol. 9, no. 6. Doi: [10.29312/remexca.v9i6.1581](https://doi.org/10.29312/remexca.v9i6.1581)
- [2] V. Carvalho Lemos, J. Reimer, y A. Wormit. (2019, abr. 19). *Color for Life: Biosynthesis and Distribution of Phenolic Compounds in Pepper (Capsicum annum)*. Agríc. Doi: [10.3390/agriculture9040081](https://doi.org/10.3390/agriculture9040081)
- [3] G. O. Nkansah, J. C. Norman, y A. M. Martey. (2017.). *Growth, Yield and Consumer Acceptance of Sweet Pepper (Capsicum annum L.) as Influenced by Open Field and Greenhouse Production Systems*. Journal of Horticulture., vol. 4. Doi: [10.4172/2376-0354.1000216](https://doi.org/10.4172/2376-0354.1000216)
- [4] F. Fratianni, A. d' Acierno, A. Cozzolino, P. Spingo, R. Riccardi, F. Raimo, C. Pane, M. Zaccardelli, V. Tranchida Lombardo, M. Tucci, S. Grillo, R. Coppolay, y F. Nazzaro. (2020, jun. 26). *Biochemical Characterization of Traditional Varieties of Sweet Pepper (Capsicum annum L.) of the Campania Region, Southern Italy*. Antioxidants. Doi: [10.3390/antiox9060556](https://doi.org/10.3390/antiox9060556)
- [5] A. Panche, A. Diwan, y S. Chandra. (2016, dic. 29). *Flavonoids: An overview*. Journal of Nutritional Sci., vol. 5, no. 47. Doi: [10.1017/jns.2016.41](https://doi.org/10.1017/jns.2016.41)
- [6] M. Vargas Hernandez, I. Macias Bobadilla, R. G. Guevara Gonzalez, S. de J. Romero Gomez, E. Rico Garcia, R. V. Ocampo Velazquez, L. de L. Alvarez Arquieta, e I. Torres Pacheco. (2017, oct. 12). *Plant Hormesis Management with Biostimulants of Biotic Origin in Agriculture*. Frontiers in Plant Sci., vol. 8. Doi: [10.3389/fpls.2017.01762](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01762)
- [7] W. L. Chen, y Y. T. Ko. (2021, nov. 17). *Exogenous hydrogen peroxide induces chilling tolerance in Phalaenopsis seedlings*. Sci. Horticulturae, vol 289. Doi: [10.1016/j.scienta.2021.110421](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110421)
- [8] M. A. Hossain, S. Bhattacharjee, S. M. Armin, P. Qian, W. Xin, H. Y. Li, D. J. Burritt, M. Fujita, y L. Tran. (2015, jun. 15). *Hydrogen peroxide priming modulates abiotic oxidative stress tolerance: isights from*

- ROS detoxification and scavenging. *Front. Plant Sci.*, vol. 6. DOI: 10.3389/fpls.2015.00420
- [9] M. Cano Lamadrid, I. Giron, R. Pleite, F. Burló, M. Corell, A. Moriana, y A. Carbonell Barrachina. (2015, jun.). *Quality Attributes of Table Olives as Affected by Regulated Deficit Irrigation*. *Lebensmittel-Wissenschaft Und-Technologie.*, vol. 62, no. 1, pp. 19-26. DOI: 10.1016/j.lwt.2014.12.063
- [10] E. Coyago Cruz, M. Corell, C. Stinco, D. Hernanz, A. Moriana, y A. J. Meléndez Martínez. (2017, jun.). *Effect of regulated deficit irrigation on quality parameters, carotenoids and phenolics of diverse tomato varieties (Solanum Lycopersicum L.)*. *Food Research International*, vol. 96, pp. 72-83. DOI: 10.1016/j.foodres.2017.03.026
- [11] M. Giacalone, F. Forfori, y F. Giunta. (2015). *Chapter-20 Chili Pepper Compounds in the Management of Neurotraceuticals Pain*. *Bioactive Nutraceuticals and Dietary Supplements in Neurological and Brain Disease.*, pp. 187-195. DOI: 10.1016/B978-0-12-411462-3.00020-5
- [12] K. Becker. (2018,). *Chapter 2 Pathogenesis of Staphylococcus aureus*. A. P., pp. 13-38. DOI: 10.1016/B978-0-12-809671-0.00002-4
- [13] N. Feyissa, T. Alemu, D. Jirata Birri, y A. Dessalegn. (2023, feb.). *Isolation, definition, and determination of antibiogram characteristics of Staphylococcus aureus in cow milk and milk products (yogurt and cheese) in West Showa Zone, Ethiopia*. *International Dairy Journal.*, vol. 137. DOI: 10.1016/j.idairyj.2022.105503
- [14] V. Dewanto, X. Wu, K. K. Adom, y R. H. Liu. (2002, abr. 17). *Thermal Processing Enhances the Nutritional Value of Tomatoes by Increasing Total Antioxidant Activity*. *J. Agric. Food Chem.*, vol. 50, no. 10, pp. 3010-3014. DOI: 10.1021/jf0115589
- [15] B. D. Oomah, y C. M. Anaberta. (2005, ene. 26). *Phenolics and antioxidative activities in common beans (Phaseolus vulgaris L.)*. *J. Sci. Agric. Food Agric.*, vol. 85, no. 6, pp. 935-942. DOI: 10.1002/jsfa.2019
- [16] N. Nenadis, L. F. Wang, M. Tsimidou, y H. Y. Zhang. (2004, jun. 26). *Estimation of scavenging activity of phenolic compounds using the ABTS (*+) assay*. *J. Agric.*



- Food. Chem., vol. 52, pp. 4669-74. DOI: 10.1021/jf0400056
- [17] D. Dempsey, y D. Klessig. (2017, mzo. 23). *How does the multifaceted plant hormone salicylic acid combat disease in plants and are similar mechanisms utilized in humans?* BMC Biology, vol. 15, no. 23. DOI: 10.1186/s12915-017-0364-8
- [18] M. Vargas Hernández, I Torres Pacheco, F. Gautier, B. Álvarez Mayorga, A. Cruz Hernández, L. García Mier, S. N. Jiménez García, R. V. Ocampo Velázquez, A. A. Feregrino Perez, y G. Guevara Gonzales. (2017, abr. 06). *Influence of hydrogen peroxide foliar applications on in vitro antimicrobial activity in Capsicum chinense*. Jacq. Plant Bio. International. J. Dealing with All Aspec. Plant Biology., vol. 151, no. 2, pp. 269-275. DOI: 10.1080/11263504.2016.1168494
- [19] W. Poot Poot, R. Delgado Martínez, S Castro Nava, M. Segura Martínez, A. Carreón Pérez, y J. Hernández Martínez. (2018, dic.). *Effect of salicylic acid on pre-transplant acclimatization of native tomato populations*. Horticultura Brasileira, vol. 36, no. 4, pp. 480-485. DOI: 10.1590/s0102-053620180409
- [20] Y. Arif, F. Sami, H. Siddiqui, A. Bajguz, y S. Hayat. (2020, jul.). *Salicylic acid in relation to other phytohormones in plant: a study towards physiology and signal transduction under challenging environment*. Environmental and Experimental Botany., vol. 175. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2020.1040
- [21] M. Y. Kabir, S. U. Nambeesan, J. Bautista, y J. C. Díaz Pérez. (2021, nov. 17). *Effect of irrigation level on plant growth, physiology and fruit yield and quality in bell pepper (Capsicum annum L.)*. Sci. Horticulturae., vol. 281. DOI: 10.1016/j.scienta.2021.109902
- [22] H. Nelissen, X. H. Sun, B. Ryman, Y. Jikumaru, M. Kojima, Y. Takebayashi, R. Abbeloos, K. Demuyndck, V. Storme, M. Vuylsteke, J. De Block, D. Herman, F. Coppens, S. Maere, Y. Kamiya, H. Sasaki-bara, y G. T. S. Beemster. (2017, jul. 21). *The reduction in maize drought affects the transition between cell division and cell expansion and cannot be restored by elevated gibberellic acid levels*. Plant Biotechnology J., vol. 16, no. 2, pp. 615-627. DOI: 10.1111/pbi.12801
- [23] M. Świeca. (2016, mzo. 13). *Hydrogen Peroxide Treat-*

- ment and the Phenylpropanoid Pathway Precursors Feeding Improve Phenolics and Antioxidant Capacity of Quinoa Sprouts via an Induction of L-Tyrosine and L-Phenylalanine Ammonia-Lyases Activities. *J. Chem.*, vol. 2016. DOI: [10.1155/2016/1936516](https://doi.org/10.1155/2016/1936516)
- [24] D. E. M. Radwan, A. K. Mohamed, K. A. Fayez, y A. M. Abdelrahman. (2019, may.). *Oxidative stress caused by Basagran® herbicide is altered by salicylic acid treatments in peanut plants.* *Heliyon*, vol. 5, no. 5. DOI: [10.1016/j.heliyon.2019.e01791](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01791)
- [25] A. Kaur y B. Asthir. (2016, dic. 23). *Molecular responses to drought stress in plants.* *Biologia plantarum*, vol. 61, no. 2, pp. 201-209. DOI: [10.1007/s10535-016-0700-9](https://doi.org/10.1007/s10535-016-0700-9)
- [26] S. Aryal, M.K. Baniya, K. Danekhu, P. Kunwar, R. Gurung, y N. Koirala. (2019, abr. 11). *Total Phenolic Content, Flavonoid Content and Antioxidant Potential of Wild Vegetables from Western Nepal.* *Plants Basel, Switzerland*, vol. 8, no. 4. DOI: [10.3390/plants8040096](https://doi.org/10.3390/plants8040096)
- [27] E. Shalaby, y S. Shanab. (2013, sep.). *Comparison of DPPH and ABTS assays for determining antioxidant potential of water and methanol extracts of Spirulina platensis.* *Indian J. Marine Sci.*, vol. 42, no. 5, pp.556-564.
- [28] A. Becerra Moreno, M. Redondo Gil, J. Benavides, V. Nair, L. Cisneros Zevallos, y D. A. Jacobo Velázquez. (2015, oct. 14). *Combined effect of water loss and wounding stress on gene activation of metabolic pathways associated with phenolic biosynthesis in carrot.* *Front. Plant Sci.*, vol. 6. DOI: [10.3389/fpls.2015.00837](https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00837)
- [29] M. C. Vázquez Hernández, I. Parola Contreras, L. M. Montoya Gómez, I. Torres Pacheco, D. Schwarz, y R. G. Guevara González. (2015, may. 10). *Eustressors: Chemical and physical stress factors used to enhance vegetables production.* *Sci. Horti.*, vol. 250, pp. 223-229. DOI: [10.1016/j.scienta.2019.02.053](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.02.053)
- [30] E. Marini, G. Magi, M. Mingoia, A. Pugnali, y B. Facinelli. (2015, nov. 12). *Antimicrobial and Anti-Virulence Activity of Capsaicin Against Erythromycin-Resistant, Cell-Invasive Group a Streptococci.* *Front. Microbiol.*, vol. 6. DOI: [10.3389/fmicb.2015.01281](https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01281)



SISTEMAS DE POLICULTIVOS CON ESPECIES ENDÉMICAS: ESTRATEGIA SOSTENIBLE PARA MEJORAR EL APORTE NUTRICIO A LA DIETA REGIONAL

POLY CULTURE SYSTEMS WITH ENDEMIC SPECIES: SUSTAINABLE
STRATEGY TO IMPROVE THE NUTRITIONAL CONTRIBUTION TO THE
REGIONAL DIET

Ana Patricia Arenas Salazar
Mark Schoor
Claudia Gutiérrez Antonio
Ana Angélica Feregrino Pérez*

Universidad Autónoma de Querétaro, México

* feregrino.angge@gmail.com



Abstract

Resumen

Los sistemas intensivos agrícolas han permitido satisfacer la demanda de alimentos a nivel mundial con un empleo cada vez menor de especies endémicas. No obstante, a pesar de los beneficios, estos métodos acarrear impactos perjudiciales tanto para el medio ambiente como la biodiversidad. Asimismo, las afecciones socioeconómicas como la pérdida de costumbres culinarias y culturales, han ocasionado cambios en la dieta y hábitos alimenticios en diferentes regiones, lo cual incrementa las enfermedades crónicas degenerativas en la población. Ante estos aspectos negativos, se ha iniciado la búsqueda de soluciones desde la agroecología y la agrobiodiversidad en un intento por mitigar los daños. En este contexto, el presente trabajo se enfoca en la implementación de sistemas de policultivo con especies endémicas como una solución para lograr una agricultura sostenible.

Palabras clave: agrobiodiversidad, agroecología, dieta regional, especies endémicas, sistemas de policultivo.

Intensive agricultural systems have made it possible to meet the global food demand with a decreasing use of endemic species. However, despite the benefits, these methods have certain impacts that are detrimental to the environment and biodiversity. Likewise, socioeconomic conditions, such as the loss of culinary and cultural customs, have led to changes in diet and eating habits in different regions, increasing chronic degenerative diseases in the population. In view of these negative aspects, the search for solutions from agroecology and agrobiodiversity has begun in an attempt to mitigate the damage. In this context, the present work focuses on the implementation of polyculture systems with endemic species as a solution to achieve sustainable agriculture.

Keywords: agrobiodiversity, agroecology, regional diet, endemic species, polyculture systems.



Introducción

Paralelo al incremento de la población mundial, la demanda de alimentos acarrea la necesidad de recurrir a sistemas de producción agrícola intensiva [1], técnica que acapara cada vez más hectáreas de espacios verdes. Actualmente, el sistema preponderante en la agricultura es el monocultivo; no obstante, es poco eficiente, ya que además de permitir el cultivo de una especie a la vez, la energía, agua, fertilizantes y agroquímicos necesarios para un rendimiento óptimo son excesivos [2]. Por otra parte, la práctica de monocultivos también ha contribuido a la erosión de los suelos, así como a la degradación y contaminación de los ecosistemas [3]; estos problemas ambientales afectan la disponibilidad de los nutrientes requeridos por los cultivos [4] y pueden escalar hasta causar daño a la microbiota del suelo y afectar la interacción entre este y las plantas [5], [6]. En cuanto a los cultivos, estos sistemas emplean cultivares genéticamente mejorados para adaptar la planta a un hábitat diferente; sin embargo, tal sustitución trae como consecuencia la pérdida del hábitat natural de muchas especies, lo que afecta la biodiversidad de las plantas en un ecosistema [3], [7]. En otro orden de ideas, la maquinaria pesada empleada en la agricultura intensiva para la producción y transporte de productos requiere combustibles fósiles que liberan dióxido de carbono a la atmósfera; tales emisiones se reflejan en el 20-35 % de la contaminación global [8].

En aras de adaptar los sistemas agrícolas a la era sustentable se debe restaurar la diversidad de los ecosistemas agrícolas, así como optimizar la gestión de los cultivos y limitar los efectos adversos sobre el medio am-

biente [2], [10], [11]. Tales mejoras son posibles mediante la integración de más de un genotipo para los cultivos, ya que de la interconexión de especies se generan diferentes servicios ecosistémicos. Dicha relación de dependencia funciona sólo si las especies poseen condiciones compatibles en cuanto a la dispersión de semillas y polen, la capacidad de retención de carbono y el ciclo de uso e intercambio de nutrientes; del mismo modo, sus requerimientos como la cantidad y calidad del agua, composición del suelo, la regulación de plagas y clima, manejo y aprovechamiento de desechos y servicios culturales para una región deben ser similares [12], [13], [14], [15].

En otras instancias, el policultivo, también conocido como multicultivo, es un sistema de producción que funciona mediante la inclusión de dos o más especies en una misma parcela con diferentes acomodos topológicos. Esta fuente de alimentos alternativa sostenible goza del potencial para mejorar la diversidad de los ecosistemas agrícolas, debido a que promueve una interacción positiva entre las plantas utilizadas. En específico, confiere a los ecosistemas servicios de regulación [8] como:

fico, confiere a los ecosistemas servicios de regulación [8] como:

— Control de la erosión y fertilidad de suelos: el uso de policultivo mejora la estructura física de los suelos mediante la heterogeneidad de los nutrientes químicos, lo que beneficia a los microorganismos funcionales en diferentes escalas espaciales [9], [16].

— Aumento de la biodiversidad y conservación de hábitats naturales: en un policultivo se pueden encontrar diferentes familias de plantas dentro de una misma área, lo que ayuda a la biodiversidad y al hábitat de origen de muchas especies.

— Regulación conjunta de plagas, enfermedades y malezas de manera biológica: los multicultivos adquieren recursos del medio y se regulan de manera natural [67]; debido a la variedad de sus flores, atraen enemigos naturales, lo que evita que especies invasoras se instalen.

— Disminución del uso de fertilizantes artificiales y agroquímicos: en los policultivos existe una limitada cantidad de patógenos, malezas y plagas, por lo que el uso de agroquímicos es menor o, en ocasiones, llega a ser innecesario.



Es de vital importancia restaurar la diversidad de los ecosistemas agrícolas, así como optimizar la gestión de cultivos y limitar los efectos adversos al medio ambiente. El presente trabajo se enfoca en implementar sistemas de policultivo con especies endémicas a favor de lograr una agricultura sostenible.



Adicionalmente, la interacción intraespecífica en los policultivos también ofrece ventajas a los agricultores [17], [18], [19], [20] y a la salud de los consumidores. A los primeros les brinda beneficios socioeconómicos, ya que a la par del rendimiento mejorado de los cultivos, la venta de productos se incrementa [21]. Asimismo, la inversión de capital de producción es menor, debido a que los policultivos requieren de menos insumos. Por otra parte, la independencia de la producción de un solo cultivo es una ventaja para la seguridad económica de los agricultores, quienes suelen verse afectados por las fluctuaciones en los precios de los productos [6].

En otro sentido, se ha encontrado que mediante el uso de multicultivos es posible cambiar la estructura química de algunos compuestos bioactivos y macronutrientes. Dicha reacción puede causar un efecto nutracéutico en los productos, así como sucede con la fibra soluble e insoluble, los fenoles y flavonoides, los aminoácidos y otras sustancias encontradas en los frutos y flores del cultivo [5], [22]. Esta transformación favorece la salud del consumidor al aportarle una mayor cantidad y calidad de nutrientes, y a gran escala podría resarcir la seguridad alimentaria y el estado de salud comprometidos en las comunidades marginales [23]. Cabe agregar que los beneficios mencionados hasta el momento se pueden potenciar si en lugar de incluir cultivos genéticamente mejorados se opta por recurrir a endémicos.

Lo *endémico* se define como aquello que es propio y exclusivo de una determinada localidad o región [24]; en términos de flora y fauna, se refiere al origen y diversidad biológica de las plantas [25]. La relevancia en el empleo de este tipo de especies radica en que constituyen un pilar en el desarrollo de las culturas milenarias [27]. Por otra parte, cada país debe aprovechar su diversidad de especies en sus sistemas de producción; así, el endemismo puede fungir como instrumento para conseguir los objetivos y prioridades en las estrategias para la conservación de las especies. A tal efecto, algunos de los atributos aprovechables de esta clase de genotipos son la tolerancia a plagas y enfermedades, adaptación a las condiciones climáticas adversas y bajo requerimiento de fertilizantes y agroquímicos [7], [9], [26]. En este sentido, el presente artículo tiene por objetivo revisar la importancia de implementar policultivos con especies endémicas, como una propuesta ajustada a los pilares de la agricultura sostenible; es decir, que cumple con las cuestiones de cuidado al medio ambiente, recuperación de la biodiversidad e

impacto positivo en los aspectos socioeconómicos y en la salud de la comunidad [28].

Policultivos como un sistema implementado desde la agroecología y la agrobiodiversidad

Desde el inicio de la agricultura con la explotación de granos criollos en el neolítico, el ser humano ha buscado mejorar los sistemas de producción primaria para la generación de recursos alimenticios frescos y crudos. En tiempos remotos, el agricultor buscaba la domesticación y selección de cultivos para obtener una mayor productividad agrícola y, así, garantizar el abastecimiento de su comunidad [29]. Por ejemplo, las culturas antiguas empleaban las semillas pertenecientes a la región donde habitaban y manejaban los cultivos de acuerdo al clima, las estaciones y los recursos naturales a su disposición. A raíz de lo anterior es que surgieron diferentes técnicas agrícolas como los policultivos y las chinampas, entre otros. Este manejo integral de la agricultura permitía la regeneración de los recursos naturales, manteniendo intacto el equilibrio en los ecosistemas. No obstante, con el crecimiento progresivo de la población, la producción de alimentos en los sistemas dejó de ser suficiente, por lo que el manejo de los cultivos tuvo que modificarse [30].

Un acontecimiento que cambió el rumbo de los sistemas de producción primaria fue la Revolución Verde. Dicho movimiento tenía por objetivo garantizar la seguridad alimentaria a nivel mundial, para lo cual se suscitaron grandes avances en la agricultura, como la generación de altas tasas de rendimiento agrícola y mejor productividad. La implementación de tecnologías competitivas de producción a gran escala posibilitó mayores rendimientos, gracias al uso de ingeniería genética (selección de variedades de cultivos). No obstante, en aquellos tiempos se desconocía el impacto negativo que generarían en el medio ambiente el abuso de los agroquímicos (pesticidas y fertilizantes minerales) y el arduo trabajo mecánico (arados regulares y profundos); también se pasaron por alto las afecciones en la economía de los pequeños productores.

El deterioro del medio ambiente se ha visto reflejado en la simplicidad de los paisajes, la reducción de la diversidad de cultivos y la pérdida de hábitats naturales y suelos fértiles [32], [30]. En este contexto, surge la agro-



ecología, definida por la FAO como la ciencia que estudia la interacción de los componentes del agroecosistema [33]. Tal conjunto de prácticas y movimientos sociales busca optimizar y estabilizar la producción en aras de la conformación de sistemas agrícolas sostenibles. Así, la agroecología propone retomar el tipo de agricultura que se practicaba previa a la Revolución Verde y adaptarlo a un enfoque de bien común que permita resolver los problemas antes mencionados [34]. Posteriormente, nace el concepto de la agrobiodiversidad, derivado de la interacción de la diversidad biológica (alimentos, plantas medicinales y ornamentales, etc.) con las sociedades humanas (cultura) y el ambiente de convivencia. De tal forma, la agrobiodiversidad es parte de un contexto interdisciplinario que incluye diversas ciencias como agronomía, antropología, ecología, botánica, genética y biología de la conservación. Por consiguiente, el impacto del fenómeno abarca las políticas de conservación de los ecosistemas cultivados, la promoción de la seguridad alimentaria, la inclusión social y el desarrollo local sostenible [35].

Para el restablecimiento exitoso de los sistemas de producción primaria es necesaria la inclusión de las tres herramientas previamente mencionadas: la agroecología, la agrobiodiversidad y la biotecnología. A su vez, los agricultores de todo el mundo han comenzado a optar por los sistemas agrícolas antiguos, en un esfuerzo por restaurar la materia orgánica de la tierra, conservar el agua, regenerar la biodiversidad agrícola, refinar el control biológico de plagas y promover la polinización [34], [31]. A fin de implementar un sistema de cultivo, será necesario cumplir con las normas de los sistemas de producción agroecológicos; además, resulta imprescindible identificar la influencia potencial de cada práctica agrícola: la aplicación de pesticidas, el periodo de siembra y el arado según el tipo de cultivo. De igual forma, competen otros aspectos característicos del paisaje favorables para las especies beneficiosas [36], y la combinación de especies endémicas en un mismo cultivo, proceso que ya ocurre en los ecosistemas de manera natural.

Los policultivos, al integrar la agroecología y la agrobiodiversidad, desarrollan métodos de producción acoplables a los pilares en que se basa la sostenibilidad: el económico, el social y el ambiental [28]. El primero se asegura del rendimiento favorable de la producción [37], que deviene en un impacto positivo en la economía de la población. El segundo pilar sostiene las condiciones adecuadas de trabajo para los

agricultores [38], la preservación cultural [39], y la seguridad alimentaria a los niveles regionales. Por último, el pilar ambiental se instaura en la protección de los suelos, los mantos acuíferos y la conservación de la biodiversidad y hábitats naturales [40]. En aras de mantener la flexibilidad de los policultivos, a nivel mundial se han propuesto sistemas diferenciados por su distribución espacial, los cuales son el cultivo mixto, en franjas, intercalado, de relevo y de cobertura [41]. La implementación dependerá del objetivo del agricultor y los beneficios esperados del mejoramiento de los ecosistemas.

Comparación del uso de especies endémicas y no endémicas en monocultivos y policultivos

Actualmente, el manejo que se le da a las especies tanto endémicas como no endémicas es variado e irregular. Por ejemplo, en algunas regiones se llevan a cabo monocultivos con rotación de especies endémicas, a la vez que policultivos con una mezcla de especies endémicas y no endémicas; mientras tanto en otras se han implementado policultivos con especies exclusivamente endémicas (asociaciones con cultivos leñosos, pastos, hortalizas, etc.) [2], [4], [10], [25], [26], [42].

No obstante, los sistemas de monocultivo con especies no endémicas son los predominantes en la producción global de alimentos. Para ello, diversas especies de hortalizas son transportadas de una región a otra en respuesta a las necesidades del sistema alimentario. Por otra parte, dado que las características edafológicas y climáticas de la región son diferentes a aquellas de origen, se debe adaptar el medio ambiente al nuevo cultivo; en otras palabras, para que las especies introducidas tengan éxito el productor debe condicionar los hábitats de modo que les sean favorables. Es en este punto donde los fertilizantes orgánicos e inorgánicos se vuelven indispensables para el éxito de los monocultivos, no solo por su función primaria, sino también para drenar humedales. Asimismo, debe tomarse en cuenta que los campos agrícolas rara vez son homogéneos con respecto a suelos y topografía, por lo que algunas áreas son más adecuadas y productivas que otras para un monocultivo dado.



Por otra parte, los sistemas de monocultivo con especies endémicas impactan levemente en los agroecosistemas [43], [44]. Los estudios en relación con este sistema consideran la topología, es decir, buscan la siembra de la especie endémica en puntos del paisaje donde el aprovechamiento de los recursos naturales sea óptimo. Así se atenúa el impacto al medio ambiente y se estabiliza el rendimiento del cultivo [26].

Por lo que se refiere a los sistemas de policultivo, su eficiencia depende tanto del acomodo topológico, como del manejo agrícola, de las condiciones climáticas y de las especies empleadas en el cultivo. Adicionalmente, se ha encontrado que las mezclas de cultivos con especies endémicas mejoran la producción de la variedad cuyo valor en el mercado es mayor [10], entre estos, uno de los más empleados es el de cobertura. Dicho sistema tiene por objetivo mejorar los suelos y el aprovechamiento de los nutrientes; además, se puede destinar como vegetación permanente natural, con el uso de plantas nativas que crecen espontáneamente, o como vegetación permanente sembrada por el agricultor.

Una de las formas de aplicar el cultivo de cobertura es por medio de la siembra de especies mixtas de árboles tropicales autóctonos [4]. Por otro lado, en regiones como el mediterráneo es posible emplearlo en sembradíos de árboles leñosos para proteger los suelos, así como se da con los olivos en combinación con malezas propias de la región [42]. Cabe señalar que la fijación de carbono es más efectiva cuando se utiliza este policultivo con especies nativas, en comparación con cuando sólo se cultiva la especie de valor económico [45], [46].

Existen regiones africanas donde tradicionalmente se optaba por el manejo de policultivos con especies no endémicas de rotación. Dicha técnica consiste en sembrar una sola especie a la vez, y rotarla con otras por temporada para evitar la erosión del suelo; un ejemplo de esto es la implementación de cultivos de trigo, cebada y canola, intercaladas con leguminosas de pasto, como la alfalfa para pastoreo de ganado [25]. No obstante, en tiempos recientes la siembra de especies endémicas ha comenzado a posicionarse como una práctica más conveniente. De tal forma, en estas zonas es cada vez es más común el aprovechamiento de las especies nativas de leguminosas, esfuerzo que, además, aporta al rescate de los suelos y a la alimentación regional.

En otro orden de ideas, el policultivo intercalado es un sistema de gran interés debido a que emplea mayor número de especies endémicas. A nivel mundial, es uno de los cultivos más populares, ya que funciona para diversos fines; por ejemplo, el intercalado de maíz con especies del género *Brachiaria* sirve para evitar la erosión del suelo [47]; de igual forma, las combinaciones de árboles frutales con café u otras hortalizas y leguminosas ayudan a obtener mejoras agronómicas [48]; a su vez, en los intercalados de maíz, soya y girasol, este último forma una barrera biológica contra plagas o viento, lo que beneficia al cultivo de interés económico e incrementa el rendimiento [49]. También, respecto al cambio climático, se ha llevado a cabo un cultivo intercalado de maíz con chile jalapeño, bajo el propósito de aprovechar mejor los recursos del suelo y del agua [50].

Por su parte, en el norte y sur de América también se está retomando el uso de sistemas de policultivo con especies endémicas. En este sentido, los cultivos intercalados que se implementan allí se remontan a la práctica tradicional del uso de maíz; a tal efecto, la “milpa” es el cultivo intercalado más utilizado [44], generalmente compuesto de maíz, frijol y calabaza, aunque también se le han agregado chile, tomate, papa y otro tipo de leguminosas. El manejo agrícola de este agroecosistema se fundamenta en la selección de genotipos adaptados al crecimiento en condiciones locales de temperatura, humedad, precipitación y radiación [51]. Más allá de preservar el germoplasma del maíz, este sistema también tiene como fin conservar el conocimiento, las tradiciones y la extensa coevolución del cultivo con las comunidades humanas [52]. Asimismo, la incorporación de la milpa a los sistemas agrícolas ayuda a evitar impactos ambientales negativos como la erosión del suelo y la escorrentía química.

En cuanto a la relevancia de la milpa en comunidades, en muchas de ellas se considera parte de la fuente principal de alimentos [44], dado el significativo valor nutricional que puede aportar a la alimentación. Algunas poblaciones han sufrido repercusiones a la salud (enfermedades crónico-degenerativas) debido a cambios en la dieta derivados del sistema de producción de alimentos globalizado; en esos sitios la milpa aporta valiosos macro y micro nutrientes, así como nutraceuticos de beneficio fisiológico para prevenir o tratar enfermedades [53], [54]. De ahí que algunas poblaciones indígenas hayan readoptado este sistema de producción con el fin de recuperar la salud de sus integrantes.



Importancia de la dieta regional y su relación con el uso de policultivos

La dieta de las comunidades está estrechamente relacionada con los recursos naturales comestibles provenientes del sistema alimentario regional. Dicho sistema ha ido evolucionando en los últimos años en función del desarrollo tecnológico y a la globalización [8]; cambios a cargo de grandes corporaciones transnacionales que promueven, entre otras cosas, los nuevos mercados, el desarrollo de productos y diferentes formas de conservación y producción de alimentos.

La evolución de la alimentación conlleva ciertas problemáticas, por ejemplo, el consumidor desconoce el origen, obtención y distribución de los productos; esta desvinculación del proceso acarrea consecuencias en los escenarios sociales, económicos, ambientales, culturales y sanitarios [43]:

- Afectaciones a la economía de los pequeños productores regionales, quienes disminuyen sus ingresos económicos.
- Daños al medio ambiente generados por la producción a gran escala y fuera de la temporada de siembra de ciertos cultivos [1], [4], [6], [55].
- Pérdida de tradiciones culinarias.
- Alteración en las conductas alimentarias con un efecto negativo a la salud.

Sobre la alteración en las conductas alimentarias es importante mencionar que la incidencia de enfermedades crónicas no transmisibles está aumentando (ECNT) [33], producto de la escasa ingesta de ciertos nutrimentos contenidos en verduras y frutas (fibra, vitaminas y minerales). En contraste, se registra un elevado consumo de azúcares (sacarosa) y ácidos grasos saturados y trans [56], [57].

Este panorama refleja que ciertas acciones son necesarias para que la población pueda nutrirse apropiadamente; por tanto, el conocimiento del sistema alimentario regional es de gran importancia, ya que de este depende el repertorio de alimentos que se producen en una comunidad. También es importante recordar que la cocina tradicional regional es

parte del patrimonio intangible de las sociedades, a la vez que un elemento identitario y un punto fundamental de las economías regionales y locales [58], [59], [43].

Cabe mencionar que algunos países ya están llevando a cabo acciones para retomar la dieta regional, mediante la elección de productos frescos orgánicos, locales y de temporada [60], [61], [62]. Lo anterior se debe a la sostenibilidad de la dieta y a que se incluyen todas las dimensiones de la salud y el bienestar de las personas. Por ello, un sistema de policultivo endémico podría ubicarse como un fulcro para impulsar una dieta regional; tal implementación produciría un menor perjuicio al medio ambiente y un impacto positivo socioeconómico. Al mismo tiempo, generaría nutrimentos benéficos a la salud, fomentaría la conservación de especies y resguardaría la identidad cultural de una comunidad.

El policultivo milpa como una fuente adecuada de nutrimentos

Para una comunidad basada principalmente en la agricultura, los cultivos poseen un valor simbólico. La milpa es un antiguo sistema agrario que se extendió a lo largo de Mesoamérica (centro de México hasta Nicaragua), compuesto de alimentos básicos como el maíz, frijol y calabaza. En el multicultivo, la variedad de las especies utilizadas permite que haya amplia disposición de nutrimentos, por lo que favorece la seguridad la inseguridad alimentaria y desnutrición poblacional.

En términos generales, la alimentación conlleva una proporción diaria de macro y micro nutrimentos presentes en diferentes cantidades según el grupo alimenticio: hidratos de carbono (CHO), los cuales suponen un aporte del 55 al 60 % de las calorías totales diarias; otro macronutriente es la grasa, que aporta entre un 25 y 30 %, mientras que las proteínas contribuyen entre un 12 y 15 %. Además, debido a la interacción de las especies en el policultivo también se aportan compuestos bioactivos o nutraceuticos. También hay reportes de propiedades antioxidantes relacionadas con metabolitos fenólicos, los cuales aportan beneficios a la salud que van más allá de la nutrición convencional [53].

El maíz es el alimento que aporta la mayor cantidad de hidratos de carbono y proteínas en forma de aminoácidos esenciales como isoleucina,



metionina y cisteína. También aporta fibra soluble e insoluble (hemicelulosa y lignina), así como vitamina E, A, tiamina y riboflavina; además, dependiendo de su tipo (blanco o amarillo) el maíz puede aportar diferentes proporciones de carotenoides. Por otra parte, el frijol es una fuente rica de proteínas y fibra dietética (celulosa y hemicelulosa), que previene el estreñimiento, y su contenido de hierro es efectivo para combatir la anemia; asimismo, es un alimento de bajo índice glucémico, o sea que su consumo apenas eleva la glucosa en sangre. Su contenido de fibra soluble ayuda a nivelar el colesterol en sangre, y aunque sus azúcares complejos fermentables, rafinosa y estaquiosa, causan efectos indeseables, como flatulencias, se sabe que previenen el cáncer de colon. Los frijoles son ricos en un aminoácido esencial llamado lisina, pero carecen de aminoácidos azufrados esenciales, como la metionina y la cisteína. Se recomienda combinarlos con el grupo de los cereales (en alimentos como la tortilla) para suplir esta carencia y obtener una proteína de alto valor biológico comparable al de la carne. Por último, la cascarilla contiene bioactivos de la familia de los flavonoides conocidos como antocianinas; tales compuestos dan al frijol su color característico y además gozan de propiedades anticancerígenas, antitumorales y antiinflamatorias [63], [64].

Por su parte, la calabacita es una verdura que aporta vitamina C y carotenoides como luteína, β -criptoxantina, β -carotenos y zeaxantina; también aporta ácidos grasos poliinsaturados, fitoesteroles, fibra y minerales [65]. Se le atribuyen propiedades antiinflamatorias y desparasitantes, de buena movilidad intestinal; asimismo, las calabacitas son de bajo índice glucémico, refuerzan al sistema inmune y combaten diferentes tipos de cáncer [66].

Si bien la milpa sigue presente en algunas comunidades, la costumbre se ha perdido en numerosas localidades. Hay que recalcar que la implementación de este multicultivo no sólo promueve la preservación de costumbres y tradiciones; también brinda una alimentación sana, que puede aportar una gran parte de la energía y nutrientes diarios requeridos, al igual que mejora la salud gracias a los compuestos bioactivos. Cabe mencionar que los fundamentos bioquímicos que demuestran estos beneficios no se habían explorado sino hasta hace poco; por lo tanto, se requiere de más investigación para identificar otros bioactivos y documentar el impacto que tienen en la salud.

Discusión

Hasta hace algunos años, la investigación en policultivos se había enfocado a la secuencia de cultivo, la temporada de crecimiento y el área física de cada sistema. De ese modo, los cultivos de rotación, cobertura e intercalados son los que más se han implementado históricamente, debido a sus resultados satisfactorios tanto para el forraje como para la alimentación humana. En contraste, las investigaciones actuales en policultivos persiguen el potencial para aumentar la intensidad de cultivo. La importancia de este concepto yace en que el uso intensificado de la tierra podría impulsar significativamente la producción de cultivos alimentarios, forrajeros y bioenergéticos con resultados económicos y de seguridad alimentaria positivos. Sin embargo, este potencial se ve limitado por circunstancias como la degradación del suelo, el estrés biótico, la escasez de semillas y fertilizantes, la deficiente infraestructura de procesamiento y almacenaje, los magros incentivos de mercado, las tecnologías obsoletas y la impredecible variabilidad en las precipitaciones y cambio climático [67]. En otras palabras, cuando el manejo de un multicultivo no se gestiona correctamente, exige más recursos, ya sea en términos de mano de obra, energía, agua, nutrientes, agroquímicos o todo lo anterior. Tras profundizar la investigación sobre las interacciones de las especies involucradas en estos cultivos, algunos estudios demuestran una relación positiva entre especies endémicas. Tal sinergia parece guardar relación con la similitud de la estructura de las comunidades bacterianas, tanto del microbioma del suelo como del rizobioma de las especies [51]. Este descubrimiento demuestra que la diversidad microbiana de la rizosfera estimula la actividad de microorganismos específicos y da pie para indagar una gama de vías metabólicas. Con estos estudios se podrían encontrar nuevos beneficios a los ecosistemas y también datos relevantes para la producción de alimentos a fin de satisfacer la creciente demanda nutricia de la población.

En relación con la calidad de los productos obtenidos en los sistemas de cultivo (contenido de macro y micronutrientes, nutraceuticos [53], [54], [68]), informes actuales muestran el papel de las agrotécnicas (tecnologías agrícolas) en la producción de bioactivos vegetales. El enfoque de estos reportes está en la nutrición de las plantas mediante técnicas sustentables de cultivo con el objetivo de obtener compuestos de valor farmacéutico. Sin embargo, la investigación de estas técnicas en



policultivos y con el uso de plantas destinadas al consumo humano es prácticamente inexistente [69].

Si bien la implementación de policultivos es común en algunas regiones del mundo, aún quedan muchas interrogantes por atender, tanto en el manejo agrícola como en el uso adecuado de especies en estos sistemas. A futuro habrá que dedicar la investigación a los arreglos topológicos para garantizar la interacción positiva de las especies en cuestiones no sólo de rendimiento, sino también de aprovechamiento de recursos. También es necesario determinar las especies endémicas de una región que comparten condiciones climáticas y edafológicas; posteriormente, caracterizar los géneros bacterianos encontrados en los rizobios de las plantas a utilizar [70] para evaluar su compatibilidad, y así producir y conservar las semillas criollas. En lo que concierne la nutrición de las plantas mediante agrotécnicas, urge desarrollar ensayos en policultivos para determinar cómo mejorar la calidad y cantidad de los compuestos bioactivos benéficos a la salud humana [54].

Conclusiones

La pérdida de la biodiversidad y hábitats naturales, el daño a los suelos fértiles, problemáticas de índole socioeconómica, cultural y sanitaria son algunas de las dificultades que deben solventarse lo antes posible. Por ello es necesario diversificar los cultivos, para devolver la riqueza a los paisajes; así, la oferta alimenticia será más amplia y los aportes nutricionales más valiosos. El policultivo es un sistema agroecológico que respeta la agrobiodiversidad, por lo que podría ser una opción para lidiar con estas problemáticas. Además, el empleo de especies endémicas asegura la integridad de los hábitats y menor o nulo uso de agroquímicos que perturben los recursos naturales de esa zona.

Es imperativo estudiar las interacciones de plantas endémicas, con el fin de implementar sistemas de policultivos adaptados a su región; policultivos que rindan alimentos saludables de mejor calidad nutricia basados en la cultura y características de una región. Estas acciones podrían contribuir al rescate de algunas variedades cuyo abandonado consumo las ha puesto en peligro de extinción. Así, se debe recuperar el vínculo entre la naturaleza y la cultura, ya que perderlo ha ocasionado

estragos en la dieta de la población y, en consecuencia, en el estado de salud. En México, la dieta basada en la milpa constituye un ejemplo bien documentado de que ese vínculo es recuperable en otras partes del mundo: se trata de un modelo de alimentación saludable derivado de la cultura y características regionales de la alimentación mexicana.

Finalmente, en la investigación a futuro será primordial la cooperación interdisciplinaria de científicos y agricultores, para que el intercambio de conocimientos origine sistemas sostenibles de producción alimentaria en beneficio de las generaciones presentes y futuras.



Referencias

- [1] D. Soto-Gómez, and P. Pérez-Rodríguez, "Sustainable agriculture through perennial grains: Wheat, rice, maize, and other species. A review," *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 325, p. 107747, Feb. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107747>
- [2] A. Kumar, A. Choudhary, H. Kaur, and S. Mehta, "A walk towards Wild grasses to unlock the clandestine of gene pools for wheat improvement: A review," *Plant Stress*, vol. 3, p. 100048, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100048>
- [3] N. Pérez-Méndez, C. Miguel-Rojas, J.A. Jimenez-Berni, D. Gomez-Candon, A. Pérez-de-Luque, E. Fereres, M. Catala-Forner, D. Villegas, and J.C. Sillero, "Plant Breeding and Management Strategies to Minimize the Impact of Water Scarcity and Biotic Stress in Cereal Crops under Mediterranean Conditions," *Agronomy*, vol. 12 (1), p. 75, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010075>
- [4] W. Picado, Evaluating the Green Revolution Dominant Narrative for Latin America: Technology, Geopolitics, and Institutions. In: *Handbook of the Historiography of Latin American Studies on the Life Sciences and Medicine*, A. Barahona, *Historiographies of Science*. Springer, Cham., pp. 1-19, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48616-7_14-2
- [5] S. Shefer, M. Lebendiker, A. Finkelshtein, D.A. Chamovitz, and A. Golberg, "Ulvan crude extract's chemical and biophysical profile and its effect as a biostimulant on *Arabidopsis thaliana*," *Algal Research*, vol. 62, p. 102609, Mar. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102609>
- [6] S. Prager, and K. Wiebe, "Strategic foresight for agriculture: Past ghosts, present challenges, and future opportunities," *Global Food Security*, vol. 28, p. 100489, Mar. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100489>
- [7] F. Jacquet, M.H. Jeuffroy, J. Jouan, E. Le Cadre, I. Litrico, T. Malausa, X. Reboud, and C. Huyghe, "Pesticide-free agriculture as a new paradigm for research," *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 42 (1), p. 8, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00742-8>
- [8] T.N. Sogang, and Y. Monkouop, "Past, Present and

Future of Urban Agriculture in Cameroon: Major Contemporary Challenges (1993-2017),” *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, vol. 11 (1), 1-14, Feb. 2022. <https://doi.org/10.4236/jacen.2022.111001>

- [9] M. Gullian Klanian, M. Delgado Diaz, J. Aranda, and C. Rosales Juárez, “Integrated effect of nutrients from a recirculation aquaponic system and foliar nutrition on the yield of tomatoes *Solanum lycopersicum* L. and *Solanum pimpinellifolium*,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 25 (18), pp.17807-17819, Apr. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1817-5>
- [10] S.M. Pinho, R.M. Valladão Flores, L.H. David, M.G.C. Emerenciano, K.K. Quagraine, and M. Célia Portella, “Economic comparison between conventional aquaponics and FLOCponics systems,” *Aquaculture*, vol. 552, p. 737987, Apr. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.737987>
- [11] U. Knaus, J. Zimmermann, S. Appelbaum, and H.W. Palm, “Spearmint (*Mentha spicata*) Cultivation in Decoupled Aquaponics with Three Hydro-Components (Grow Pipes, Raft, Gravel) and African Catfish (*Clarias gariepinus*) Production in Northern Germany,” *Sustainability*, vol. 14 (1), p. 305, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14010305>
- [12] M.J. Ibarra, E.W. Alcarraz, O. Tapia, Y. Ponce, H.D. Calderon-Vilca, and C.R. Quispe, A Comparison of Cultivation Techniques NFT-I, FR and Soil: An IoT Monitoring Approach. In: *Proceedings of International Conference on Data Science and Applications*. In: M. Saraswat, S. Roy, C. Chowdhury, and A.H. Gandomi, *Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Vol. 288, pp. 331-347, 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5120-5_26
- [13] G.A. Sarmiento Guevara, “Acuaponía implementación de un modelo acuapónico para el control y monitoreo mediante herramientas TIC’S e IOT en un cultivo modular en Villavicencio,” *Documentos De Trabajo ECBTI*, vol. 1 (2), 2020. <https://doi.org/10.22490/ECBTI.4305>
- [14] K. Inosako, E. Troyo Diéguez, T. Saito, and G. Lucero Vega, *Manual Técnico para Cultivo a Cielo Abierto usando Agua Residual de Acuaponia*, In: J.Á. Larrinaga Mayoral, I. Racotta Dimitrov, and S. Yamada, *Manual Técnico de Acua-*



ponía Combinada con Cultivo a Cielo Abierto adaptado en Zonas Áridas, SATREPS, pp. 65-89, 2020. https://www.jica.go.jp/mexico/espanol/activities/c8h0vm00007f8s9j-att/manual_sp.pdf

- [15] L.H. David, S.M. Pinho, F. Agostinh, J.I. Costa, M.C. Portella, K.J. Keesman, and F. Garcia, "Sustainability of urban aquaponics farms: An emergy point of view," *Journal of Cleaner Production*. vol. 331, p. 129896, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129896>
- [16] A. Mishra, L. Singh, and D. Singh, "Unboxing the black box—one step forward to understand the soil microbiome: A systematic review," *Microbial Ecology*, Feb. 2022. <https://doi.org/10.1007/s00248-022-01962>
- [17] J. Masabni, and G. Niu, Chapter 10 - Aquaponics, In: *Plant Factory Basics, Applications and Advances*, T. Kozai, G. Niu, and J. Masabni, pp. 167-180, 2022. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85152-7.00017-3>
- [18] V. Bogužas, L. Skinulienė, L.M. Butkevičienė, V. Steponavičienė, E. Petrauskas, and N. Maršalkienė, "The Effect of Monoculture, Crop Rotation Combinations, and Continuous Bare Fallow on Soil CO₂ Emissions, Earthworms, and Productivity of Winter Rye after a 50-Year Period," *Plants*, vol. 11 (3), p. 431, Feb. 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11030431>
- [19] H. Rharrhour, W. Fatima, S. Goddek, M. Sadik, A. El Moujtahid, H. Nhhala, and A. Yahyaoui, "Towards sustainable food productions in Morocco: Aquaponics," in *Proc. E3S Web of Conferences*, vol. 337, paper 03004, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202233703004>
- [20] V.P. Mohanan, N.R. Mahanta, A. Kushwaha, and L. Goswami, Chapter 3 - Leveraging the potential of aquaponics for urban sustainability, In: *Emerging Trends to Approaching Zero Waste*, pp. 59-78, 2022. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85403-0.00007-4>
- [21] E. Masson, and S. Bubendorff, "Local foods' as trustworthy food: geographical proximity, social areas and interpersonal relationships," *Review of Agricultural, Food and Environmental Studies*, vol. 103, pp. 29-49, Feb. 2022. <https://doi.org/10.1007/s41130-021-00159-7>
- [22] L. Cappelli, F. D'Ascenzo, R. Ruggieri, and I. Gorelova, "Is

- Buying Local Food a Sustainable Practice? A Scoping Review of Consumers' Preference for Local Food," *Sustainability*, vol. 14 (2), p. 772, Nov. 2022. <https://doi.org/10.3390/su14020772>
- [23] C.M.Viana, D. Freire, P. Abrantes, J. Rocha, and P. Pereira, "Agricultural land systems importance for supporting food security and sustainable development goals: A systematic review," *Science of The Total Environment*, vol. 806, part 3, p. 150718, Feb. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150718>
- [24] E. Veres Zahaikevitch, L. Medina Macedo, L. Battisti Telles, J.V. Messias Bittencourt, and A.G. Veres Zahaikevitch, "Contemporary Public Policies to Strengthen Family Farming in the International Perspective: A Bibliometric Study," *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, vol. 8. (1), p. 8, Oct. 2022. <https://doi.org/10.3390/joitmc8010008>
- [25] T. Yuan, Z.B. Lin, S. Cheng, R. Wang, and P. Lu, "Removal of Sulfonamide Resistance Genes in Fishery Reclamation Mining Subsidence Area by Zeolite," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19 (7), p. 4281, Feb. 2022. <https://doi.org/10.3390/ijerph19074281>
- [26] B.B. Choudhary, and S. Sirohi, "Understanding vulnerability of agricultural production system to climatic stressors in North Indian Plains: a meso-analysis," *Environment, Development and Sustainability*, vol. 24, pp. 13522–13541, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01997-7>
- [27] K. Bakhsh, S.A.A. Naqvi, and W. Nasim, Effects of Climate Change on the Socioeconomic Conditions of Farmers: A Case Study, In: *Building Climate Resilience in Agriculture*. W.N. Jatoi, M. Mubeen, A. Ahmad, M.A. Cheema, Z. Lin, M.Z. Hashmi (eds). Springer, Cham, Oct. 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79408-8_16
- [28] L. de Graaf, M. Boulanger, M. Bureau, G. Bouvier, M. Meryet-Figuere, S. Tual, P. Lebailly, and I. Baldi, "Occupational pesticide exposure, cancer and chronic neurological disorders: A systematic review of epidemiological studies in greenspace workers," *Environmental Research*, vol. 203, p. 111822, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111822>
- [29] A. Batra, J. Swaby, P. Raval, H. Zhu, N.L. Weintraub, M.



Terris, N.A. Karim, A. Keruakous, D. Gutterman, K. Beyer, M. Stolley, S.A. Brown, and A. Guha, "Effect of Community and Socio-Economic Factors on Cardiovascular, Cancer and Cardio-Oncology Patients with COVID-19," *COVID*, vol. 2 (3), pp. 350-368, Feb. 2022. <https://doi.org/10.3390/covid2030024>

[30] B. Nguyen Thanh, T. Le Van Thuy, M. Nguyen Anh, M. Nguyen Nguyen, and T. Nguyen Hieu, "Drivers of agricultural transformation in the coastal areas of the Vietnamese Mekong delta," *Environmental Science & Policy*, vol. 122, pp. 49-58, Aug. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.04.010>

[31] G.S. Morales, R.K.M. Villaron, M.C.O. Yap, and M.A.L. Rosete, "The Relationship Between Rural-Urban Migration and the Agricultural Output of the Philippines," *International Journal of Social and Management Studies*, vol. 3 (1), pp. 62-74, 2022.

[32] M. Abounaga, and H. Fouad, Urban Green Coverage: Importance of Green Roofs and Urban Farming Policies in Enhancing Liveability in Buildings and Cities—Global and Regional Outlook, In: The Importance of Greenery in Sus-

tainable Buildings. Innovative Renewable Energy. A. Sayigh and A. Trombadore (eds.). Springer. Cham. Jul. 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68556-0_7

[33] T.A. Ladan, M.H. Ibrahim, S.S.B.S. Ali, and A. Saputra, "A geographical review of urban farming and urban heat island in developing countries," in *Proc. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 986 (1), paper 012071, 2022. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/986/1/012071>

[34] G. Tiny, M.R. Lucas, P.D. Henriques, and A. Marta-Costa, "Family agriculture, sustainable development and ethnographic linear programming - A Review. Economic and Social Development," in *Proc. 78th International Scientific Conference on Economic and Social Development*, pp. 285-294, Feb. 2022. <https://dx.doi.org/10.22161/ijhaf.6.3.1>

[35] B.E. Graeub, M.J. Chappell, H. Wittman, S. Ledermann, R. Bezner Kerr, and B. Gemmill-Herrena, "The State of Family Farms in the World," *World Development*, vol. 87, pp. 1-15, Nov. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.05.012>

- [36] J. Möllmann, M. Buchholz, W. Kölle, and O. Musshoff, "Do remotely-sensed vegetation health indices explain credit risk in agricultural microfinance?," *World Development*, vol. 127, p. 104771, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104771>
- [37] S. Sharon Maria, S. Lakshmy, D.K. Nidhin, and N.K. Shibu, N.K., Carbon Neutral Communities: Model for Integrating Climate Action into Development Planning, In: I. Pal, S. Kolathayar, (eds), *Sustainable Cities and Resilience. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 183, Springer, Singapore, 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5543-2_31
- [38] J.L. Saenz, B. Downer, M.A. Garcia, and R. Wong, "Rural/urban dwelling across the life-course and late-life cognitive ability in Mexico," *SSM - Population Health*, vol. 17, p. 101031, Mar. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ssmph.2022.101031>
- [39] G. Wies, A. Navarrete-Segueda, E. Ceccon, J. Larsen, and M. Martinez-Ramos, "What drives management decisions and grain yield variability in Mesoamerican maize cropping systems? Evidence from small-scale farmers in southern Mexico," *Agricultural Systems*, vol. 198, p. 103370, Apr. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2022.103370>
- [40] T.Y. Macías Zambrano, C.S. González Calzadilla, V.D. Espinel Pino, T.B. Bravo Mero, and J.C. Vélez Vera, "Rural bee-keeping: Eco-friendly complement to traditional agriculture," *International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 7 (2), pp. 741-750, 2022.
- [41] M.A. Magaña Magaña, M.E. Tavera Cortés, L.L. Salazar Barrientos, and J.R. Sanginés García, "Productividad de la apicultura en México y su impacto sobre la rentabilidad," *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 7 (5), pp. 1103-1115, Aug. 2016. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i5.235>
- [42] H.E. Hernández, G.A. Gutiérrez, I. Gutiérrez-Montes, J.C. Suárez, H.J. Andrade, A.P. Bernal, F. Casanoves, and C. Butler Flora, "How Close Are We to Self-Provisioning? A Look at the Livelihood Strategies of Rural Households in the Southern Andean Region of Colombia," *Sustainability*, vol. 14 (15), p. 2504, Feb. 2022. <https://doi.org/10.3390/su14052504>
- [43] M. Haque, S.K. Acharya, and B. Sarkar, "Farmers' Perception towards Transforma-



tion of Rice-based Cropping System into Tea Garden," Indian Journal of Extension Education, vol. 58 (1), pp. 12-16, Jan-Mar. 2022. <https://doi.org/10.48165/IJEE.2022.58103>

- [44] United Nations. (2022) Progress towards the Sustainable Development Goals. Economic and Social Council - High-level political forum on sustainable development. Advance un-edited version. [Online] Available: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/29858SG_SDG_Progress_Report_2022.pdf (Accessed 29 December 2022)
- [45] Y. Getaneh, A. Alemu, Z. Ganewo, and A. Haile, "Food security status and determinants in North-Eastern rift valley of Ethiopia," Journal of Agriculture and Food Research, vol. 8, p. 100290, Jun. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100290>
- [46] S.B. Cavalli, P. Soares, S.S. Martinelli, and S. Schneider, "Family farming in times of Covid-19," Revista de Nutrição. vol. 33, 2020. <https://doi.org/10.1590/1678-9865202033e200180>
- [47] L. van den Berg, P. Hebinck, and D. Roep, "'We go back to the land': processes of re-peasantisation in Araponga, Brazil," The Journal of Peasant Studies, vol. 45 (3), pp. 653-675, Dec. 2016. <https://doi.org/10.1080/03066150.2016.1250746>
- [48] B.S. Amanto, M.C.B. Umanailo, R.S. Wulandari, T. Taufik, and S. Susiati, "Local Consumption Diversification," International Journal of Scientific & Technology Research, 8 (8), pp.1865-1869, Aug. 2019. <https://www.ijstr.org/final-print/aug2019/Local-Consumption-Diversification.pdf>
- [49] T. Zhang, J. Chen, and K.G. Grunert, "Impact of consumer global-local identity on attitude towards and intention to buy local foods," Food Quality and Preference, vol. 96, p. 104428, Mar. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2021.104428>
- [50] S.H. Kim, R. Huang, and S. Kim, "Exploring advertising strategy for restaurants sourcing locally: The interplay of benefit appeal and regulatory focus," Journal of Hospitality and Tourism Management, vol. 50, p. 127-138, Mar. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jhtm.2022.01.009>
- [51] J.B. Kirkpatrick, and A. Davison, "Home-grown: Gardens, practices and motivations in urban domestic vegetable production," Landscape and

- Urban Planning, vol. 170, pp. 24-33, Feb. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.023>
- [52] I. Opitz, R. Berges, A. Piorr, and T. Krikser, "Contributing to food security in urban areas: differences between urban agriculture and peri-urban agriculture in the Global North," *Agriculture and Human Values*, vol. 33, pp. 341-358, Jun. 2016. <https://doi.org/10.1007/s10460-015-9610-2>
- [53] A. Katre, T. Bertossi, A. Clarke-Sather, and M. Parsatoon, "Agroecological Transition: A Territorial Examination of the Simultaneity of Limited Farmer Livelihoods and Food Insecurity," *Sustainability*, vol. 14 (6), p. 3160, Mar. 2022. <https://doi.org/10.3390/su14063160>
- [54] C.S. Aweke, E. Lahiff, and J.Y. Hassen, "The contribution of agriculture to household dietary diversity: evidence from smallholders in East Hararghe, Ethiopia," *Food Security*, vol. 12, pp. 625-636, Apr. 2020. <https://doi.org/10.1007/s12571-020-01027-w>
- [55] L. Veloso Dutra, D. de Castro Morais, R.H. Silva Santos, S. do Carmo Castro Franceschini, and S. Eloiza Priore, "Contribution of the production for self-consumption to food availability and food security in households of the rural area of a Brazilian city," *Ecology of Food and Nutrition*, vol. 57 (4), pp. 282-300, Jun. 2018. <https://doi.org/10.1080/03670244.2018.1488250>
- [56] W.B. Traill, "The Rapid Rise of Supermarkets?," *Development Policy Review*, vol. 24 (2), pp. 163-174, Feb. 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7679.2006.00320.x>
- [57] D.Y. Ayal, I.O. Olawale, and O. Olayide, "Review of Sustainable Agriculture and Food Systems in Africa," *African Journal of Sustainable Development*, vol. 10 (3), Mar. 2021. <https://www.researchgate.net/publication/358150370>
- [58] J. Camacho-Otero, C. Boks, and I.N. Pettersen, "Consumption in the Circular Economy: A Literature Review," *Sustainability*, vol. 10 (8), p. 2758, Aug. 2018. <https://doi.org/10.3390/su10082758>
- [59] V.M. Fernández-Cabanás, A. Delgado, J.R. Lobillo-Eguíbar, and L. Pérez-Urrestarazu, "Early production of strawberry in aquaponic systems using commercial hydroponic bands," *Aquacultural Engineering*, vol. 97, p. 102242, May 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2022.102242>
- [60] C.M. Galanakis, G. Brunori, D. Chiaramonti, R. Mat-



thews, C. Panoutsou, and U.R. Fritsche, "Bioeconomy and green recovery in a post-COVID-19 era," *Science of The Total Environment*, vol. 808 (2), p. 152180, Feb. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152180>

- [61] Y. Geng, J. Sarkis, and R. Bleischwitz, "How to globalize the circular economy," *Nature*, vol. 565 (7738), pp. 153-155, 2019. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-00017-z>
- [62] S. Milliken, A. Ovca, M. Villarroel, F. Gartmann, N. Antenen, T. Griessler Bulc, B. Kotzen, and R. Junge, Lessons Learned from Introducing Aquaponics to Higher Education Curricula, In: *Enhancing Environmental Education Through Nature-Based Solutions*, C. Vasconcelos, C.S.C. Calheiros (eds). *Integrated Science*, vol. 4. Springer, Cham. Feb. 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91843-9_11
- [63] J. Colt, A.M. Schuur, D. Weaver, and K. Semmens, "Engineering Design of Aquaponics Systems," *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, vol. 30 (1), pp. 33-80, 2022. <https://doi.org/10.1080/23308249.2021.1886240>
- [64] M. Breitenstein, and A. Hicks, "Review and harmonization of the life cycle global warming impact of five United States aquaponics systems," *Aquacultural Engineering*, vol. 96, p. 102224, Feb. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2021.102224>
- [65] J.E. Rakocy, M.P. Masser, and T.M. Losordo, "Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics-Integrating fish and plant culture," *SRAC Publication*, vol. 454, 2006.
- [66] B. Yep, and Zheng, "Aquaponic trends and challenges – A review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 228 (10), p. 1586-1599, Aug. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.290>
- [67] B. Kralik, F. Weisstein, J. Meyer, K. Neves, D. Anderson, and J. Kershaw, "From water to table: A multidisciplinary approach comparing fish from aquaponics with traditional production methods," *Aquaculture*, vol. 552, p. 737953, Apr. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.737953>
- [68] Ghamkhar, R., C. Hartleb, Z. Rabas, and A. Hicks, "Evaluation of environmental and economic implications of a cold-weather aquaponic food production system using life cycle assessment and economic analysis," *Journal*

- of Industrial Ecology, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1111/jiec.13230>
- [69] N. Romano, A. Powell, S. Islam, H. Fischer, N. Renukdas, A.K. Sinha, and S. Francis, "Supplementing aquaponics with black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae frass tea: Effects on the production and composition of sweetpotato slips and sweet banana peppers," *Aquaculture*, vol. 555, p. 738160, Jun. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738160>
- [70] M.B. Vallejos, M.S. Marcos, C. Barrionuevo, and N.L. Olivera, "Salinity and N input drive prokaryotic diversity in soils irrigated with treated effluents from fish-processing industry," *Applied Soil Ecology*, vol. 175, p. 104443, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104443>
- [71] A.EH. Zohry, and S. Ouda, Fish Farms Effluents for Irrigation and Fertilizer: Field and Modeling Studies, In: *Climate-Smart Agriculture*. Springer, Cham., Jan. 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93111-7_3
- [72] J.H. Kang, H.Y. Jung, and J.K. Kim, "Complete reuse of raw fishmeal wastewater: Evidence from a field cultivation study and economic analysis," *Environmental Engineering Research*, vol. 23 (3), pp. 271-281, Feb. 2018. <https://doi.org/10.4491/eer.2017.190>
- [73] A. Sathyan, S.A. Muthukumaraswamy, and H. Rahman, On the Study and Analysis of Automated Aquaponics System Using AVR Microcontroller, In: *Intelligent Manufacturing and Energy Sustainability*, A.N.R. Reddy, D. Marla, M.N. Favorskaya, S.C. Satapathy (eds). Smart Innovation. Systems and Technologies. vol 265, pp. 519-528, 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6482-3_51
- [74] J. Hager, L.A. Bright, J. Dusci, and J. Tidwell, "AQUAPONICS - Production Manual A Practical Handbook for Growers," Land Grant Program, University of Kentucky, 2021.
- [75] W.A. Lennard, and B.V. Leonard, "A Comparison of Three Different Hydroponic Subsystems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an Aquaponic Test System," *Aquaculture International*, vol. 14 (6), pp. 539-550, Dec. 2006. <https://doi.org/10.1007/s10499-006-9053-2>
- [76] FAO. (2020) The State of World Fisheries and Aquaculture. Sustainability in Action. [Online] Available: <https://www.fao.org>



org/3/ca9229en/ca9229en.pdf
(Accessed 29 December 2022)

- [77] M. Eck, O. Körner, M.H. Jijakli, Nutrient Cycling in Aquaponics Systems. In: Aquaponics Food Production Systems. S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, G.M. Bunnell (eds). Springer, Cham., pp 231–246, Jun. 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_9
- [78] A. Joyce, S. Goddek, B. Kotzen, S. Wuertz, Aquaponics: Closing the Cycle on Limited Water, Land and Nutrient Resources, In: S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, G.M. Bunnell (eds), Aquaponics Food Production Systems. Springer, Cham., pp. 19–34, Jun. 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_2
- [79] S.G. Alarcón-Silvas, J.A. León-Cañedo, J.F Fierro-Sañudo, J. Ramírez-Rochín, M.G. Fregoso-López, M.G. Frías-Espéricueta, C.C. Osuna-Martínez, and F. Páez-Osuna, “Water quality, water usage, nutrient use efficiency and growth of shrimp *Litopenaeus vannamei* in an integrated aquaponic system with basil *Ocimum basilicum*,” *Aquaculture*, vol. 543, p. 737023, Oct. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737023>
- [80] G.F.M. Baganz, A. Timpe, D. Baganz, G. Staaks, B. Hunger, W. Kloas, and F. Lohrberg, “City or hinterland – site potentials for upscaled aquaponics in a Berlin case study,” *npj Urban Sustainability* 2, num. 29, Nov. 2022. <https://doi.org/10.1038/s42949-022-00072-y>
- [81] A. Greenfeld, N. Becker, J.F. Bornman, S. Spatari, and D.L. Angel, “Is aquaponics good for the environment?—evaluation of environmental impact through life cycle assessment studies on aquaponics systems,” *Aquaculture International*, vol. 30 (1), pp. 305–322, Feb. 2022. <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00800-8>
- [82] V. Ondruška, B.S. How, M. Netolický, V. Máša, and S.Y. Teng, “Resource optimisation in aquaponics facility via process monitoring and graph-theoretical approach,” *Carbon Resources Conversion*, vol. 5 (4), pp. 255-270, Dec. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2022.04.003>
- [83] J.G. Vargas-Hernández, Transformations of Urban Agro Ecology Landscapes in Territory Transition, In: Deep Learning for Sustainable Agriculture - Cognitive Data Science in Sustainable Computing, pp. 199-221, 2022. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85214-2.00007-0>
- [84] A. Sridhar, A. Balakrishnan, M.M. Jacob, M. Sillanpää,

- and N. Dayanandan, "Global impact of COVID-19 on agriculture: role of sustainable agriculture and digital farming," *Environmental Science and Pollution Research*, Mar. 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19358-w>
- [85] S. Burgin, "'Back to the future'? Urban backyards and food self-sufficiency," *Land Use Policy*, vol. 78, pp. 29-35, Nov. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.06.012>
- [86] O.O. David, and W. Grobler, "Status Quo of Households' Backyard Food Gardens in South Africa: The "Drivers",," *Sustainability*, vol. 14 (5), p. 2674, Feb. 2022. <https://doi.org/10.3390/su14052674>
- [87] A. Basarir, N.M.N. Al Mansouri, and Z.F.R. Ahmed, "Householders Attitude, Preferences, and Willingness to Have Home Garden at Time of Pandemics," *Horticulturae*, vol. 8 (56), Jan. 2022. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8010056>
- [88] L.S. Chalmin-Pui, A. Griffith, J. Roe, T. Heaton, and R. Cameron, "Why garden? – Attitudes and the perceived health benefits of home gardening," *Cities*, vol. 112, p. 103118, May 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103118>
- [89] M. Cervantes-Zapana, J.L. Yagüe, V.L. De Nicolás, and A. Ramirez, "Benefits of public procurement from family farming in Latin-AMERICAN countries: Identification and prioritization," *Journal of Cleaner Production*, vol. 277, p. 123466, Dec. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123466>
- [90] A. Sofo, and A. Sofo, "Correction to: Converting Home Spaces into Food Gardens at the Time of Covid-19 Quarantine: all the Benefits of Plants in this Difficult and Unprecedented Period," *Human Ecology*, vol. 48 (141), May 2020. <https://doi.org/10.1007/s10745-020-00157-1>
- [91] B. Adeleke, S. Cassim, and S. Taylor, "Pathways to low-cost aquaponic systems for sustainable livelihoods and economic development in poor communities: defining critical success factors," *Aquaculture International*, vol.30, pp. 1575–1591, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1007/s10499-022-00865-z>
- [92] M.L. Richardson, and C.G. Arlotta, "Producing Cherry Tomatoes in Urban Agriculture," *Horticulturae*, vol. 8 (274), Mar. 2022. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8040274>



- [93] B. Davis, L. Lipper, and P. Winters, "Do not transform food systems on the backs of the rural poor," *Food Security*, **14**, pp. 729–740, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1007/s12571-021-01214-3>
- [94] S. Goddek, A. Joyce, S. Wuertz, O. Körner, I. Bläser, M. Reuter, and K.J. Keesman, Decoupled Aquaponics Systems, In: S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, G.M. Burnell (eds), *Aquaponics Food Production Systems*. Springer, Cham., pp. 201–229, Jun. 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_8
- [95] E. Villanueva-Gutiérrez, C. Rodríguez-Armenta, M.L. González-Félix, and M. Perez-Velazquez, "Incorporating hydrolyzed soy protein or black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal into feeds for *Totoaba macdonaldi*," *Aquaculture*, vol. **554**, p. 738152, May 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738152>
- [96] E.G. Popkova, Vertical Farms Based on Hydroponics, Deep Learning, and AI as Smart Innovation in Agriculture, In: E.G. Popkova, B.S. Sergi (eds), *Smart Innovation in Agriculture. Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol. **264**, Springer, Singapore, pp. 257–262, Feb. 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7633-8_28
- [97] R.H. Bosma, L. Lacambra, Y. Landstra, C. Perini, J. Poullie, M.J. Schwaner, and Y. Yin, "The financial feasibility of producing fish and vegetables through aquaponics," *Aquacultural Engineering*, vol. **78**, Part B, pp. 146–154, Aug. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.07.002>
- [98] Y. Hao, K. Ding, Y. Xu, Y. Tang, D. Liu, and G. Li, "States, Trends, and Future of Aquaponics Research," *Sustainability*, vol. **12** (18), p. 7783, Sep. 2020. <https://doi.org/10.3390/su12187783>
- [99] M.K. Rahman, M.M. Masud, R. Akhtar, and M.M. Hossain, "Impact of community participation on sustainable development of marine protected areas: Assessment of ecotourism development," *International Journal of Tourism Research*, **24** (1), p. 33–43, Jun. 2022. <https://doi.org/10.1002/jtr.2480#>
- [100] M. McClatchie, R. Schulting, R. McLaughlin, S. Colledge, A. Bogaard, P. Barratt, and N. Whitehouse, "Food Production, Processing and Foodways in Neolithic Ireland," *Environmental Archaeology*, **27**:1, pp. 80–92, 2022. <https://doi.org/10.1080/14614103.2019.1615215>
- [101] A.C. McAlvay, A. DiPaola, A.C. D'Andrea, M.L. Ruelle, M. Mosulishvili, P. Halstead,

and A.G. Power, "Cereal species mixtures: an ancient practice with potential for climate resilience. A review," *Agronomy for Sustainable Development*, 42, num. 100, Oct. 2022. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00832-1>



ORGANOLEPTIC AND QUALITY ASSESSMENT IN THREE BLACK CHERRY TOMATO VARIETIES

EVALUACIÓN ORGANOLÉPTICA Y DE CALIDAD EN TRES
VARIETADES DE TOMATE CHERRY NEGRO

Josué Daniel Hernández Vega
Ixchel Parola Contreras
Juan Antonio Valencia Hernández
Erik Gustavo Tovar Pérez
Ramón Gerardo Guevara Gonzalez
Juan Fernando García Trejo
Rosario Guzmán Cruz*

Universidad Autónoma de Querétaro, México.

* rosario.guzman@uaq.mx



Abstract

Resumen

Se determinaron las características morfológicas de la planta, los parámetros de calidad físico-químicos y la evaluación organoléptica en tres variedades de tomate cherry negro. Ni la altura de la planta ni el número de racimos por planta indican diferencias en el comportamiento vegetal de las tres variedades. La variedad kumato sobresalió en los parámetros de calidad físico-químicos. Por lo demás, la variedad indigo cherry drops se destacó en los parámetros de calidad química. La variedad indigo cherry drops tiene la preferencia de los jueces no calificados en la combinación de los atributos sensoriales: Aspecto Visual, Tacto y Gusto. Estos resultados sugirieron que la percepción sensorial y las características físico-químicas aumentaron las posibilidades de comercialización de los tomates cherry negros, así como desarrollar un producto comercial que satisfaga las necesidades y demandas de los consumidores y así promover el consumo de tomates cherry negro de calidad.

Palabras clave: °Brix, acidez titulable, Kumato, Indigo Cherry Drops, Indigo Rose.

The morphological characteristics of the plant, physico-chemical quality parameters, and organoleptic evaluation were determined in three varieties of black cherry tomatoes. Neither the plant height nor the number of clusters per plant indicate differences in the vegetative behavior of the three varieties. The Kumato variety stood out in physico-chemical quality parameters. Furthermore, the Indigo Cherry Drops variety excelled in chemical quality parameters. The Indigo Cherry Drops variety is preferred by untrained judges in the combination of sensory attributes: Visual Appearance, Touch, and Taste. These results suggest that sensory perception and physico-chemical characteristics enhance the marketing possibilities of black cherry tomatoes. Additionally, developing a commercial product that meets the needs and demands of consumers could promote the consumption of high-quality black cherry tomatoes.

Keywords: °Brix, titratable acidity, Kumato, Indigo Cherry Drops, Indigo Rose.



Introduction

Tomato is the most produced and consumed agricultural product in the world; its global production has increased recently at a rate of 35% per year [1]. Another factor that renders it an essential vegetable is its minerals and antioxidants content. Since many non-contagious chronic-degenerative diseases are associated with smoking, sedentary lifestyles and stressful working days, these nutrients are essential in health protection [2], [3], [4].

Tomato demand has increased in recent years, which positions it as the most valuable vegetable in the world [5]. This easily grown crop and its varieties have become a popular alternative worldwide [6]. Cherry tomato varieties have opened up opportunities in Mexico due to their agronomic attributes such as climate adaptability, physical characteristics, environmental stress resistance, and profitability [7], [8].

Popularity of cherry tomatoes is a result of their aroma, flavor, texture, and color. However, they also contain organic acids, like citric and malic acid, mixed with sugars like glucose and fructose [9]. Further, the aroma is developed by around 400 organic compounds; some of these are precursors of fatty acids, aminoacids, and other phenolic compounds that also contribute to flavor [10]. Besides, there is a wide range of colors and shapes depending on the variety, like red, green, yellow-orange, white, pink, striped, bi-color, or black tomatoes [11].

Standard tomato quality is indicated by its nutraceutical and organoleptic properties, such as appearance (color, shape, size and integrity) firmness, texture, and taste [12]. An “attractive color” in this sense means bright and uniform, which implies that the product is free from



oxidation or improper cooling, among other negative factors [13]. On the other hand, the total soluble solids content (TSS) relates to cell composition and structure. Cherry tomato TSS is mainly composed of sugars and constitutes between 4.5-8.5% of the fruit. Determined during the production stage, this parameter is an essential indicator in the tomato industry. TSS is usually measured by the refractometry method, and is expressed as equivalent Brix degrees (or % TSS). Finally, titratable acidity is a flavor-related index influenced by malic and citric acids, which account for around 15% of the dry content of fresh ripe tomatoes [14]. Moreover, organic acids regulate juice pH, which must be below 4.5 to prevent the growth of thermophilic microorganisms in tomatoes [15].

TSS and pH are closely related parameters in establishing the ripeness and postharvest quality of tomatoes. Tomato chemical structure varies along the maturation process, resulting in texture changes, as well as pigmentation, brightness and flavor [16]. In this context, sensory characteristics —mainly color, texture and flavor— are key for acceptability and quality; that is, purchase decision depends greatly on such factors. However, research on new products has found that sensory evaluation of food quality and origin significantly affects the price [17].

Specifically, black cherry tomatoes have recently been released on the market and are rather unknown to consumers and, because of their color, they have an exotic and rare appearance. Said pigmentation and other unique physical attributes are due to a specific mix of antioxidants [11]. These compounds are relevant to agro-industry given their potential for the prevention of non-contagious chronic-degenerative diseases [4], [18], [19].

At the moment of purchase attributes evaluation, a well-lighted counter-top is required. People who apply the evaluation do not have to communicate with each other. Evaluators can measure many samples for purchase attributes because fatigue is usually not the leading factor as it is for consumption attributes. It is important to avoid superimposing the coding of samples for purchase and consumption, nor the results, because the purchase attributes are not solid predictors of consumption attributes [20]. The aim of this study was to measure the plant morphological characteristics, physical-chemical quality parameters, and to predict consumers' organoleptic assessment of kumato, indigo cherry drops and indigo rose cherry tomato varieties; finally, to establish typical quality parameters of black cherry tomato marketing possibilities.

Materials and methods

Plant material and growth conditions

The black cherry tomato varieties selected for the study were kumato, indigo cherry drops, and indigo rose. 50 plants per variety were grown in a 30 m² chapel-type greenhouse. The experiment was conducted during fall-winter 2019 in the Amazcala campus of the Autonomous University of Querétaro, located in El Marqués, Querétaro, Mexico. Seedlings were transplanted to the greenhouse 28 days after sowing (DAS); and flowers started sprouting 60 DAS. In each phenological stage, the nutrient solution was adjusted according to the nutritional requirements of the plant. The temperature registered in-greenhouse ranged from 16 to 32 °C, and the average relative humidity was 65%. The samples consisted of randomly selected tomatoes from the third harvest at 120 DAS.

Morphological characteristics of the plant

Per-variety average morphological characteristics of the plant were recorded upon harvest: plant height (tape-measured from base to tip of the shoot), number of clusters and frequency of disease signs (although this parameter depends on the crop scheme). Plant growth and flowering changes, flower size, fruit shape, and fruit set were obtained from the data sheet and reported in this document for future reference [5], [11], [20].

Physical-chemical quality measurements

The surface appreciation stage required 20 fruits from each variety; the physical test was carried out on the same sample, and the organoleptic stage evaluated 50 fruits from each variety. The black cherry tomatoes weight was reported in [21]. Equatorial and longitudinal diameters were measured with a digital Vernier caliper in millimeters separately [22]. The sample was divided into four replicates, five tomatoes each. The external color determination was carried out under the Munsell system using a colorimeter (Model-CR-10, Konica Minolta, Japan) on a harvest day; hue (H), value (v) and chroma (c) were measured [23].

Afterwards, the cherry tomatoes were liquefied into a homogeneous sample of the fruit for the quality analysis. An aliquot of the mix was placed on the portable refractometer prism (HI 96811; Hanna Instruments, Woonsocket, RI, USA) at room temperature to determine TSS. Results were reported in °Brix [24], [25]. Regarding acidity, a potentiometer was implemented into the puree; findings appear in pH [26]. All varieties total titratable acidities (TA) were determined according to [23] with modifications (TA expressed in milliliters of sodium hydroxide, NaOH). The juice was titrated against a 0.1 N NaOH standard, using phenolphthalein as an indicator [23].

Organoleptic assessment

The surveys were conducted on a sample of 50 tomato-untrained judges (52% women, 48% men). The study was carried out at the Autonomous University of Querétaro (UAQ) in Querétaro, Mexico in February 2020 in a specially designed area. The judges were briefed through the informed consent document that: tomatoes did not contain residues of any agrochemical product, nor were they genetically modified, nor underwent any process that would put human health at risk. Each judge evaluated three similarly sized cherry tomatoes, one from each variety. Judges were unfamiliar with black cherry tomatoes and their taste, so that they were not biased toward any of the varieties [17]. Three different organoleptic characteristics (visual, touch, and taste) were included in the evaluation scheme and were expressed on a scale of 0 to 100. This score evaluates the liking of the judge for each attribute (0 = unacceptable, and 100 = acceptable).

Appearance: judges rated their liking for the combination of brightness, color and visible integrity.

Touch: judges graded their liking for texture and firmness.

Taste: aroma and flavor of the fruit.

Statistical analysis

Statistical comparisons for plant height, number of clusters/plant, weight (g), width (mm), length (mm), hue (H), value (V), chroma (C), TA (°Brix), acidity (pH), aliquot volume (ml), and 0.1 N NaOH solution volume (ml) were performed with a one-way ANOVA. Later, with Tukey's honest significant



difference test using Statgraphics (Statgraphics Technologies, Inc., VA, USA) was applied to compare mean values. Besides, sensory data were analyzed using Statgraphics (Statgraphics Technologies, Inc., VA, USA) via the Kruskal-Wallis test, $p < 0.05$.

Results and discussion

Plant morphological characteristics

No significant difference was found between plant height and number of clusters per plant, nor between growth and flowering rates. Figure 1 shows each tomato variety in the cluster before and after harvest. The views of the clusters correspond to kumato (Figure 1.A), indigo cherry drops (1.B) and indigo rose (1.C) varieties, respectively. Kumato was the tallest plant at 183 cm. Table 1 evidences all the results of the morphological characteristics. For reference, [27] reported a 163.2 cm tall wild cherry tomato plant, a relatively low height attributed to its sylvan condition; on the opposite end, Treatment 1 in [28] registered a taller unspecified variety than the three varieties studied in this work, with 195.75 cm. The results resembled those in [29] for seven lines of wild cherry tomatoes, where the tallest specimen (JCPRV-43) reached 228.1 cm; and the shortest (JCPRV-76), 143.1 cm. The seven heterogeneous results were ascribed to the wild condition of their genomes.

FIGURE 1.

Photos A, B and C correspond to the kumato, indigo cherry drops, and indigo rose clusters, respectively. D shows the scores of each variety tested for surface color and physical measurements; the quick trend by size proportion among tomatoes continued in the following measurement steps.



TABLE 1.

Results of physical-chemical quality measurements in fruit of three varieties of black cherry tomato. Letters in superscript indicate a statistical difference using the Tukey test ($p < 0.05$).

PARAMETERS	INDIGO ROSE	INDIGO CHERRY DROPS	KUMATO
<i>Plant height</i>	1.74 ± 0.26 ^a	1.80 ± 0.14 ^a	1.83 ± 0.13 ^a
<i>Number of clusters/plant</i>	6.90 ± 2.33 ^a	8.00 ± 1.89 ^a	7.00 ± 0.94 ^a
<i>Plant growth rate</i>	Indeterminate	Indeterminate	Indeterminate
<i>Flowering type</i>	Indeterminate	Indeterminate	Indeterminate
<i>Flower size</i>	Small	Small	Small
<i>Fruit shape</i>	Oblong	Spherical	Spherical
<i>Fruit setting type</i>	Chronological	Chronological	Chronological
<i>Disease incidence</i>	Low	Low	Low

Other cultivar varieties share a similar rate, like the one reported by [28] with 8.63, or the one measured by [30] with 11.42. However, this number varies greatly; for instance, [31] achieved 40.8, and [27] reached 77.02 in wild cherry tomatoes, but fruit size was close to half the dimensions reported in this work.

Physical-chemical quality measurements

Kumato topped the results of fruit physical dimensions. For average weight, kumato presented 29.64 g (those found by [22], which reported 74.03 g), followed by 20.3 g for the indigo cherry drops variety and indigo rose at 10.41 g. In parallel, [32] ranked 73.86, 69.24 and 62.09 g in the KM8367, KM8034 and KM1210 kumato cultivar lines, respectively. However, these two reports are unclear on whether they worked with cherry or heirloom varieties. Different research in black cherry tomatoes, or unspecified cherry tomatoes, present weights close to the indigo rose or indigo cherry drop varieties reported in this work. The highest value obtained by [11] in black cherry tomatoes was 9.8 g. Besides, the result in black cherry tomatoes for [33] had 12.84 g in the L-CHNG1 variety. In addition, the result for varieties H13-29 and H13-31 were 9.48 and 9.72 g, respectively. [27] found that wild and cultivar tomato varieties represented 4.55 and 92.98 g, respectively.


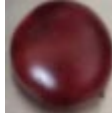

Significant variation was recorded for fruit equatorial diameter (ED) among cherry tomato lines. During this and the other physical test, the toma-



TABLE 2.

Results of physical chemical quality measurements in fruit of three varieties of black cherry tomato. Letters in superscript indicate a statistical difference using the Tukey test ($p < 0.05$).

toes were aligned to facilitate direct comparison (Figure 1.D). Maximum ED was found in kumato with 38.71 mm, and the minimum was found in indigo rose with 23.91 mm (Table 2). The results by [22] for kumato variety were at 45.1 mm. The results by [32] for KM8367, KM8034 and KM1210 cultivar lines of kumato are 73.86, 69.24 and 62.0 mm, respectively. The highest value reported results by [11] in work with unspecified black cherry tomato variety was 9.8 mm. Besides, in a wild cherry tomato variety reported by [27] the ED was 17.05 mm.

PARAMETERS	INDIGO ROSE	INDIGO CHERRY DROPS	KUMATO
Weight (g)	10.41 ± 0.54 ^c	20.30 ± 1.95 ^b	29.64 ± 1.55 ^a
Equatorial diameter (mm)	23.91 ± 0.72 ^c	30.91 ± 0.07 ^b	38.71 ± 0.54 ^a
Longitudinal diameter (mm)	30.34 ± 4.21 ^b	31.15 ± 1.32 ^b	35.31 ± 0.56 ^a
Hue (H)	7.83 ± 0.23 ^a	9.20 ± 0.40 ^a	8.47 ± 0.32 ^a
Value (V)	5.47 ± 0.23 ^a	6.40 ± 0.26 ^a	4.17 ± 0.25 ^b
Chroma (C)	9.27 ± 0.25 ^a	4.73 ± 0.31 ^b	4.07 ± 0.31 ^b
Fruit Photography			
°Brix	3.93 ± 0.36 ^c	7.33 ± 0.24 ^a	6.03 ± 0.63 ^b
pH	5.30 ± 0.08 ^a	4.88 ± 0.10 ^a	5.08 ± 0.10 ^a
Titrateable Acidity (%)	5.23 ± 0.17 ^a	5.18 ± 0.17 ^a	5.03 ± 0.05 ^a
mL NaOH (0.1 N)	2.57 ± 0.12 ^b	6.95 ± 0.29 ^a	4.40 ± 0.14 ^a

Longitudinal Diameter (LD) also showed significant differences. Maximum LD was observed in kumato at 35.31 mm; minimum LD corresponds to indigo rose 30.34 mm (Table 2). The value reported by [22] in Kumato variety is 50.3 mm. In turn, the three cultivar lines of kumato by [32] measured 44.8, 46.2 and 38.1 mm. The highest value obtained by [11] in an unspecified black cherry tomato variety was 41.75 mm. The values reported by [27] for the wild cherry tomato are 15.25 mm. The indigo cherry drops variety tops the total titrateable acidity measured with NaOH but was impossible to compare to other black cherry tomato or unidentified cherry tomato varieties.

Surface color results were different among the three varieties (Table 2); the highest H value appeared in indigo cherry drops, with 9.2 on average. The top results in H value by [9] were for brown cherry and brown beefsteak varieties: 67.47 and 66.1, respectively. In the H13-29, H13-31 and

black cherry tomato varieties, [33] obtained values of 49.87, 49.58 and 47.76, respectively. Results by [10] in black cherry, black cherry primabella and black cherry roterno varieties were 57.13, 78.34 and 68.68, respectively. Referencing *c* values, indigo rose was the variety top measure with 9.27. The *c* value for brown cherry and brown beefsteak varieties by [9] were 22.06 and 21.5, separately. Aside, the values in cherry tomatoes and black cherry tomatoes by [33] for H13-29, H13-31, and L-chNg1 were 36.38, 31.26 and 30.18, respectively. The values obtained by [32] in kumato cultivar lines were KM8367 at 15.82, KM8034 at 19.39, and KM1210 at 18.34. Regarding the *v* value, the indigo cherry drops variety was located on average at 6.4; the values obtained for indigo rose and kumato varieties are in Table 2. The values of the colorimetry of the black cherry tomatoes in the present document were impossible to compare with other cherry tomato varieties of any other color.

The highest TSS measured in this work was the indigo cherry drops variety with 7.33 °Brix; the second and third scores are in Table 2. [34] ranked 5.8 °Brix for the red cherry variety, 5.4 °Brix for yellow cherry, and 4.7 for Kumato. The most significant value in the report by [11] for black cherry tomato was 3.64 °Brix. Furthermore, values by [33] were 7.03 °Brix for the H13-29 variety, 8.14 °Brix for H13-31, and 7.4 °Brix for L-ChNg1. Indigo rose measured by [35] was 4.2 °Brix. Meanwhile, kumato values by [22] were 5.29 °Brix. The value obtained by [10] for black cherry, black cherry primabella, and black cherry roterno varieties was 7.28, 6.9 and 5.65 °Brix, respectively. In the research by [27] on wild cherry tomato and tomato cultivar varieties, the values obtained were 6.59 and 4.95 °Brix, separately. The high TSS results of the black cherry tomatoes relate to the synthesized products in their biochemical pathway [36]. Since tomatoes produce an important amount of phenolic compounds, this is consistent with the values shown in the present investigation.

Table 2 depicts pH values obtained for the three varieties of black cherry tomatoes. Indigo rose stood out with a 5.3 average. The pH value reported by [35] for indigo rose was close to the reported in this work, at 4.1. In [34], the pH measure of the Kumato variety was slightly lower than the ranked in this document, at 4.31, and their measures for yellow cherry and red cherry varieties were even closer, at 4.41 and 4.46, respectively; however, maturity stage of the black cherry tomatoes was undis-



closed. It is important to remember that pH measurement indicates the accumulation of organic compounds synthesized inside the fruits [36].

Regarding titratable acidity, indigo cherry drops led the study with an average of 6.95%. Indigo rose and Kumato results are shown in Table 2. The work by [35] on indigo rose found 0.6%. Values obtained by [34] in red cherry, yellow cherry and Kumato were 1.07, 1.47 and 0.94%, respectively. Kumato result in [22] was only 0.34%. In [9], brown cherry was 0.29% and brown beefsteak was 0.03%. Furthermore, [33] reported values for H13-29, H13-31 and L-chgng1 varieties of 0.52, 0.53 and 0.35%, respectively. [10] measured black cherry at 0.5%, black cherry primabella at 0.49% and black cherry roterno at 0.33%. Concerning the report by [27], wild cherry tomato value was 0.71% and tomato cultivar was 0.55%.

Organoleptic assessment

Table 3 shows the sensory evaluation results after the panel test for the three black cherry tomato cultivars. First, it should be noted that variety color was not determinant of perception (Table 3); consequently, the data were reported only in relation to the studied species. In terms of visual aspect, indigo cherry drops rated the highest, followed by kumato. In contrast, indigo rose reached low values. With regards to touch, indigo cherry drops showed the best performance and, to a lesser extent, indigo rose. Black cherry tomato taste was judged excellent for indigo cherry drops with almost maximum range value.

TABLE 3.

Results of organoleptic testing. Using Kruskal-Wallis ($P < 0.05$). Different superscripts denote statistical difference.

CHARACTERISTICS	INDIGO CHERRY DROPS	INDIGO ROSE	KUMATO
Visual aspect	78.2 ± 5.7 ^a	66.1 ± 5.3 ^a	74.8 ± 5.1 ^a
Touch	82.9 ± 4.1 ^a	69.2 ± 5.3 ^b	72.8 ± 5.3 ^{ab}
Taste	83.2 ± 5.8 ^a	72.8 ± 5.3 ^a	73.1 ± 5.4 ^a

The studied black cherry tomatoes showed similarly high taste ratings. Therefore, although the prevailing gastronomic role of the fruit is to provide chromatic attractiveness to dishes, they can also confer a peculiar taste and improve palatability. The preference for black varieties resulted from the combination of visual aspect, touch and taste. On the

other hand, indigo cherry drops, which excelled in the sensory analysis (Table 3), also did for touch. Finally, kumato touch properties could be a middle-ground, resembling both indigo cherry drops and indigo rose.

Conclusion

Morphological characteristics, physical-chemical quality measurements, and organoleptic assessment of black cherry tomatoes were significantly correlated to the cherry tomato variety. Morphology showed that the three varieties could be managed/produced similarly while maintaining physical-chemical quality. Variations between them came from their genetic characteristics. Moreover, sensory evaluation indicated a preference for indigo cherry drops by the unqualified judges in the three organoleptic characteristics (visual, touch, and taste). Nevertheless, visual aspect and taste did not present significant differences among all three varieties. Further analysis of the shelf-life test could be interesting in order to evaluate expanding the reach of these black cherry tomatoes. These results highlight the importance of the physical-chemical and sensorial evaluations to increase these tomato cherry varieties marketing possibilities; in this case, to develop a commercial product that will satisfy the needs and demands of the consumers and thus promote the black cherry tomatoes consumption.



References

- [1] FAO STAT. (2021). *Data Indicators*. [En línea]. Disponible en: <https://faostat.fao.org/>.
- [2] Y. A. Hajam et.al. (2022, feb. 5). *Oxidative Stress in Human Pathology and Aging: Molecular Mechanisms and Perspectives*. *Cells*, vol. 11, no. 3. DOI: 10.3390/cells11030552
- [3] E. Wojtaszek, U. Oldakowska-Jedynak, M. Kwiatkowska, T. Glogowski, y J. Maly-szko. (2021, feb. 12). *Uremic Toxins, Oxidative Stress, Atherosclerosis in Chronic Kidney Disease, and Kidney Transplantation*. *Oxid. Med. Cell. Longev.*, vol. 2021. DOI: 10.1155/2021/6651367
- [4] P- Chaudhary, A. Sharma, B. Singh, y A. K. Nagpal. (2018, agto.). *Bioactivities of phytochemicals present in tomato*. *J. Food Sci. Technol.*, vol. 55, no. 8, pp. 2833-2849. DOI: 10.1007/s13197-018-3221-z
- [5] Rahul, M. M. Rahman, M. Rakibuzzaman, M. N. Islam, y A. F. Jamal Uddin. (2018, jul.). *Study on growth and yield characteristics of twelve Cherry tomato lines*. *J. Biosci. Agric. Res.*, vol. 77, no. 1, pp. 1403-1409. DOI: 10.18801/jbar.170118.173
- [6] V. Sk, V. Rathod, S. Evoor, y V. Kantharaju. (2021, ene.). *Correlation and path coefficient análisis in Cherry tomato (Solanum lycopersicum var. Cerasiforme)*. Vol. 10, no. 2, pp. 1136-1140.
- [7] K. M. P. Chanthini et.al. (2019, jun. 13). *Sustainable agronomic strategies for enhancing the yield and nutritional quality of wild tomato, solanum lycopersicum (1) Var Cerasiforme Mill*. *Agronomy*, vol. 9, no. 6. DOI: 10.3390/agronomy/9060311
- [8] F. Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. (2019). *Agri-food Outlook*. Panor. Agroaliment.
- [9] A. C. Oluk et.al. (2019). *Biochemical characterisation and sensory evaluation of differently coloured and shaped tomato cultivars*. *Not. Bot. Horti. Agrobot. Cluj-Napoca*, vol. 47, no. 3, pp. 599-607. DOI: 10.15835/nbha47311382.
- [10] L. Kanski, M. Naumann, y E. Pawelzik. (2020, my. 13). *Flavor-Related Quality Attributes of Ripe Tomatoes Are Not Significantly Affected Under Two Common Household Conditions*. *Sec. Tech.*

- Adv. In Plant Sci. Vol. 11. Doi: 10.3389/fpls.2020.00472
- [11] M. R. Hassan, S. N. Julie, S. Rahul, M. M. Rahman, y U. Jamal. (2018, sep.). *Influence of organic leachates on growth and yield of Black Cherry Tomato*. Int. J. business, Soc. Sci. Res., vol. 7, no. 1, pp. 79-77.
- [12] A. Natalini, N. Acciarri, y T. Cardi. (2021, jun. 29). *Breeding for Nutritional and Organoleptic Quality in Vegetable Crops: The Case of Tomato and Cauliflower*. Pp. 1-21. Doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture11070606>
- [13] USDA-AMS. (ene.). *United States Standards for Grades of Dates*. Vol 1984. [En línea]. Disponible en: https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/Date_Standard%5B1%5D.pdf.
- [14] H. Li et al. (2020, dic.). *Development of a novel wavelength selection method VCPA-PLS for robust quantification of soluble solids in tomato by on-line diffuse reflectance NIR*. Spectrochim. Acta – Part A Mol. Biomol. Spectrosc., vol. 243, pp. 118765. Doi: 10.1016/j.saa.2020.118765
- [15] F. de Sio et al. (2020). *Yield and quality performances of organic tomato as affected by genotype and industrial processing in southern Italy*. Itahort, vol. 27, no. 1, pp. 85-99. Doi: 10.26353/j.ita-hort/2020.1.8599.
- [16] Y. Huang, R. Lu, y K. Chen. (2018, may. 08). *Assessment of tomato soluble solids content and pH by spatially-resolved and conventional Vis/NIR spectroscopy*. Foodeng, vol. 236, pp. 19-28. Doi: 10.1016/j.foodeng.2018.05.008
- [17] U. Šebjan, y P. Tominc. (2016, abr. 04). *Young customers' organoleptic assessment of tomatoes with different geographic origins: A preliminary study*. Br. Food J., vol. 118, no. 4, pp. 871-884. Doi: 10.1108/BFJ-07-2015-0259
- [18] B. Salehi et al. (2019, jun.). *Beneficial effects and potential risks of tomato consumption for human health: An overview*. Nut, vol. 62, pp. 201-208. Doi: 10.1016/j.nut.2019.01.012
- [19] F. Blando et al. (2019, agto. 28). *Nutaiceutical Characterization of Anthocyanin-Rich Fruits Produced by 'Sun Blac' Tomato Line*. Front. Nutr., vol. 6. Doi: 10.3389/fnut.2019.00133
- [20] R. L. Shewfelt. (2014). *Measuring Quality and Maturity*. Elsevier Inc. Pp. 387-410.



- [21] J. Uddin, K. Roni, S. Rahman, K. Momena, y M. Nahiyani. (2015, mar.). *Study on Growth and Yield Characteristics of Seven Exotic Study on Growth and Yield Characteristics of Seven*. Vol. 3, no. 2, pp. 125-130.
- [22] H. I. Mun, M. C. Kwon, M. R. Lee, S. Y. Son, D. H. Song, y C. H. Lee. (2021, abr. 08). *Comparing Metabolites and Functional Properties of Various Tomatoes Using Mass Spectrometry-Based Metabolomics Approach*. *Front. Nutr.*, vol. 8, pp. 1-10. Doi: 10.3389/fnut.2021.659646
- [23] R. F. Chavan, y B. K. (2020, may. 02). Sakhale. *Studies on the effect of exogenous application of salicylic acid on post-harvest quality and shelf life of tomato fruit Cv. Abhinav*. *Food Res.*, vol. 4, no. 5, pp. 1444-1450. Doi: 10.26656/fr.2017.4(5).131
- [24] N. (1970). *Norma Oficial Mexicana*. NMX-F-112-1970., pp. 3-6.
- [25] E. G. Tovar Pérez et al. (2020, feb.). *Effect of ultrasound treatment on the quality and contents of polyphenols, lycopene and rutin in tomato fruits*. *Czech J. Food Sci.*, vol. 38, no. 1, pp. 20-27. Doi: 10.17221/189/2019-cjfs
- [26] N. (1978). *Norma Oficial Mexicana*. NMX-F-317-S-1978. Pp. 3-6.
- [27] P. Pradeep Kumar et al. (2019, ene.). *Comparative expression of different characters in cultivated tomato and its wild relatives*. ~ 3410 ~ *J. Pharmacogn. Phytochem.*, vol. 8, no. 3, pp. 3410-3419.
- [28] L. Phonia, V. Bahadur, T. Thomas, y V. M. Prasad. (2022, agto. 04). *Effect of Organic Manures and Inorganic Fertilizers on Growth, Fruit Yield and Quality of Cherry Tomato (Solanum Lycopersicum var. Cerasiforme) c. v. Pusa Cherry Tomato-1 under Naturally Ventilated Poly-house Condition*. *Int. J. Plant Soil Sci.*, vol. 34, no. 22, pp. 299-309. Doi: 10.9734/ijjps/2022/v34i2231380
- [29] P. Juárez López et al. (2012). *Evaluación de características de interés agronómico de siete genotipos nativos de jitomate (Lycopersicon esculentum Mill.) cultivados en hidroponía*. *Rev. Champin-go, Ser. Hortic.*, vol. 18, no. 2, pp. 207-216. Doi: 10.5154/r.rchsh.2011.02.013
- [30] M. Mondol, A. Chamon, y M. Rahman. (2013, mzo.). *Influence of plant residual compost and ash on yield and economic performance*

- of cherry tomato. Bangladesh J. Sci. Ind. Res., vol. 47, no. 4, pp. 387-392. Doi: 10.3329/bjsir.v47i4.14067.
- [31] S. Lone et al. (2021, my.). *Genetic Variability studies in cherry tomato for quality traits in protected conditions*. Ann. Hortic., vol. 14, no. 1, pp. 68-71. Doi: 10.5958/0976-4623.2021.00013.x
- [32] F. Şen, R. E. Okşar, y A. Gül. (2018, jun.). *Changes in fruit quality during storage of different brown tomato varieties grown in greenhouse soilless culture*. Derim, vol. 35, no. 1, pp. 11-18. Doi: 10.16882/derim.2018.306017
- [33] M. T. Martínez Damian, J. E. Rodríguez Pérez, O. Cruz Alvarez, y M. T. B. Colinas León. (2018, agto. 18). *YIELD AND PHYSICOCHEMICAL QUALITY IN EXPERIMENTAL LINES OF Solanum lycopersicum var. cerasiforme CULTIVATED WITH DIFFERENT LEVELS OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY*. Chil. J. Agric. Anim. Sci., vol. 34, no. 2, pp. 152-164. Doi: 10.4067/S0719-38902018005000404
- [34] D. Giosanu, y L. E. Vîjan. (2016). *APPRECIATION OF QUALITY FOR SOME TOMATOES VARIETIES BY USING THE DETERMINATION OF PHYSICAL-CHEMICAL PARAMETERS*. Curr. Trends. Nat. Sci. Curr., vol. 5, no. 10, pp. 38-45.
- [35] T. Petric, C. Kiferle, P. Perata, y S. Gonzali. (2018, oct. 11). *Optimizing shelf life conditions for anthocyanin-rich tomatoes*. PLoS One, vol. 13, no. 10, pp. 1-15. Doi: 10.1371/journal.pone.0205650
- [36] R. Guzmán, J. Hernández, y I. Parola. (). *Properties and advantages of black cherry tomato*. Perspect. La Cienc. Y La Tec., vol. 4, no. 7, pp. 59-76. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.uaq.mx/index.php/perspectivas/article/view/273/283>.



EFECTO DE ALIMENTO BALANCEADO CON INSUMOS ALTERNATIVOS SOBRE EL METABOLISMO AEROBIO DE TILAPIA DEL NILO

EFFECT OF FISH FEED BALANCED WITH ALTERNATIVE INGREDIENTS
ON NILE TILAPIA AEROBIC METABOLISM

Mónica Vanessa Oviedo Olvera
Ana Angélica Feregrino Pérez
María Isabel Nieto Ramírez
Marta Montserrat Tovar Ramírez
Juan Fernando García Trejo*

Universidad Autónoma de Querétaro, México

*fernando.garcia@uaq.mx



Abstract

Aquaculture has opted for the formulation of new feeds with alternative ingredients to fishmeal in order to maintain its accelerated development and sustainability. Among the most relevant inputs are microalgae and black soldier fly larvae due to their macro and micronutrient content. The objective of this work was to analyze the effect of a balanced feed with these inputs on the aerobic metabolism of Nile tilapia. The inclusion of both alternative inputs decreased oxygen consumption and ammonium excretion in fish, which is related to a better usage of protein by the organism. Likewise, both variables are involved in the stress condition, so the change of feeding the tilapia to the experimental diets also decreased this factor. Microalgae and black soldier fly larvae proved to be viable alternative inputs for the development of aquafeeds without affecting the growth and metabolism of the fish.

Keywords: aquaculture, fish nutrition, microalgae, black soldier fly larvae.

Resumen

La acuicultura ha optado por la formulación de nuevos alimentos con ingredientes alternativos a la harina de pescado con el fin de mantener su acelerado desarrollo y sustentabilidad. Entre los insumos más relevantes se encuentran las microalgas y la larva de mosca soldado negra gracias a su contenido de macro y micronutrientes. El objetivo de este trabajo fue analizar el efecto de un alimento balanceado con estos insumos sobre el metabolismo aerobio de la tilapia del Nilo. La inclusión de ambos insumos alternativos disminuyó el consumo de oxígeno y la excreta de amonio en los peces, lo que se relaciona con un mejor aprovechamiento de la proteína por el organismo. Asimismo, ambas variables están involucradas en la condición de estrés, por lo que el cambio de alimentación en las tilapias a las dietas experimentales también disminuyó este factor. Las microalgas y larva de mosca soldado negra resultaron ser insumos alternativos viables para el desarrollo de alimentos acuícolas sin afectar el crecimiento y metabolismo de los peces.

Palabras clave: acuicultura, larva de mosca soldado negra, microalgas, nutrición acuícola.



Introducción

La acuicultura, la técnica de producción de organismos y plantas acuáticas bajo sistemas controlados, ha sido el sector primario productivo con mayor desarrollo en los últimos años, con una tasa de crecimiento del 5.8 % anual [1]. Para mantener su progreso y garantizar su sustentabilidad, uno de los criterios más importantes a trabajar es el desarrollo y optimización de nuevos alimentos [2], debido a que en los alimentos acuícolas la principal fuente de proteína es la harina de pescado. Este recurso se obtiene por medio de la pesca excesiva de especies pelágicas, causando daños a los ecosistemas marinos y arriesgando la sustentabilidad y rentabilidad de la industria alimentaria [3].

Por esta razón, se ha priorizado la búsqueda de nuevos ingredientes que cuenten con sustentabilidad, disponibilidad, valor nutricional y costos de producción asequibles que permitan su inclusión en los alimentos acuícolas. Asimismo, se persigue que los nuevos insumos logren reducir o reemplazar el contenido de harina de pescado, sin dejar de lado el desarrollo y nutrición de organismos acuáticos [4], [5]. Actualmente, las microalgas y la larva de mosca soldado negra han destacado como ingredientes alternativos para la alimentación de peces al cumplir con las características previamente mencionadas.

Diversas aplicaciones nutricionales explotan las microalgas (MA) debido a su contenido de macro y micro nutrientes como vitaminas, minerales, ácidos grasos poliinsaturados y aminoácidos esenciales [6]. Y actualmente existen reportes de MA como reemplazo y suplemento de fuentes pro-

teínicas en dietas para peces con resultados favorables en su desarrollo [7]. Por otro lado, la larva de mosca soldado negra (LMSN), gracias a su contenido de macronutrientes y minerales, ha tenido desempeños satisfactorios como insumo alternativo para especies como el salmón, trucha y tilapia [8]. No obstante, hasta el momento escasea el uso de ambos recursos en conjunto dentro del balance de alimentos acuícolas.

Si bien ya han sido expuestos con efectos benéficos en el crecimiento, utilización de nutrientes, digestibilidad, inmunología y reproducción de diversas especies [7], [9], los aspectos relacionados con el metabolismo de los peces permanecen en gran medida desconocidos. Ahondar en este tema resulta importante debido a su relación con el aprovechamiento de macronutrientes y permite indagar en el aporte y uso de energía proveniente de la alimentación [10].

El objetivo de este trabajo es analizar el efecto de dietas formuladas con larva de mosca soldado negro y microalgas como sustitutos totales de la harina de pescado sobre el metabolismo aerobio de alevines de tilapia del Nilo.

Metodología

Formulación y elaboración de dietas alternativas

Se balancearon seis dietas experimentales de acuerdo a los requerimientos nutricionales de *Oreochromis niloticus* en etapa de alevín. Se probaron tres porcentajes de inclusión de LMSN (5, 10 y 15 %) y dos niveles de contenido de proteína total (45 y 35 %); el contenido de MA se mantuvo en 5 % para todas las dietas. Para la formulación de las dietas se trazó un diseño factorial de tres niveles para la variable LMSN y dos para la variable proteína.

Para la elaboración de los alimentos se solicitó la harina de LMSN (*Hermetia illucens*) a la planta piloto de producción de mosca soldado negro de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, campus Amazcala. Por otra parte, la harina de MA (*Nannochloropsis limnetica*) fue proporcionada por el laboratorio de microalgas UAQ-Finka. Las dietas fueron balanceadas con harinas de origen animal y vegetal para cumplir los requerimientos de la tilapia. Tras la formulación, las harinas



fueron mezcladas, pelletizadas y secadas por 24 horas. En últimas, se proporcionaron molidas a los alevines.

Pruebas de alimentación

Se construyó un circuito de recirculación de agua para llevar a cabo las pruebas de alimentación. El sistema se conformaba de peceras con capacidad de 12 litros y con condiciones controladas de oxígeno (> 5 mg/l), temperatura (28 ± 3 °C) y pH (7-9). En cada pecera se introdujeron 30 tilapias de aproximadamente 1 gramo; las dietas se evaluaron por triplicado, dando un total de 90 organismos por alimento. Asimismo, se proporcionaron durante 45 días, 4 veces al día y ajustó la ración de alimento suministrado al 10 % de la biomasa del alevín.

Biometrías

Durante el tiempo de experimentación se monitoreó, una vez por semana, el crecimiento por medio de la toma de peso húmedo (g), longitud total y longitud patrón (mm) de los organismos utilizando una balanza de laboratorio (Precisa BJ610C) y un vernier electrónico (Mitutoyo Absolute IP67).

Respirometrías

Para el análisis del metabolismo aerobio de los peces se realizaron respirometrías al inicio y al final del experimento. Esta técnica consistió en la selección aleatoria de tres organismos por tipo de alimento; cada uno se introdujo individualmente en una cámara respirométrica semi-cerrada de 1000 cm³ a 28 °C para medir el oxígeno disuelto y la excreta de amonio por 24 horas. El oxígeno se cuantificó cada cuatro horas con un medidor multiparamétrico portátil (modelo H140d, marca Hach). Al mismo tiempo, el nitrógeno amoniacal se determinó por el método espectrofotométrico de Nessler (Método HACH 8038, 2010; adaptado de *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 4500-NH₃ B & C*). El consumo de oxígeno y la excreta de amonio (OCR y AER, por sus siglas en inglés) fueron calculados de acuerdo a la siguiente ecuación a partir de los datos obtenidos (1):

$$\frac{((C_i - C_f) V)}{(DW * T)} \quad (1)$$

Donde, C_i es el consumo inicial de oxígeno o amonio, y C_f el valor de consumo final. $C_i - C_f$ indica la diferencia entre el contenido de oxígeno y amonio en las cámaras respirométricas (mg/l); V representa el volumen de la cámara (l); DW el peso seco del pez (g), y T el tiempo entre toma de muestras (h). La relación O:N, valor vinculado con el tipo de sustrato catabolizado por el pez durante las horas de la respirometría, fue calculada mediante la división del consumo de oxígeno entre la cantidad de amonio excretado.

Resultados y discusión

Dietas experimentales

Dado que el macronutriente de mayor interés para el desarrollo de alimentos es la proteína, se realizó el balance de dietas isoproteicas a 45 y 35 % utilizando harinas alternativas (LMSN y MA) como reemplazo total del pescado. Tales porcentajes se compararon debido a que, si bien se ha reportado que el contenido proteínico en la alimentación de peces en etapa alevín es de 45 %, aún se desconoce si el uso de harinas alternativas afecta el aprovechamiento de tal nutriente. La Tabla 1 muestra el balance de las dietas, incluyendo harinas vegetales y animales, así como la composición química aproximada que se obtuvo de forma teórica al momento de su realización. Las dietas fueron denominadas de acuerdo a su porcentaje de proteína (A45 y B35), seguido del porcentaje de inclusión de LMSN (5, 10 o 15).

TABLA 1.

Balance de dietas experimentales a partir de harinas alternativas para la alimentación de Tilapia del Nilo.

INGREDIENTES (%)	DIETAS BALANCEADAS					
	A45/5	A45/10	A45/15	B35/5	B35/10	B35/15
MA	5	5	5	5	5	5
LMSN	5	10	15	5	10	15
Harina carne	32	27	25.5	20	16	14
Soya	30	30	26.5	20	20	20
Gluten trigo	10	10	10	10	10	10



Salvado trigo	10	10	10	27	26	23
Maíz	5	5	5	10	10	10
Aceite LMSN	3	3	3	3	3	3
Composición química balanceada (%)						
Proteína	45.09	45.89	45.29	35.80	35.36	35.66
Grasas totales	10.83	11.84	13.23	9.88	10.93	12.24
Carbohidratos totales	16.04	16.71	17.06	30.04	30.07	28.81
Humedad	10.65	10.44	10.06	8.63	8.39	8.10
Cenizas	12.46	11.93	12.05	9.84	9.50	8.56

A45/B45 hacen referencia al contenido de proteína total en la dieta y los números 5, 10 y 15 indican el porcentaje de inclusión de LMSN.

Ambas harinas resultaron viables para la formulación de los alimentos experimentales, según [11] y [12] respecto a los porcentajes de inclusión y límites de reemplazo, así como sus efectos en la alimentación y desarrollo de los peces. Por ejemplo, [11] recomienda la inclusión de 5 % de *Nannochloropsis oculata* en la dieta para tilapia del Nilo, para aumentar la ganancia en peso, tasa específica de crecimiento y consumo de alimento. Por otro lado, [12], [13] apuntalan la adición de LMSN como sustitución parcial a la harina de pescado de 3 a 15 % en la dieta de tilapia del Nilo. En conclusión, ambos insumos permitieron el balance de dietas libres de harina de pescado.

Ganancia en peso

Se comparó la biomasa de los especímenes al inicio y al final del estudio en función de su dieta alternativa (Figura 1). Aunque se observó un aumento general en el peso de los organismos, las dietas A presentaron variaciones significativas durante el tiempo de experimentación, concretamente la A45/15. La A45/5 y B35/5 también destacan por su aumento en peso. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por [14], donde se aprovechó la harina de LMSN en la alimentación de bagre africano; dicha especie obtuvo una mayor ganancia en peso; no obstante, la LMSN se utilizó como sustituto parcial a la del pescado (a 11 y 17 %).

FIGURA 1.

Comparación del peso inicial y final de tilapias tras ser alimentadas con dietas alternativas. Las barras indican el error estándar y el asterisco marca las dietas con diferencia significativa (prueba de Fisher LSD: 95 % de confianza).

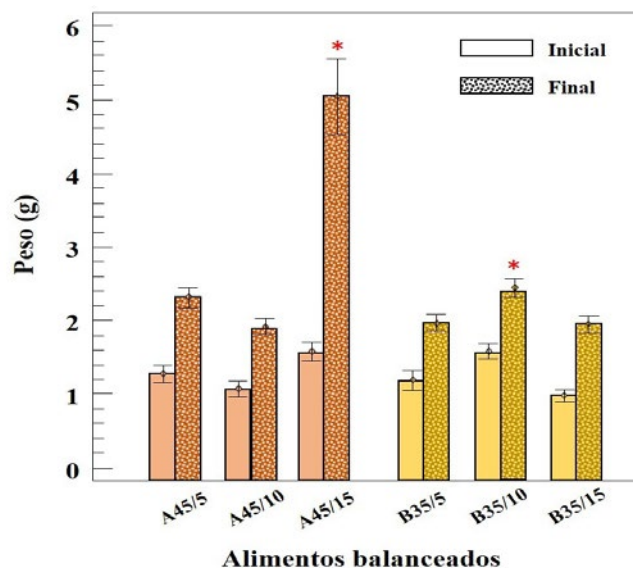


TABLA 2.

Comparación del consumo de oxígeno, excreta de amonio y relación O:N de tilapias al ser alimentadas con dietas alternativas.

Metabolismo aerobio

Respecto al consumo de oxígeno y excreta de amonio, la Tabla 2 muestra la comparación de los valores determinados durante 24 horas para las tilapias alimentadas con las diversas dietas experimentales. Se empleó el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher al 95 % de confianza para precisar las diferencias estadísticas significativas

DIETA	CONSUMO O ² (MG/L/H/G)	EXCRETA NH ³ (MG/L/H/G)	RELACIÓN O:N
A45/5	0.388 ± 0.05 ^a	0.0103 ± 0.002 ^a	25.05 ± 7.08 ^a
A45/10	0.417 ± 0.05 ^a	0.0106 ± 0.001 ^a	41.99 ± 12.50 ^a
A45/15	0.403 ± 0.01 ^a	0.0106 ± 0.002 ^a	30.86 ± 11.21 ^a
B35/5	0.403 ± 0.05 ^a	0.0106 ± 0.003 ^a	30.76 ± 5.42 ^a
B35/10	0.450 ± 0.04 ^a	0.01 ± 0.001 ^a	35.0 ± 11.46 ^a
B35/15	0.357 ± 0.01 ^b	0.0103 ± 0.003 ^a	65.11 ± 57.29 ^a

Los valores se presentan como promedios ± la desviación estándar. Los superíndices distintos indican una diferencia significativa: n=18.

De acuerdo a lo reportado por [15], las tilapias alimentadas a base de harina de pescado presentaron valores superiores a 1 mg/l en el consumo de oxígeno y entre 0.1 y 0.15 mg/l para la excreta de N amoniacal. Se puede observar que las dietas experimentales mostraron valores



acordes con el consumo de oxígeno y la excreta de amonio, indicando una menor condición de estrés al tener una alimentación libre de harina de pescado.

La relación O:N es un indicador del estrés y el metabolismo energético de los peces, ya que permite determinar qué componente utiliza el pez para obtener energía [16]. Cuando los valores de O:N se encuentran entre 3 y 16 se trata del catabolismo de proteínas; entre 17 y 50 se refieren a la oxidación de la mezcla de lípidos y proteínas; entre 50 y 60 relacionan con el catabolismo de proteínas-lípidos equivalentes, y aquellos superiores a 60, indican la oxidación de carbohidratos [10]. Los valores obtenidos sugieren que las dietas alternativas son catabolizadas por oxidación de lípidos/proteínas. Se comprende que, para los peces, es preferible un enfoque bioenergético debido a la oxidación de lípidos y proteínas, pues son los metabolitos que proporcionan mayor energía al organismo (39.5 kJ y 23.6k J, respectivamente) [10]. Por otra parte, la dieta A45/15, presentó un mayor crecimiento en comparación con las otras dietas alternativas, logrando una menor excreta de amonio; un nivel bajo de este parámetro se relaciona con el aprovechamiento de la proteína para la ganancia de biomasa. Al final, estos resultados concuerdan con lo reportado por [17].

Conclusiones

Las harinas de LMSN y MA resultaron ser dos alternativas potenciales para el reemplazo total de la harina de pescado en la formulación de alimentos acuícolas. El diseño experimental desarrollado en este trabajo comprueba que es posible añadirlas a la dieta de tilapia hasta en un 15 % y 5 % sin afectar el crecimiento del pez. Asimismo, las dietas alternativas promovieron la generación de energía a través de la oxidación de lípidos/proteínas; tal proceso aporta un mayor aprovechamiento calórico y una reducción de estrés en los organismos a partir del análisis del metabolismo aerobio de la tilapia del Nilo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro por facilitar sus instalaciones para la realización de la presente investigación. Asimismo, extienden su avenencia al Conacyt por el apoyo económico proporcionado a la estudiante de posgrado Mónica Vanessa Oviedo Olvera.



Referencias

- [1] FAO, The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. 2020.
- [2] K. Hua et al., "The Future of Aquatic Protein: Implications for Protein Sources in Aquaculture Diets", *One Earth*, vol. 1, no. 3, pp. 316-329, 2019. DOI: 10.1016/j.oneear.2019.10.018
- [3] L. Gasco et al., "Feeds for the Aquaculture Sector", *Springer International Publishing*, Nueva York, NY, EUA, 2018.
- [4] R. Magalhães, A. Sánchez-López, R. S. Leal, S. Martínez-Llorens, A. Oliiva-Teles, y H. Peres, "Black soldier fly (*Hermetia illucens*) pre-pupae meal as a fish meal replacement in diets for European seabass (*Dicentrarchus labrax*)", *Aquaculture*, vol. 476, pp. 79-85, 2017. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2017.04.021
- [5] C. Nasopoulou y I. Zabetakis, "Benefits of fish oil replacement by plant originated oils in compounded fish feeds. A review", *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 47, no. 2, pp. 217-224, 2012. DOI: 10.1016/j.lwt.2012.01.018.
- [6] R. Sathasivam, R. Radhakrishnan, A. Hashem, y E. F. Abd Allah, "Microalgae metabolites: A rich source for food and medicine", *Saudi Journal Biological Sciences*, vol. 26, no. 4, pp. 709-722, 2019. DOI: 10.1016/j.sjbs.2017.11.003
- [7] M. R. Shah et al., "Microalgae in aquafeeds for a sustainable aquaculture industry", *Journal of Applied Phycology*, vol. 30, no. 1, pp. 197-213, 2018. DOI: 10.1007/s10811-017-1234-z
- [8] M. Henry, L. Gasco, G. Piccolo y E. Fountoulaki, "Review on the use of insects in the diet of farmed fish: Past and future", *Animal Feed Science Technology*, vol. 203, no. 1, pp. 1-22, 2015. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2015.03.001.
- [9] K. Hua, "A meta-analysis of the effects of replacing fish meals with insect meals on growth performance of fish", *Aquaculture*, vol. 530, no. 2020, 2021. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2020.735732.
- [10] P. Mayzaud y R. Conover, "O:N atomic ratio as a tool to describe zooplankton metabolism", *Marine Ecology Progress Series*, vol. 45, pp. 289-302, Jun.1988. DOI: 10.3354/meps045289
- [11] M. F. Abdelghany, H. B. El-Sawy, S. A. A. Abd El-Ha-

- meed, M. K. Khames, H. M. R. Abdel-Latif y M. A. E. Naiel, "Effects of dietary *Nannochloropsis oculata* on growth performance, serum biochemical parameters, immune responses, and resistance against *Aeromonas veronii* challenge in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)", *Fish Shellfish Immunology*, vol. 107, pp. 277-288, 2020. Doi: 10.1016/j.fsi.2020.10.015
- [12] H. Muin, N. M. Taufek, M. S. Kamarudin y S. A. Razak, "Growth performance, feed utilization and body composition of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) fed with different levels of black soldier fly, *Hermetia illucens* (Linnaeus, 1758) maggot meal diet", *Iranian Journal Fisheries Sciences*, vol. 16, no. 2, pp. 567-577, Jan. 2017.
- [13] K. Hua, "A meta-analysis of the effects of replacing fish meals with insect meals on growth performance of fish", *Aquaculture*, vol. 530, 2021. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2020.735732
- [14] F. J. Fawole, A. A. Adeoye, L. O. Tihamiyu, K. I. Ajala, S. O. Obadara y I. O. Ganiyu, "Substituting fishmeal with *Hermetia illucens* in the diets of African catfish (*Clarias gariepinus*): Effects on growth, nutrient utilization, haemato-physiological response, and oxidative stress biomarker", *Aquaculture*, vol. 518, 2020. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2019.734849
- [15] S. López-Tejeda, J.F. García-Trejo, L. Félix-Cuenca, J.J. De León-Ramírez, M. Villegas-Villegas and L.B. Flores-Tejeda, "Nitrogen excretion and oxygen consumption on hyper intensive tilapia *Oreochromis niloticus* culture using three different commercial diets", *Latin American Journal Aquatic Research*, vol. 48, no. 5, pp. 11, 2020.
- [16] Z. Zheng, C. Jin, M. Li, P. Bai y S. Dong, "Effects of temperature and salinity on oxygen consumption and ammonia excretion of juvenile miiuy croaker, *Miichthys miiuy* (Basilewsky)", *Aquaculture International*, vol. 16, no. 6, pp. 581-589, 2008. Doi: 10.1007/s10499-008-9169-7
- [17] M. W. Feeley, D. D. Benetti, y J. S. Ault, "Elevated oxygen uptake and high rates of nitrogen excretion in early life stages of the cobia *Rachycentron canadum* (L.), a fast-growing subtropical fish", *Journal of Fish Biology*, vol.71, no. 6, pp. 1662-1678, 2007. Doi: 10.1111/j.1095-8649.2007.01645.x





PRETRATAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS PARA LA ALIMENTACIÓN DE LA MOSCA SOLDADO NEGRA (*HERMETIA LLUCENS*): UNA REVISIÓN

PRETREATMENT OF ORGANIC WASTE FOR BLACK SOLDIER FLY REARING: A REVIEW

Quilaztli Carolina Escobar Montoya
Saúl López Juárez
Benito Parra Pacheco
Humberto Aguirre Becerra
Juan Fernando García Trejo*

Universidad Autónoma de Querétaro, México

*fernando.garcia@uaq.mx



Resumen

La mosca soldado negra ha adquirido un papel importante en el aprovechamiento de residuos orgánicos debido a su capacidad de transformarlos en biomasa rica en proteína y lípidos. Esta es utilizada en alimentación animal y en la producción de biocombustibles. Sin embargo, la biomasa obtenida a partir de la larva presenta una gran variabilidad en cuanto a los atributos productivos (supervivencia, peso de la larva, eficiencia de conversión) y composición nutrimental, todo esto derivado de la variación en la composición nutricional y fisicoquímica del residuo orgánico. Como solución, se han propuesto estrategias de pretratamientos físicos, biológicos y químicos, que permiten homogenizar el residuo y mejorar la medida en que la larva lo aprovecha. En este trabajo se presenta el estado actual de la investigación sobre los pretratamientos de residuos orgánicos para la alimentación de la larva de mosca soldado negra, incluyendo los métodos utilizados y los efectos en distintas variables productivas de la larva. Esta revisión se realizó mediante una búsqueda exhaustiva en bases de datos electrónicas, seleccionando aquellos estudios relevantes al tema. Los resultados indican que el pretratamiento de los residuos permite que la larva pueda aprovecharlos, provocando mayor peso en la etapa larvaria, supervivencia y eficiencia de conversión. Sin embargo, falta por indagar productivos a mayor escala, considerando la viabilidad económica.

Palabras clave: eficiencia de conversión, fermentación, larva de mosca soldado negra, preprocesamiento, tamaño de partícula.

The black soldier fly has acquired an important role in organic waste valorization due to its ability to transform them into biomass rich in protein and lipids. This biomass is used in animal feed and in the production of biofuels. However, the biomass obtained from the larvae presents a great variability in terms of productive variables (e.g., survival, larval weight, conversion efficiency) and nutritional composition, all derived from the variation in the nutritional and physicochemical composition of the organic waste. As a solution to this variability, physical, biological, and chemical pre-treatment strategies have been proposed to homogenize the waste and improve its use by the larva. This paper presents the current state of research on pre-treatments of organic waste for black soldier fly lar-



Abstract

va feeding, including the methods used and the effects on different larval productive variables. This review was conducted through an exhaustive search in electronic databases, selecting relevant studies on the topic. The results obtained indicate that pre-treatment of the waste can improve its use by the larva, causing higher weights in the larval stage, survival, and conversion efficiency. However, there is a lack of research on the application of different pre-treatments that are applicable in larger-scale production processes, considering the economic viability.

Keywords: bioconversion efficiency, fermentation, black soldier fly larvae, preprocessing, particle size.

Introducción

Se estima a nivel mundial la pérdida del 13.3 % de la producción alimenticia en las etapas de poscosecha, transporte, almacenamiento, procesamiento y comercio mayorista [1]; mientras que en hogares, servicios de comida y venta minorista se desperdicia el 17 % [2]. A estas estimaciones falta cuantificar y añadir las mermas de cada proceso en las etapas de cultivo y cosecha [3]. Este desperdicio tiene una repercusión ambiental negativa debido al desgaste de los recursos invertidos para la producción; además, la disposición final de los residuos genera contaminación de suelo, agua, aire, y contribuye al 8-10 % de las emisiones de gases de efecto invernadero globales [2].

La actual crisis climática demanda estrategias para mitigar el impacto de los residuos orgánicos en el medio ambiente: planes de manejo y disposición hacia la revalorización como insumos para la generación de bioenergía, extracción de compuestos bioactivos, compostaje y bio-transformación con insectos [4]. Dentro de esta última, ha destacado la especie *Hermetia illucens*, mejor conocida como mosca soldado negra (MSN). La MSN es un díptero de la familia *Stratiomyidae*, nativo de América, con una distribución mundial en zonas tropicales y templadas. Es un insecto detritívoro que durante su fase larvaria se alimenta para acumular reservas de proteína y grasa necesarias para la reproducción [5].

Las larvas son capaces de consumir una gran variedad de desperdicios orgánicos, como excremento, restos animales, desechos de comida, lixiviados y residuos agroindustriales. La biomasa larvaria resultante es rica en proteína y grasa, útil para la alimentación animal y producción de biodiesel (Figura 1). Además, el *frass* (excretas, partes anatómicas y cutículas de insecto, alimento sin digerir) es utilizable como fertilizante [6]. Aquí cabe mencionar que el tratamiento de los residuos utilizando la MSN disminuye la presencia de mosca doméstica en las poblaciones y, por lo tanto, reduce la cantidad de microorganismos patógenos como *Salmonella* y *Escherichia coli* [7].

En este trabajo se presenta el estado actual de la investigación sobre los pretratamientos de residuos orgánicos para la alimentación de la larva de mosca soldado negra, incluyendo los métodos utilizados y los efectos en distintas variables productivas de la larva.

La heterogeneidad de los residuos orgánicos supone un problema en el aprovechamiento mediante MSN. Según su naturaleza y procesamiento previo, los despojos presentan distintos tamaños, texturas, contenido de humedad, composición nutricional y disponibilidad de nutrientes [8]. Por ejemplo, los vegetales y frutas tienen contenidos de hasta 90 % de humedad, y se componen principalmente de carbohidratos, con bajos porcentajes de proteína. Además, algunos residuos agroindustriales como cáscaras, tallos y bagazos se integran sobre todo por celulosa, hemicelulosa y lignina; mientras que los cárnicos y acuícolas tienen mayor porcentaje de proteína y grasa [9]. Esta pluralidad compromete la capacidad de la larva para alimentarse, crecer, desarrollarse, sobrevivir, y a su vez perjudica las variables productivas como la eficiencia de conversión (EC) y la reducción del sustrato (RS) [10]. Por lo tanto, es necesario procesar los residuos antes de alimentar a las larvas, para obtener características homogéneas que mejoren los rendimientos de biotransformación [11]. El objetivo de este artículo es presentar la descripción de los métodos de pretratamiento físico, químico y biológico de diferentes residuos orgánicos utilizados para la alimentación de la larva de MSN y su efecto en las variables productivas.

FIGURA 1.

Proceso de biotransformación de residuos orgánicos mediante larva de mosca soldado negra.





Metodología

Para la investigación se emplearon los buscadores Google Scholar, Springer Link y Science Direct. En la búsqueda se utilizaron palabras clave como: "Hermetia illucens", "black soldier fly", "pretreatment", "preprocessing", "fermentation", "particle size", "co-conversion", "moisture" y sus combinaciones. A partir de los resultados fueron seleccionados los trabajos enfocados en la modificación de los residuos a través de un pretratamiento químico, físico o biológico, y su efecto en la biotransformación mediante la larva de *MSN*, en variables productivas como supervivencia, peso larvario, tasas de crecimiento, eficiencia de conversión y reducción de sustrato.

Resultados y discusión

Pretratamiento físico

Este método tiene como propósito disminuir el contenido de agua y el tamaño de partícula. La modificación de este último facilita la alimentación de la larva, favoreciendo su acceso a todo el sustrato ya que aumenta la superficie de contacto y disminuye el gasto energético [12]. Además, un área de superficie mayor propicia el crecimiento de microorganismos que ayudan a la degradación de la materia orgánica [13]. La saturación del sustrato está relacionada con la estructura y aireación; a humedades mayores de 80 %, este corre el riesgo de perder su estructura, dificultando el movimiento y respiración de las larvas [14]. Por consiguiente, [11], [15] es recomendable el uso de trituradoras y molinos de martillos para mejorar la biotransformación mediante la larva; a su vez, [13] aconsejan la filtración con bolsas de tela, drenado por gravedad en contenedores perforados y la combinación de residuos con diferentes porcentajes de agua. A nivel experimental, se ha reportado el uso de molinos [9], [16], [17], cuchillos [9], [18] y procesadores de alimentos [9]. Sin embargo, pocos artículos exploran el efecto del pretratamiento en variables productivas de la larva (Tabla 1).

TABLA 1.

Pretratamiento físico
de residuos orgánicos
para alimentación de
larva de MSN.

RESIDUO	PRETRATAMIENTO	RESULTADO	REFERENCIA
Desperdicios de cocina	Comparación de distintos tamaños de partícula (residuo < 30 mm ³ , residuo molido < 5 mm ³ y control sin tratamiento), con distintas alturas de sustrato (5, 10, 15 y 20 cm).	<p>Las larvas acceden a una mayor profundidad del sustrato cuando está molido.</p> <p>Tienen mayor ganancia de peso con el residuo molido y una altura de sustrato de 10 cm.</p> <p>En sustratos con altura de 10, 15 y 20 cm, las larvas tienen mayor supervivencia en el residuo molido. En la altura de 5 cm no hay diferencia en la supervivencia entre los 3 tamaños de partícula.</p> <p>RS sin diferencias entre tamaños de partícula en tratamiento de 5 cm de altura. En 10 cm de altura, el residuo de < 30 mm³ tuvo la menor RS, los otros tamaños de partícula presentaron una RS similar. RS en 15 y 20 cm de altura no tuvo diferencia significativa entre tamaños de partícula.</p>	[19]
Cáscaras de almendra con urea	Comparación de dos tamaños de partícula: residuo molido en molino de martillos y cribado de 6.35 mm, y residuo molido con molino de mano y cribado de 4 mm. Humedad: 68.5 %	<p>Las larvas del tratamiento de tamaño de partícula de 6.35 mm tuvieron 4 más calcio, 10.5 más metionina y 7.4 % más cisteína.</p> <p>Las larvas del tratamiento de 6.35 mm tuvieron mayor peso y porcentaje de biotransformación del residuo.</p>	[20]
	Comparación de 7 porcentajes de humedad: 48, 55, 57, 59, 62, 66 y 68%.	<p>El peso seco de las larvas aumenta en humedades mayores de sustrato.</p> <p>El porcentaje de biotransformación es mayor conforme aumenta la humedad.</p>	[21]
Residuos de cocina (recortes de vegetales, restos de café, hojas de té)	Comparación de tres niveles de humedad: 70 %, 75 % y 80 %.	<p>El peso de las prepupas no presentó una gran variación entre tratamientos.</p> <p>Tasa de crecimiento larvario mayor en humedad de 80 %.</p> <p>Al cosechar (separar las larvas del residuo), se obtuvo una eficiencia de tamizaje (porcentaje del residuo que pasa el tamiz) de 86 % con humedad del 70, y de 86 con humedad de 75 %. El residuo con humedad de 80 % no se pudo tamizar.</p> <p>No hubo diferencias en la supervivencia.</p>	[22]
		<p>No hubo diferencias significativas entre el peso de las prepupas de todos los tratamientos.</p> <p>El peso máximo de las larvas fue mayor en tratamientos de 80 y 70 % de humedad. La tasa de crecimiento fue mayor en 80 % de humedad.</p> <p>Al cosechar se obtuvo una eficiencia de tamizaje de 93 con humedad del 70, y de 97 con humedad de 75 %. El residuo de humedad de 80 % no se pudo tamizar.</p> <p>No hubo diferencias en la supervivencia.</p>	
Residuos de centros de reciclaje (sobrantes de escuelas, hoteles y hospitales)	Reducción de la humedad con prensa de tornillo y adición de agua hasta porcentaje de cada tratamiento.	<p>No hubo diferencias significativas entre el peso de las prepupas de todos los tratamientos.</p> <p>El peso máximo de las larvas fue mayor en tratamientos de 80 y 70 % de humedad. La tasa de crecimiento fue mayor en 80 % de humedad.</p> <p>Al cosechar se obtuvo una eficiencia de tamizaje de 93 con humedad del 70, y de 97 con humedad de 75 %. El residuo de humedad de 80 % no se pudo tamizar.</p> <p>No hubo diferencias en la supervivencia.</p>	



Residuos de comida domiciliar	<p>Comparación de 6 porcentajes de humedad.</p> <p>Tratamientos con ventilación pasiva: 76, 84, y 88 % de humedad. Se llevaron a cabo en un cuarto abierto.</p> <p>Tratamientos con ventilación activa: 90 %, 95 % y 97.5 % de humedad. Se llevaron a cabo en una cámara de reactor (3.2 m³), con 4 ventiladores con capacidad de 107 m³h⁻¹ cada uno, y 2 extractores con capacidad de 187 m³h⁻¹ cada uno.</p>	<p>La supervivencia de las larvas reduce conforme aumenta la cantidad de humedad del sustrato (supervivencia de 97.2, 94.3, 91.2, 78.9, 56.6 y 19.3 %, para contenidos de humedad de 76, 84, 88, 90, 95 y 97.5 % respectivamente).</p> <p>Se observó que el peso de las larvas disminuye a mayor humedad (peso de 373, 342, 305, 104, 130, y 236 mg, en contenidos de humedad de 76, 84, 88, 90, 95 y 97.5 % respectivamente).</p>	[14]
Recortes de vegetales	Comparación de tres porcentajes de humedad: 60, 70 y 80 %	<p>El peso de las prepupas aumenta a mayor humedad, se obtuvieron pesos de 412, 455 y 480 mg para tratamientos de 60, 70 y 80 % respectivamente.</p> <p>Tasa de crecimiento mayor con humedad de 80 %.</p> <p>Tasa de supervivencia no es afectada por la humedad del sustrato.</p>	[23]
Sobras de comida de restaurante	Reducción de la humedad usando prensa de tornillo manual, y adición de agua hasta porcentaje de cada tratamiento.	<p>El peso de las prepupas aumenta a mayor humedad, se obtuvieron pesos de 480, 472 y 451 mg para tratamientos de 80, 70 y 60 % respectivamente.</p> <p>Tasa de crecimiento mayor con humedad de 80 %.</p> <p>Tasa de supervivencia no es afectada por la humedad del sustrato.</p>	
Manzana	<p>Comparación de dos porcentajes de humedad (70 % y la humedad natural de los sustratos: 81.2 % para manzana, 88.9 % para col roja, 83.5 % para cebolla morada, 86.47 % para calabaza, 49.5 % para orujo de uva y 92 % para espinaca) y tres temperaturas (20, 25 y 30°C).</p> <p>Se deshidrataron los sustratos hasta 70 % de humedad, excepto el orujo de uva, al que se le añadió agua.</p>	Los mejores tratamientos para cada residuo fueron:	[24]
Col morada		<p>Manzana: 25°C, 70 %. Peso de larva: 0.76 g, supervivencia: 87.2 %, EC: 6.2 %</p> <p>Col morada: 25°C, 88.9 %. Peso: 0.137 g, supervivencia: 93.6 %.</p>	
Cebolla morada		<p>30°C, 88.9 %. Peso: 0.129 g, supervivencia: 96.4 %.</p> <p>25°C, 70 %. EC: 21.8 %</p>	
Calabaza		<p>Cebolla: 25°C, 70 %. Peso: 0.131 g, supervivencia: 93.4 %, EC: 24 %</p> <p>Calabaza: 25°C, 70 %. Peso: 0.121 g, supervivencia 97.6 %, EC 25 %</p>	
Orujo de uva		<p>25°C, 86.47 %, EC 25 %</p> <p>Orujo: 25°C, 70 %. Peso: 0.025 g, supervivencia: 87.2 %, EC: 4.1 %</p>	
Espinaca		<p>Espinaca: 25°C, 92 %. Peso: 0.1 g, supervivencia: 51.6 %, EC: 4.6 %</p>	

Se ha reportado que a mayor humedad del sustrato la tasa de crecimiento de las larvas aumenta, en humedades menores a 80 % [22], [23], [24]. En humedades mayores a 80 % se ha observado menor supervivencia y peso de las larvas [14]. En contraste, se ha reportado que, usando una dieta artificial basada en celulosa, con humedad de 40 %, no hay desarrollo larvario; y una humedad de 55 % disminuye el crecimiento de las larvas comparado con un 70 % [25]. A partir de esta diferencia se observa un

rango de humedad donde las larvas presentan mejor progreso, aproximadamente 60-80 %. Dentro de este margen, se ha reportado que a mayor humedad el peso final de las larvas y prepupas aumenta para algunos residuos orgánicos como sobras de alimentos [22], [23] y recortes de vegetales [23].

El efecto del tamaño de partícula en las variables productivas de la larva de MSN todavía es desconocido, pues se restringe a dos tipos de residuos, cáscaras de almendra [20] y desperdicios de cocina, de los cuales no se reportó su caracterización [19]. Según [19], para los desperdicios de comida el tamaño de partícula menor ($< 5 \text{ mm}^3$) fue el que logró mayor peso de larva, mientras para las cáscaras de almendra se logró mejor desempeño y biotransformación con el tamaño de partícula mayor (6.35 mm) [20].

Pretratamiento biológico

El pretratamiento biológico incluye la introducción de microorganismos y enzimas para llevar a cabo una predigestión de los residuos, o una conversión simultánea con las larvas. Aunque más lento y difícil de controlar, este tipo de procesamiento suele resultar más económico y requiere menor energía [26]. Los microorganismos ayudan a aumentar la disponibilidad de nutrientes a través de la hidrólisis de fibras variando el rendimiento de acuerdo con el número y diversidad microbiana; igualmente, producen sustancias como ácidos orgánicos, que son útiles para el metabolismo de la MSN [10]. Asimismo, la simbiosis entre microorganismos e insectos es primordial para que se adapten a diferentes ambientes y fuentes de alimento [27].

Dentro de los pretratamientos biológicos se reporta la eficacia de consorcios bacterianos, algunas especies de bacterias, hongos, y enzimas, así como distintos tiempos de fermentación. Entre las respuestas evaluadas se encuentran la eficiencia de conversión, reducción de sustrato, peso de la larva, tiempo de desarrollo, acumulación de lípidos y proteínas (Tabla 2).



TABLA 2.

Pretratamiento biológico de residuos orgánicos para alimentación de larva de MSN.

RESIDUO	PRETRATAMIENTO	RESULTADO	REFERENCIA
Residuo de cuajada de soya	Tratamiento de <i>Lactobacillus buchneri</i> en el residuo de manera simultánea con las larvas. Tratamiento de residuo solo, y control de dieta artificial no especificada.	RS, tasa de bioconversión y contenido de proteína mayor en tratamiento (55.7 %, 6.9 % y 55.4 %) en comparación con el residuo sin pretratar (49 %, 5 %, 52.8 %).	[27]
Excremento de aves de corral	Aplicación de tres cepas de <i>Bacillus subtilis</i> (S15, S16, S19), y la cepa D1 de <i>B. natto</i> , de manera simultánea con las larvas, y un control sin bacterias.	El peso de las prepupas varió entre los tratamientos. La adición de microorganismos puede incrementar hasta un 22 % la ganancia de peso de MSN. El tiempo de desarrollo cambió entre los tratamientos.	[28]
Residuos de restaurante y paja de arroz	Adición de Rid-X, una formulación de microorganismos y enzimas, en dosis de 0.05-0.5 % en peso, de manera simultánea con las larvas.	La aplicación de Rid-X aumenta la acumulación de lípidos en las larvas. 0.35 % de Rid-X aumenta la tasa de conversión de celulosa (65.5 %) y hemicelulosa (56.3 %), en comparación con el residuo sin tratamiento (27.9 % celulosa y 32.6 % hemicelulosa).	[29]
Endospermo de coco	Fermentación espontánea durante 2, 4, 6 y 8 semanas.	Mayor disponibilidad de nutrientes en residuo fermentado 4 semanas. El tratamiento de 6 semanas generó larvas con mayor proteína.	[30]
	Fermentación del residuo con Rid-X en concentraciones de 0.02 %, 0.1 %, 0.5 % y 2.5 % en peso seco, por 7, 14, 21 y 28 días.	Mayor ganancia de peso y tasa de crecimiento de las larvas en residuo fermentado por 14-21 días con una concentración 0.5 % de Rid-X.	[31]
Cáscaras de plátano	Tratamiento biológico de microorganismos aislados del intestino de la larva, <i>Trichoderma reesei</i> , y <i>Rhizopus oligosporus</i> . Fermentado por 7, 14, y 21 días. Tratamiento de calentamiento a 120 °C por una hora. Combinación de tratamiento químico (solución de amoníaco al 24.5 %, en cantidades de 0.8 y 1 % del peso del residuo, por 7 días, y 0.8 % por 14 días), seguido de tratamiento biológico. Combinación de tratamiento de calentamiento seguido de tratamiento biológico.	Los carbohidratos solubles, fibra cruda y lípidos totales no variaron entre los tratamientos. Mayor peso de larvas (> 190 mg) en el tratamiento combinado de microorganismos y amoníaco. Mayor peso de larvas en fermentaciones con microorganismos (> 150 mg), en comparación con el grupo control sin pretratamiento (134 mg). Se considera que el tiempo óptimo de pretratamiento con microorganismos fue de 14 días.	[32]
Paja de maíz	Se inoculó <i>Aspergillus oryzae</i> en la paja de maíz en una proporción 1:4000, y se dejó fermentar por 24 horas.	La paja pretratada disminuyó el tiempo de vida de los adultos y la fecundidad. La RS es menor en paja fermentada (48.41 %), contra control de salvado de trigo (55.01 %). Peso de larva menor en paja fermentada (5.29 mg), en comparación con el control (7.82 mg).	[33]

Residuos de comedor (mezcla de sobras de alimentos, alimentos no vendidos y residuos de preparación)	Aplicación de bacterias formadoras de esporas aisladas del intestino de larvas de MSN. Tratamientos: fermentación por 7 días y a posteriori se incluyen larvas; larvas y bacterias se añaden a la par, finalmente se añaden larvas.	Alta variación entre réplicas. No hubo diferencias en RS y EC entre tratamientos.	[34]
Cáscaras de naranja	Comparación de tratamiento de solución de <i>Trichoderma reesei</i> con densidad 10-7 g/ml, por 16 días para cáscaras de naranja, y 14 días para brócoli y coliflor, contra control sin tratamiento.	EC menor en el tratamiento que en el control. RS mayor en el tratamiento. Supervivencia sin diferencias. Peso de larvas de 0.05 g en el control, 0.018 g con <i>T. reesei</i>	[35]
Recortes de brócoli y coliflor		Contenido de sólidos volátiles del residuo disminuyó después del tratamiento, de 87.4 % a 70.8 %. EC del tratamiento sin diferencia con el control. RS más alta en el tratamiento. Supervivencia menor en el tratamiento (28.1 %), comparado con el control (62.8 %). Peso de larvas de 100 mg en el control, 60 mg con <i>T. reesei</i> .	
Torta de palmiste	Aplicación de celulasa al residuo.	Residuo pretratado mostró concentración de glucosa 8.8 veces más alta que sin pretratar. Máximo crecimiento de larvas en pretratamiento de celulasa al 1 % por 72 horas. Larvas alimentadas con residuo tratado 2.4 veces más pesadas en comparación con residuo sin tratamiento.	[36]
Lechuga y col	Se añadió un coctel de enzimas (SAE0020 Sigma-Aldrich), con celulasas, β -glucosidasas y hemicelulosas en concentración de 1 % en peso del residuo, por 0, 2 y 4 días.	EC 22 % más alta al añadir enzimas simultáneamente con las larvas, comparado con el control sin enzimas. RS 14 % más alta al añadir enzimas al mismo tiempo que las larvas, comparada con el control y tiempos de pretratamiento más largos.	[37]
Digestato de frutas, verduras, residuos de jardín, lodo de procesamiento de lácteos y tratamiento de aguas	Se añadió el complejo enzimático Accellerase® DUET, 48 horas antes de alimentar a la larva.	Larvas alimentadas con el digestato pretratado crecieron el doble que larvas en el digestato sin tratar. EC del digestato pretratado más baja que el control con dieta Gainesville.	[38]

La aplicación de pretratamientos biológicos en diferentes residuos ha demostrado un aumento en la ganancia de peso de las larvas, la reducción del sustrato y la eficiencia de conversión. Sin embargo, en ciertos residuos se ha reportado un efecto negativo: en paja de maíz inoculada con *Aspergillus oryzae* la RS y el peso de las larvas se redujeron [33]; en brócoli y coliflor pretratados con *Trichoderma reesei*, el peso de las larvas disminuyó [35]. También se han reportado tiempos de pretratamiento óptimos distintos: 14 días para cáscaras de plátano inoculadas con



microorganismos aislados del intestino de la larva, *Trichoderma reesei* y *Rhizopus oligosporus* [32]; para endospermo de coco, la fermentación espontánea por 4 semanas resultó en mayor disponibilidad de nutrientes del residuo, pero la fermentación por 6 semanas derivó en larvas con más proteína [30]. Para pretratamientos con complejos enzimáticos, [37] señala que en residuos de lechuga y col, la adición simultánea de las enzimas con las larvas tiene mayor EC y RS, mientras que con endospermo de coco hay mayor tasa de crecimiento al alimentarse del residuo fermentado durante 14-21 días [31].

Pretratamiento químico

El pretratamiento químico consiste en el uso de sustancias inorgánicas como ácidos, bases u otros agentes químicos para modificar la estructura de los residuos, especialmente aquellos ricos en materia lignocelulósica [39]. La adición de ácidos para solubilizar hemicelulosa de residuos de poda o de industria agrícola se estudia para aumentar la cantidad de azúcares obtenidos de su degradación. Sin embargo, la alta corrosividad de los ácidos puede comprometer la eficiencia de procesos fermentativos posteriores [40]. También, la hidrólisis alcalina mediante bases ha mostrado disminuir la cristalinidad y grado de polimerización de la celulosa, generando un aumento en el área de superficie de contacto. Como resultado, un mayor número de bacterias y enzimas obtienen acceso en tratamientos posteriores. Las desventajas del uso de bases en contraste con los ácidos, son el prolongado tiempo de procesamiento y la dificultad para ser neutralizadas [41]. Este tipo de pretratamiento es aplicable a la biotransformación con la MSN, ya que puede mejorar la digestibilidad de fibra y aportar una fuente de nitrógeno asimilable por los microorganismos para producir más aminoácidos para las larvas [35]. No obstante, existen pocos trabajos dedicados a la aplicación de pretratamientos químicos en residuos que servirán como sustrato para la cría de la MSN, por lo que su potencial aún se desconoce (Tabla 3).

En el pretratamiento de cáscaras de plátano con amoníaco se reportó un aumento en el contenido de taninos solubles [32]; estos compuestos pueden ser perjudiciales para las larvas, ya que afectan su capacidad de alimentarse y sobrevivir [24]. Sin embargo, se observó un peso y

TABLA 3.

Pretratamiento químico de residuos orgánicos para la alimentación de larva de MSN.

supervivencia de las larvas constante [32]. Se reportó un efecto contrastante de la aplicación de amoníaco en cáscaras de diferentes frutas; en plátano aumenta la EC, pero no afecta la RC [32]; mientras para naranja la RS aumenta sin afectar la EC [35]. Por el contrario, el pretratamiento de amoníaco en brócoli y coliflor disminuye la RS [33].

RESIDUO	PRETRATAMIENTO	RESULTADO	REFERENCIA
Cáscaras de plátano	Comparación de tratamientos químicos con solución de amoníaco al 24.5 %, en tres cantidades: 0.8 y 1 % del peso del residuo aplicado por 7 días y 0.8 % del peso del residuo aplicado por 14 días. Posteriormente neutralizado con ácido sulfúrico. Control no pretratado.	Los tratamientos de 0.8 y 1 % por 7 días disminuyen el contenido de compuestos fenólicos del residuo. Los tratamientos aumentan el contenido de taninos solubles del residuo, especialmente el de 0.8 % por 7 días. EC aumenta en tratamiento de 1 %. La supervivencia, peso y RS no fueron afectadas por los tratamientos.	[32]
Cáscaras de naranja	Comparación de aplicación de solución de amoníaco al 24.5 % por 16 días, contra control sin pretratamiento.	EC del tratamiento sin diferencia con el control. RS mayor en el tratamiento (83 %) que en el control (58 %). Sin diferencia en el peso de larva ni supervivencia.	[35]
Recortes de brócoli y coliflor		EC del tratamiento sin diferencia con el control. RS menor en el tratamiento (76 %) que en el control (93 %). Sin diferencia en el peso de larva ni supervivencia.	

Conclusiones

El pretratamiento de residuos orgánicos ha demostrado renovar el proceso de biotransformación de larva de MSN. Los pretratamientos físicos, como el molido y prensado, disminuyen el tamaño de partícula y el contenido de humedad. Al disminuir la humedad a un 60-80 % las larvas tienen un desarrollo óptimo, mayor peso y supervivencia. Existen pocos trabajos sobre el efecto del tamaño de partícula en la larva, pero es notorio que el tamaño óptimo varía de acuerdo con el residuo. Es menester realizar más investigaciones sobre cómo la modificación del tamaño de partícula puede mejorar el aprovechamiento de residuos orgánicos con estructuras difíciles de acceder como frutas con cáscaras duras, semillas, huesos y cartílago.



Los pretratamientos biológicos con diferentes microorganismos y enzimas han demostrado mejorar el aprovechamiento de residuos altos en lignina y celulosa, obteniendo diferentes rendimientos por tiempos de fermentación, concentración y especie. No obstante, es difícil controlar un proceso de descomposición biológica, por factores que modifican el rendimiento: temperatura, humedad, pH, salinidad, microorganismos presentes y composición del sustrato, entre otros. El pretratamiento químico, el menos estudiado, muestra una disminución en el aprovechamiento de residuos; además, solo se ha puesto a prueba el amoníaco en los residuos, por lo que es necesario investigar la repercusión de otros compuestos químicos en la alimentación de la larva, tomando como referente aquellos que ya han sido utilizados para degradar lignina y hemicelulosa en otros procesos productivos. Para la aplicación de pretratamientos en producciones de MSN a mayor escala se debe valorar el costo-beneficio que poseen en términos de recursos, energía, tiempo y trabajo necesario.

En los estudios analizados existen discrepancias entre los cálculos de biotransformación, así como de la medida de las variables. Algunos se enfocan en el contenido en húmedo de los residuos y las larvas, mientras que otros lo hacen en el seco. Este desbalance dificulta la comparación entre diferentes análisis, por lo que apremia buscar la estandarización entre metodologías.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo durante toda esta investigación.

Referencias

- [1] FAO. (2020). "Sustainable Development Goals", [En línea]. Disponible: <https://www.fao.org/sustainable-development-goals/indicators/1231/en/>
- [2] FAO. (2022). "Voluntary Code of Conduct for Food Loss and Waste Reduction". [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.4060/cb9433en>
- [3] S. Maina, V. Kachrimanidou y A. Koutinas, "A roadmap towards a circular and sustainable bioeconomy through waste valorization", *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, vol. 8, pp. 18–23, diciembre de 2017.
- [4] Y. S. Wang y M. Shelomi, "Review of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) as Animal Feed and Human Food", *Foods*, vol. 6, no. 10, p. 91, octubre de 2017.
- [5] K. C. Surendra, J. K. Tomberlin, A. van Huis, J. A. Cammack, L.-H. L. Heckmann y S. K. Khanal, "Rethinking organic wastes bioconversion: Evaluating the potential of the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF)", *Waste Management*, vol. 117, pp. 58–80, noviembre de 2020.
- [6] K. B. Barragan-Fonseca, M. Dicke y J. J. A. van Loon, "Nutritional value of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) and its suitability as animal feed – a review", *Journal of Insects as Food and Feed*, vol. 3, no. 2, pp. 105–120, junio de 2017.
- [7] Y. Law y L. Wein, "Reversing the nutrient drain through urban insect farming—opportunities and challenges", *AIMS Bioengineering*, vol. 5, no. 4, pp. 226–237, 2018.
- [8] C. Lalander, S. Diener, C. Zurbrügg y B. Vinnerås, "Effects of feedstock on larval development and process efficiency in waste treatment with black soldier fly (*Hermetia illucens*)", *Journal of Cleaner Production*, vol. 208, pp. 211–219, enero de 2019.
- [9] M. Gold, J. K. Tomberlin, S. Diener, C. Zurbrügg y A. Mathys, "Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: A review", *Waste Management*, vol. 82, pp. 302–318, diciembre de 2018.
- [10] B. Dortmans, S. Diener, B. M. Verstappen, C. Zurbrügg, "Black Soldier Fly Biowaste



Processing A Step-by-Step Guide". Dübendorf: Eawag – Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2017.

- [11] M. S. Ayilara, O. S. Olanrewaju, O. O. Babalola y O. Odeyemi, "Waste Management through Composting: Challenges and Potentials", *Sustainability*, vol. 12, no. 11, p. 4456, mayo de 2020.
- [12] N. E. A. Basri, N. A. Azman, I. K. Ahmad, F. Suja, N. A. A. Jalil y N. F. Amrul, "Potential Applications of Frass Derived from Black Soldier Fly Larvae Treatment of Food Waste: A Review", *Foods*, vol. 11, no. 17, p. 2664, septiembre de 2022.
- [13] C. Lalander, E. Ermolaev, V. Wiklicky y B. Vinnerås, "Process efficiency and ventilation requirement in black soldier fly larvae composting of substrates with high water content", *Science of The Total Environment*, vol. 729, p. 138968, agosto de 2020.
- [14] J. F. Morales Quintana, "Bioconversión de residuos orgánicos a partir del manejo ex situ de *Hermetia illucens* (L., 1758) (Diptera: Stratiomyidae) como una alternativa para la gestión sostenible de los desechos sólidos en el Distrito Metropolitano de Quito", Tesis de licenciatura, Universidad Central de Ecuador, Ecuador, 2021.
- [15] R. Salomone, G. Saija, G. Mondello, A. Giannetto, S. Fasulo y D. Savastano, "Environmental impact of food waste bioconversion by insects: Application of Life Cycle Assessment to process using *Hermetia illucens*", *Journal of Cleaner Production*, vol. 140, pp. 890–905, enero de 2017.
- [16] M. Meneguz et al., "Effect of rearing substrate on growth performance, waste reduction efficiency and chemical composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 98, no. 15, pp. 5776–5784, mayo de 2018.
- [17] N. F. Addeo et al., "Different Combinations of Butchery and Vegetable Wastes on Growth Performance, Chemical-Nutritional Characteristics and Oxidative Status of Black Soldier Fly Growing Larvae", *Animals*, vol. 11, no. 12, p. 3515, diciembre de 2021.
- [18] D. Brits, "Improving feeding efficiencies of black soldier fly larvae, *Hermetia illucens* (L., 1758) (Diptera: Stratiomyidae: Hermetiinae) through

manipulation of feeding conditions for industrial mass rearing”, Tesis doctoral, Stellenbosch University, Stellenbosch, Sudáfrica, 2017.

- [19] L. Palma, J. Fernández-Bayo, D. Niemeier, M. Pitesky y J. S. VanderGheynst, “Managing high fiber food waste for the cultivation of black soldier fly larvae”, *Science of Food*, vol. 3, no. 1, septiembre de 2019.
- [20] L. Palma, S. J. Ceballos, P. C. Johnson, D. Niemeier, M. Pitesky y J. S. VanderGheynst, “Cultivation of black soldier fly larvae on almond byproducts: impacts of aeration and moisture on larvae growth and composition”, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 98, no. 15, pp. 5893–5900, agosto de 2018.
- [21] J. Y. K. Cheng, S. L. H. Chiu y I. M. C. Lo, “Effects of moisture content of food waste on residue separation, larval growth and larval survival in black soldier fly bioconversion”, *Waste Management*, vol. 67, pp. 315–323, septiembre de 2017.
- [22] D. Khairuddin, S. N. A. Ghafar y S. N. F. Hassan, “Food waste type and moisture content influence on the *Hermetia illucens* (L.), (Diptera: Stratiomyidae) Larval Development and Survival”, *OP Conf. Series: Earth Environmental Sci.*, vol. 1022, no. 1, p. 012076, mayo de 2022.
- [23] N. Ribeiro, R. Costa y O. M. C. C. Ameixa, “The Influence of Non-Optimal Rearing Conditions and Substrates on the Performance of the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*)”, *Insects*, vol. 13, no. 7, p. 639, julio de 2022.
- [24] J.A. Cammack y J.F. Tomberlin, “The Impact of Diet Protein and Carbohydrate on Select Life-History Traits of The Black Soldier Fly *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae)”, *Insects*, vol. 8, no. 2, p. 56, mayo de 2017.
- [25] H. K. Sharma, C. Xu y W. Qin, “Biological Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Biofuels and Bioproducts: An Overview”, *Waste and Biomass Valorization*, vol. 10, no. 2, pp. 235–251, agosto de 2017.
- [26] A. A. Somroo et al., “Influence of *Lactobacillus buchneri* on soybean curd residue co-conversion by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) for food and feedstock production”, *Waste*



Management, vol. 86, pp. 114–122, marzo de 2019.

- [27] G. Yu, P. Cheng, Y. Chen, Y. Li, Z. Yang, Y. Chen, y J.K. Tomberlin, "Inoculating Poultry Manure With Companion Bacteria Influences Growth and Development of Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae) Larvae", *Environmental Entomology*, vol. 40, no. 1, pp. 30–35, febrero de 2011.
- [28] L. Zheng, Y. Hou, W. Li, S. Yang, Q. Li y Z. Yu, "Bio-diesel production from rice straw and restaurant waste employing black soldier fly assisted by microbes", *Energy*, vol. 47, no. 1, pp. 225–229, noviembre de 2012.
- [29] S.N. Mohd-Noor, C. Y. Wong, J. W. Lim, Y. Uemura, M. K. Lam, A. Ramli, ... y L. Tham, "Optimization of self-fermented period of waste coconut endosperm destined to feed black soldier fly larvae in enhancing the lipid and protein yields", *Renewable Energy*, vol. 111, pp. 646–654, octubre de 2017.
- [30] C. Y. Wong, J. W. Lim, F. K. Chong, M. K. Lam, Y. Uemura, W. N. Tan. y S. S. Lam, "Valorization of exo-microbial fermented coconut endosperm waste by black soldier fly larvae for simultaneous biodiesel and protein productions", *Environmental Research*, vol. 185, p. 109458, junio de 2020.
- [31] A. Isibika, B. Vinnerås, O. Kibazohi, C. Zurbrügg y C. Lalander, "Pre-treatment of banana peel to improve composting by black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.), Diptera: Stratiomyidae) larvae", *Waste Management*, vol. 100, pp. 151–160, diciembre de 2019
- [32] Z. Gao, W. Wang, X. Lu, F. Zhu, W. Liu, X. Wang y C. Lei, "Bioconversion performance and life table of black soldier fly (*Hermetia illucens*) on fermented maize straw", *Journal of Cleaner Production*, vol. 230, pp. 974–980, septiembre de 2019
- [33] E. Ermolaev, C. Lalander y B. Vinnerås, "Greenhouse gas emissions from small-scale fly larvae composting with *Hermetia illucens*", *Waste Management*, vol. 96, pp. 65–74, agosto de 2019.
- [34] L. Lindberg, E. Ermolaev, B. Vinnerås y C. Lalander, "Process efficiency and greenhouse gas emissions in black soldier fly larvae composting of fruit and vegetable waste with and without pre-treatment", *Journal*

- of *Cleaner Production*, vol. 338, p. 130552, de 2022.
- [35] J. J. Lim, C. S. Liew, R. Raksasat, Z. M. Merican, K. Kiatkittipong, E. A. Abdelfattah, ... y J. W. Lim, "Cellulase pretreated palm decanter cake for feeding of black soldier fly larvae in triggering bioaccumulation of protein and lipid into biodiesel productions", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 53, p. 102485, octubre de 2022.
- [36] L. Lindberg, B. Vinnerås y C. Lalander, "Process efficiency in relation to enzyme pre-treatment duration in black soldier fly larvae composting", *Waste Management*, vol. 137, pp. 121–127, enero de 2022.
- [37] C. Pas, D. Brodeur, M. H. Deschamps, Y. Lebeuf, K. Adjalle, S. Barnabé, M. Eeckhout, G. Vandenberg & C. Vaneeckhaute, "Valorization of pretreated biogas digestate with black soldier fly (*Hermetia illucens*, L; Diptera: Stratiomyidae) larvae", *Journal of Environmental Management*, vol. 319, p. 115529, octubre de 2022
- [38] J. R. Banu, J. Merrylin, T. M. M. Usman, R. Y. Kannah, M. Gunasekaran, S. H. Kim, y G. Kumar, "Impact of pre-treatment on food waste for biohydrogen production: A review", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 36, pp. 18211–18225, julio de 2020.
- [39] M. Badiei, N. Asim, J. M. Jahim y K. Sopian, "Comparison of Chemical Pretreatment Methods for Cellulosic Biomass", *APCBEE Procedia*, vol. 9, pp. 170–174, 2014.
- [40] M. Jędrzejzyk, E. Soszka, M. Czapnik, A.M. Ruppert y J. Grams, "Chapter 6 - Physical and chemical pretreatment of lignocellulosic biomass", *Second and Third Generation of Feedstocks: The Evolution of Biofuels*, 2019. pp. 143-196.



AQUAPONIC SYSTEMS: A TOOL TO PROMOTE LOCAL CONSUMPTION AND TO CREATE A SUSTAINABLE IMPACT IN FAMILY GARDEN PRODUCTION

SISTEMAS ACUAPÓNICOS: UNA HERRAMIENTA PARA PROMOVER EL CONSUMO LOCAL Y GENERAR UN IMPACTO SOSTENIBLE EN LA PRODUCCIÓN DE HUERTOS FAMILIARES

Mark Schoor
Ana Patricia Arenas Salazar
Guillermo Abraham Peña Herrejón
Enrique Rico García*

¹ Universidad Autónoma de Querétaro, México

* Correo electrónico: ricog@uaq.mx



Resumen

La producción de alimentos de traspatio es una opción viable para obtener alimentos frescos y ecológicos, que pueden contribuir a la salud humana. Esta práctica es crucial para la población y repercute en la situación socioeconómica de las familias rurales y urbanas. La agricultura de traspatio es determinante para la disponibilidad mundial de alimentos, la preservación de la producción alimentaria tradicional, la conservación del medio ambiente y la innovación tecnológica. Sin embargo, una de las principales preocupaciones en la producción de alimentos es la falta de tecnologías sostenibles, consistentes y respetuosas con el medio ambiente. Por ello, este artículo presenta una alternativa para la producción de alimentos mediante la implantación de sistemas acuapónicos en la agricultura de traspatio. Estos sistemas optimizan el uso del agua combinando los métodos de crianza de animales acuáticos y cultivo de las plantas. Los sistemas acuapónicos también son convenientes en territorios rurales estériles o como conceptos de jardinería en zonas urbanas. En conclusión, la acuaponía puede ser un método sostenible, pero se necesitan más estudios sobre su impacto socioeconómico en las zonas rurales.

Palabras clave: acuaponía, comunidades vulnerables, consumo local, producción familiar, sostenible

Abstract

Backyard food production is a viable option to obtain fresh, organic food, which can contribute to human health. This practice is crucial for the population and has an impact on the socioeconomic status of rural and urban families. Backyard farming is determinant to global food availability, traditional food production preservation, environmental conservation and technological innovation. However, a major concern in food production is the lack of sustainable, consistent and environmentally friendly technologies. Therefore, this article presents an alternative for food production through the implementation of aquaponic systems in backyard farming. Such systems optimize the usage of water by combining the methods of aquatic animals and plants. Aquaponic systems are also convenient in barren rural territories or as gardening concepts in



urban areas. In conclusion, aquaponics can be a sustainable method, but more studies about the socioeconomic impact it in rural areas are needed.

Keywords: aquaponics, family farming, local consumption, sustainability, vulnerable communities.

Introduction

As the world population has increased, so has the need for food production systems effectiveness [1]. A milestone in this process was the selection and domestication of valuable grains, which enhanced field exploitation rates [2] and originated the development of new, higher yield varieties. Nobel Peace Prize Laureate Norman Borlaug acknowledges this progression as the start of the Green Revolution. Furthermore, the new varieties were photoperiod insensitive semidwarf plants, more resistant to oxides and responded positively to nitrogen fertilization [3].

The Green Revolution, on one hand, saved millions of lives by bringing food security to a lot of countries, especially to underdeveloped ones [4]. On the other hand, it implemented soil exhausting methods and promoted plague resistance under the usage of agrochemical products [5]. The environmental impact of these products harmed the biodiversity and had a high social cost [6]. Now scientists call for a new Green Revolution: proposals for production systems and methods [6], [7], [8].

Aquaponics, which consists in the incorporation of plant and fish production as a single system, is one of such proposals. The concentration of nutrients in the fish production wastewater promotes the growth of the incorporated plants [9]. These arrangements are commonly based on recirculating aquaculture systems (RAS), which connect aquaculture tanks with water based plant production [10]. Also, aquaponic vegetables are more resistant to plagues and pests, avoiding the massive application of pesticides [17]. There are four different Hydroponic system concepts; and their adequacy depends on the crop specific production requirements:



La agricultura de traspatio es determinante para la disponibilidad mundial de alimentos, la preservación de la producción alimentaria tradicional, la conservación del medio ambiente y la innovación tecnológica. Este artículo presenta una alternativa para la producción de alimentos mediante la implantación de sistemas acuapónicos en la agricultura de traspatio.

- Floating rafts: Styrofoam board floats covering the aquaculture tanks to facilitate the plant root contact with the concentrated fish tank water, but it has the need of oxygenation [12].
- Substrate beds (or gravel beds): boxes or pipes filled with different types of organic or inorganic substrates [13], through which the residual wastewater recirculates supporting the plant growth [11].
- Nutrient film technique (NFT) [11]: a PVC pipe channel system that supports the plants growth [12] by establishing direct contact between the roots and the nutrients in the wastewater solution.
- A fourth, less common procedure consists in irrigating the crops with aquaculture wastewater without a recirculation system [14].

These designs benefit agricultural food production in that their ecological impact results milder [15], due to the relative independence from agrochemicals and heavy machinery in comparison to intensive monoculture [16].

A major issue of traditional monoculture is the need for vast fertile territories [18]. Aquaponics, on the contrary, can be accommodated in small spaces such as backyards [19], independently of soil fertility [14]. These constructs are convenient for self-consumption in a family farming concept. The double benefit of local production and self-consumption is key for sustainable food security in rural areas [20].

The steady production of healthy food is also a social and cultural matter. New trends promote the idea of “producing, buying and eating locally” [21]. Local consumption can be more sustainable and environmentally friendly; according to independent reports, governments and civil organizations promote the acquisition of local food [22] as a way to increase alimentary security [23]. In this context, backyard family farming can have a positive impact [24]. Therefore, the present objective is to justify home farming aquaponics as a viable food source and a means to improve the socioeconomic situation in rural and urban areas.



The socioeconomic *status quo* of rural communities

The transportation of goods and foods is one of the key generators of greenhouse gases and other environmental impacts [15]. The massive migration to urban areas also intensifies the environmental impact due to the resulting transportation needs, both for people and food [25]. Moreover, since climate change poses a new threat to agriculture, new strategies [26] must address the dependency of farmers' income on climate and weather changes. Moreover, farmers struggle to adapt to these alterations because of a lack of access to information and financial resources [27]. Another problem of mass food production in rural areas is the use of agrochemicals; exposure to these compounds is known to cause Parkinson's disease and several types of cancer [28].

The factors that define socioeconomic status are food security, housing, sanitation and medical conditions, infrastructure and purchasing power, biodiversity and ethnic disparities of a location [29]. The socioeconomic status of rural areas depends mostly on the income; this aspect is mainly generated by the food production industry, agriculture, forestry and fishing, with a minimum of 38% of employment in these economic activities [19]. In the last decades, the evolution of traditional agriculture, which has failed to generate abundant income [30], into off-farm systems exposed the unreliability of agricultural production. Furthermore, these circumstances caused a migration movement from the rural regions to urban metropolitan zones in search of higher life standards [31]. In the future, such urban growth will demand more provisions, rendering the production in rural areas a key actor in the supply chains [15]. On the other hand, it will direct attention towards the development of viable urban farming concepts and expose the rural areas even further [32]. Today, metropolitan population density is growing at such a rate that, by 2050, two thirds of the world population could be concentrated in urban areas [33].

The socioeconomics of food production is fundamental for farmer families, because it affects management of production capacity, technologies, market integration and ecology [34]. The impact of household farming in food production is evident in statistics: it represents 50% of global human food supplies. These numbers exclude game meat and fish, which constitute an additional 20% [35]. Moreover, by taking up 53% of agricultural farmland [34], family farming is a pillar of economic growth

and food security [36], providing self-sufficiency to underprivileged families [37]. In many countries, industrialization reshaped the demographic structure of rural areas and offered better work opportunities in urban areas to the rural population. Therefore, there are great differences in labor occupation between rural and urban areas, because the economic status in the former is more delicate given dependency on agricultural labor [38].

The socioeconomic status, cultural factors and daily habits of agriculture workers determine the productivity of the grain yield [39]. By passing down expertise generationally, ancient cultures have an effect on the socioeconomic importance, [40] defining the source of income and employment in rural areas [41]. Nowadays, these home garden practices are deemed effective self-provisioning [42]. In fewer words, rural areas are vital for food production [24]; therefore, they need new strategies to improve the local socioeconomic conditions [43].

The new focus on local food production and consumer behavior

The agricultural sector has evolved from intensive labor-based production systems into a modernized high knowledge-based systems, decreasing poverty and improving economic stability [43]. Prospectively, agriculture will be essential for the sustainable development goals of the United Nations [44], especially for food security [45] and preservation of rural cultural heritage [46].

Therefore, consumption of local food relates to the regional cultural heritage but also to the differences of local natural conditions and the knowledge of the local situation; such implication entails an exchange between the local communities and the geographic transportation status [47]. A community's social structure and its relation with the environment are crucial in the availability and variety of edible vegetation [48]. Consumers around the world prefer local food because it implies freshness, palatability and support for the local producers and businesses in general [49]. Besides patrons seek menus with local organic ingredients [50]. Family gardens are important for the global food system, but each location must be understood in its own agrobiodiversity context [42].



In the search for food security, local consumption focuses on enhancing home garden production in order to achieve self-provisioning in poor rural societies [51]. As a result, high ecological, social, economic, political and medical potential is created from local food production [34], [52], [53].

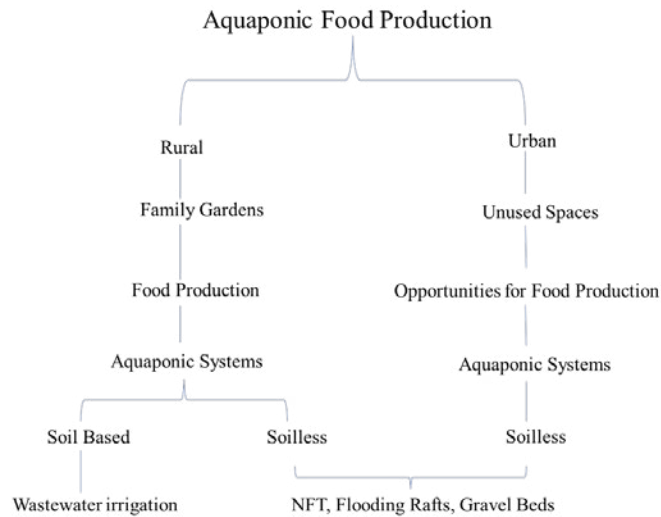
Family farms gain independence from food markets [42], boost social cohesion, promote sustainable development [35] and raise awareness for the use of natural resources [34]. Home gardens are commonplace in developing countries [54], where they constitute family income and liberate funds for covering other necessities [55]. But it has also an important social aspect: the connection between families and communities in the labor of food exchange, strengthened food diversity and preparation habits [42]. Family gardening may not guarantee food security, but enhances food access via local markets and socioeconomics because of the additional income sources to agricultural production [42], [54].

Although consumers want to support local growers, globalization and widespread of food markets and supermarkets have affected family farming in developing countries [56]. Agriculture needs support in the form of innovative technology and reliable mechanisms of natural resource management for family gardening [57].

Aquatic effluent use in circular economy concepts for plant production

Local consumption could benefit from the concept of circular economy, which consists in the generation of new goods from waste and byproducts of other processes [58]. Circular economy provides food security by reusing concentrated nutrients such as nitrates and phosphates [65] in waste products and saving nonrenewable resources [59]. Furthermore, aquaponic systems can partially relieve food production from agrochemical products [64]. Regardless, current food supply chains are yet to implement such techniques [59], [60], [61]. In this sense, aquaponic systems are effective on an economic micro-level scale [62]. Aquaponics breeds fish and grows plants in a single production system [20]; and depending on the location, it can be soilless [63] or soil-based (Figure 1) [14].

FIGURE 1.
Rural and Urban
Aquaponic Food
Production.



This enhancement of hydric resources creates a symbiotic growth of the fish and vegetables; while the fish effluent microbial compounds nourish the crops; the plant culture acts as biofilter for the wastewater, making it usable again [66]. Additionally, hydroponics growth season is unrestricted, which improves yield and growth rates. Most commonly cultivated edible plants under this scheme are smaller green leaf species [64].

Although these arrangements are costly, the ecological impact is worthwhile [68]. A general problem of aquaponic systems is the poor plant productivity due to nutrient insufficiency in aquafeeds [69]. This lack creates a need of mineral nutrient supplements or the mix of organic fertilizers to increase plant productivity. In sum, for a hybrid fish-vegetable soilless production to optimize resources [59], aquaculture fish production needs to be nutrient dense [67].

The less known, open aquaponic system (or fish wastewater irrigation system), excels in fertile soil areas [14]. Said technique reuses aquaculture wastewater for agricultural land irrigation [70], [71], [72]. The indicators of soil quality and fertility are organic matter decomposition and nutrient cycling, which in turn is key for soil microorganisms [73].

As stated before, the design of the system depends on the specific crop and productivity goals [69], [74], [75]. On the other hand, building an aquaponic system requires a high investment [76], but can contribute sustainable off-season high-quality produce, and reduce food prices as consequence [59]. Therefore, initial investments become profitable in the long term [76].



Aquaponic systems are environmentally safer than traditional aquaculture, due to the lower hydric footprint and water contamination. It also surpasses traditional agriculture in terms of agrochemicals, hydric resources and soil pollution [66], [77], [78], [79], [80], [59].

Nevertheless, the alleged environmental advantages are still unproven and require further studies, for example, an assessment of integration into life cycles [81], [82].

Aquaponic systems complementing backyard production in a family farming concept

Backyard gardens develop convenient goods for household consumption [85] and are effective in the provision of healthy diets [86]; likewise, this model contributes almost 15% of the world's food supply, and the increasing numbers prove that it is crucial for national economies [42], [83], [84], [85]. Backyard production has a positive impact on productivity, but also on the access to healthy organic agrochemical free foods [87]. In the same vein, agroecological practices are essential to transition to more sustainable, biodiversity preservation oriented food production systems and shorter supply chains [60]. In other terms, home gardening benefits farmers' health due to the stress relieving nature of garden work [88]. Also, physical activity in combination with home consumption can have an educational impact.

In Latin America, the term "local production" relates to backyard gardening, family farming, or community farming and the intention of accessible food production. The process is carried out in terms of environmental, economic and nutritional sustainability [84]. Family farming in the region is a means to increase food security [89] while relieving the socioeconomic and ecological impact for families [35].

Family farming brings families numerous benefits, like self-sufficiency; however, its performance depends on technical information exchanges across a community [86]. Challenges in this matter are spatial, financial and time limitations, let alone climactic conditions and crop nutritional requirements [87], [90]. Nonetheless, backyard aquaponics is cost effective and sustainable as long as the site's characteristics, local market

prices and operating-maintenance costs are convenient [19]. Besides, local production can improve dramatically because of home gardening in addition to aquaponics and elementary harvest methods [76].

Contrary to traditional unsustainable and environmentally aggressive food production systems, aquaponics can reduce the risk of food insecurity caused by climate change and socioeconomical turmoil [91]. In fact, aquaponics has been used as aquaculture wastewater treatment [20]; nowadays, because of the widespread of family gardens, it becomes more viable for backyard production, given its capacity to overcome space limitations [92].

Discussion

In recent years, intensive agriculture has harmed the environment, undermined small producers and failed to solve food insecurity in developing countries [93]. Consequently, it is necessary to raise awareness about these difficulties, and adopt new methods to process our sustenance. Backyard systems need to be revitalized [86] for supporting family food security. In combination with self-provision they might shorten supply chains and moderate the ecological impact caused by the transportation of food.

Nowadays, young people are interested in new sustainable technologies to improve life quality by consuming organic foods [94]. This will render local production and consumption a political topic soon, starting with the change of the food agenda; more subsidies will be granted to local producers committed to commercialize organic foods at reasonable prices. In such context, aquaponics will find its place as a sustainable and profitable system.

There is potential in aquaponic production with the development of better water usage and fish breeding technologies. For example, black soldier fly larvae can be used as aquafeed [95]; and it is believed that agriculture and aquaculture residues could feed the larvae. Were this true, a more closed food production system would be possible. Also, vertical hydroponic systems and farming concepts [96] as well as the introduction of locally produced organic fish aliment remain mostly unstudied.



Research of more compatible species is needed to optimize the systems' nutrient load and diversify family diets.

Unfortunately, due to its high initial investment and maintenance costs, food produced in these systems are expensive [97], notwithstanding increased productivity due to technological developments [94], [98]. Therefore, the population should be guided and educated on the cost-benefit of these systems and their importance for the future of food production.

For future projects, scientists must collaborate with producers in order to develop projects that really cover the needs of a community for a sustainable development [99]. It is important to research and develop new methods of animal and plant production [100]. For example, the cultivation of different types of algae for human consumption in polyculture systems [101]; these techniques could play an essential role in food sustainability in combination with the consumption of homegrown produce.

Conclusion

Consumers have shifted towards organic and locally produced food and restaurants which offer according menus; this ideological change has boosted home and urban gardening concepts. Moreover, this movement appeals to consumers' conscience by proposing an environmentally friendly way to acquire food, albeit at a higher expense. Consequently, there is a growing interest in implementing sustainable strategies to diversify fresh, organic nourishment sources.

Aquaponic systems constitute a sustainable method of providing two fresh organic proteins, fish and plant, in a single circular system. The main benefits are the optimization of water usage and the decrease of agrochemical products. Furthermore, aquaponic systems are suitable for family and home gardens given their spatial adaptability and sole requirement of fresh water access.

Although local consumption is on the rise, more regional studies in diverse rural and urban climate zones on the impact of backyard production are needed; in specific, aquaponic systems and its positive effect

on food security, environment, society and economy. Further areas of interest are the educational impact on families and the awareness of biodiversity and nature conservation in general.

Acknowledgements

The authors thank the Faculty of Engineering of the Autonomous University of Querétaro for the support during the realization of an aquaponic project in Campus Concá and the ground provided to build the infrastructure.

Funding

This project was financed by the FOPER-2021-FIN02527 Fund of the Autonomous University of Querétaro and the Sustainable Development and Environmental Protection Program of the State of Querétaro 2021 through the Regional Corridor Program of Integral Formation to promote Sustainability in the State of Querétaro.



References

- [1] D. Soto-Gómez, and P. Pérez-Rodríguez, "Sustainable agriculture through perennial grains: Wheat, rice, maize, and other species. A review," *Agriculture, Ecosystems & Environm*[7] F. Jacquet, M.H. Jeuffroy, J. Jouan, E. Le Cadre, I. Litrico, T. Malausa, X. Reboud, and C. Huyghe, "Pesticide-free agriculture as a new paradigm for research," *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 42 (1), p. 8. 2022. Doi: <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00742-8>
- [8] T.N. Sogang, and Y. Monkouop, "Past, Present and Future of Urban Agriculture in Cameroon: Major Contemporary Challenges (1993-2017)," *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, vol. 11 (1), 1-14. 2022. Doi: <https://doi.org/10.4236/jacen.2022.111001>
- [9] M. Gullian Klanian, M. Delgadillo Diaz, J. Aranda, and C. Rosales Juárez, "Integrated effect of nutrients from a recirculation aquaponic system and foliar nutrition on the yield of tomatoes *Solanum lycopersicum* L. and *Solanum pimpinellifolium*," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 25 (18), pp.17807-17819. 2018. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1817-5>
- [10] S.M. Pinho, R.M. Valladão Flores, L.H. David, M.G.C. Emerenciano, K.K. Quagraine, and M. Célia Portella, "Economic comparison between conventional aquaponics and FLOCponics systems," *Aquaculture*, vol. 552, p. 737987. Doi: 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.737987>
- [11] U. Knaus, J. Zimmermann, S. Appelbaum, and H.W. Palm, "Spearmint (*Mentha spicata*) Cultivation in Decoupled Aquaponics with Three Hydro-Components (Grow Pipes, Raft, Gravel) and African Catfish (*Clarias gariepinus*) Production in Northern Germany," *Sustainability*, vol. 14 (1), p. 305, 2022. Doi: <https://doi.org/10.3390/su14010305>
- [12] M.J. Ibarra, E.W. Alcarraz, O. Tapia, Y. Ponce, H.D. Calderon-Vilca, and C.R. Quispe, "A Comparison of Cultivation Techniques NFT-I, FR and Soil: An IoT Monitoring Approach". In: Proceedings of International Conference on Data Science and Ap-

- plications. Springer, 2022, pp. 331-347. Doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-5120-5_26
- [13] G.A. Sarmiento Guevara, "Acuaponía implementación de un modelo acuapónico para el control y monitoreo mediante herramientas TIC's e IOT en un cultivo modular en Villavicencio," *Documentos De Trabajo ECBTI*, vol. 1 (2), 2020.
- [14] K. Inosako, E. Troyo Diéguez, T. Saito, and G. Lucero Vega, "Manual Técnico para Cultivo a Cielo Abierto usando Agua Residual de Acuaponia," In: *Manual Técnico de Acuaponía Combinada con Cultivo a Cielo Abierto adaptado en Zonas Áridas*, SATREPS, 2020, pp. 65-89. Doi: https://www.jica.go.jp/mexico/espanol/activities/c8hovm00007f8s9j-att/manual_sp.pdf
- [15] L.H. David, S.M. Pinho, F. Agostinh, J.I. Costa, M.C. Portella, K.J. Keesman, and F. Garcia, "Sustainability of urban aquaponics farms: An emergy point of view," *Journal of Cleaner Production*, vol. 331, p. 129896, Jan. 2022. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129896>
- [16] A. Mishra, L. Singh, and D. Singh, "Unboxing the black box—one step forward to understand the soil microbiome: A systematic review," *Microbial Ecology*, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00248-022-01962>
- [17] J. Masabni, and G. Niu, "Aquaponics", In: *Plant Factory Basics, Applications and Advances*, T. Kozai, G. Niu, and J. Masabni, pp. 167-180, 2022. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85152-7.00017-3>
- [18] V. Bogužas, L. Skinulienė, L.M. Butkevičienė, V. Steponavičienė, E. Petrauskas, and N. Maršalkienė, "The Effect of Monoculture, Crop Rotation Combinations, and Continuous Bare Fallow on Soil CO₂ Emissions, Earthworms, and Productivity of Winter Rye after a 50-Year Period," *Plants*, vol. 11 (3), p. 431. 2022. Doi: <https://doi.org/10.3390/plants11030431>
- [19] H. Rharrhour, W. Fatima, S. Goddek, M. Sadik, A. El Moujtahid, H. Nhhala, and A. Yahyaoui, "Towards sustainable food productions in Morocco: Aquaponics," in. *E3S Web of Conferences*, vol. 337, paper 03004, Jan. 2022. Doi: <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202233703004>
- [20] V.P. Mohanan, N.R. Mahanta, A. Kushwaha, and L. Goswami, "Leveraging the potential of aquaponics for urban



sustainability," In: *Emerging Trends to Approaching Zero, 2022 Waste*, pp. 59-78. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85403-0.00007-4>

- [21] E. Masson, and S. Bubendorff, "Local foods' as trustworthy food: geographical proximity, social areas and interpersonal relationships," *Review of Agricultural, Food and Environmental Studies*, vol. 103, pp. 29-49. 2022. Doi: <https://doi.org/10.1007/s41130-021-00159-7>
- [22] L. Cappelli, F. D'Ascenzo, R. Ruggieri, and I. Gorelova, "Is Buying Local Food a Sustainable Practice? A Scoping Review of Consumers' Preference for Local Food," *Sustainability*, vol. 14 (2), p. 772. 2022. Doi: <https://doi.org/10.3390/su14020772>
- [23] C.M.Viana, D. Freire, P. Abrantes, J. Rocha, and P. Pereira, "Agricultural land systems importance for supporting food security and sustainable development goals: A systematic review," *Science of The Total Environment*, vol. 806, part 3, p. 150718. 2022. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150718>
- [24] E. Veres Zahaikevitch, L. Medina Macedo, L. Battisti Telles, J.V. Messias Bittencourt, and A.G. Veres Zahaikevitch, "Contemporary Public Policies to Strengthen Family Farming in the International Perspective: A Bibliometric Study," *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, vol. 8 (1), p. 8, 2022. Doi: <https://doi.org/10.3390/joitmc8010008>
- [25] T. Yuan, Z.B. Lin, S. Cheng, R. Wang, and P. Lu, "Removal of Sulfonamide Resistance Genes in Fishery Reclamation Mining Subsidence Area by Zeolite," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19 (7), p. 4281. 2022. Doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph19074281>
- [26] B.B. Choudhary, and S. Sirohi, "Understanding vulnerability of agricultural production system to climatic stressors in North Indian Plains: a meso-analysis," *Environment, Development and Sustainability*, vol. 24, pp. 13522-13541. 2022. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01997-7>
- [27] K. Bakhsh, S.A.A. Naqvi, and W. Nasim, "Effects of Climate Change on the Socioeconomic Conditions of Farmers: A Case Study," In: *Building Climate Resilience in Agriculture, 2022*. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-79408-8_16

- [28] L. de Graaf, M. Boulanger, M. Bureau, G. Bouvier, M. Mery-et-Figuere, S. Tual, P. Lebailly, and I. Baldi, "Occupational pesticide exposure, cancer and chronic neurological disorders: A systematic review of epidemiological studies in greenspace workers," *Environmental Research*, vol. 203, p. 111822, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111822>
- [29] A. Batra, J. Swaby, P. Raval, H. Zhu, N.L. Weintraub, M. Terris, N.A. Karim, A. Keruakous, D. Gutterman, K. Beyer, M. Stolley, S.A. Brown, and A. Guha, "Effect of Community and Socio-Economic Factors on Cardiovascular, Cancer and Cardio-Oncology Patients with COVID-19," *COVID*, vol. 2 (3), pp. 350-368. DOI: 2022. <https://doi.org/10.3390/covid2030024>
- [30] B. Nguyen Thanh, T. Le Van Thuy, M. Nguyen Anh, M. Nguyen Nguyen, and T. Nguyen Hieu, "Drivers of agricultural transformation in the coastal areas of the Vietnamese Mekong delta," *Environmental Science & Policy*, vol. 122, pp. 49-58, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.04.010>
- [31] G.S. Morales, R.K.M. Villaronte, M.C.O. Yap, and M.A.L. Rosete, "The Relationship Between Rural-Urban Migration and the Agricultural Output of the Philippines," *International Journal of Social and Management Studies*, vol. 3 (1), pp. 62-74, 2022.
- [32] M. Abounaga, and H. Fouad, "Urban Green Coverage: "Importance of Green Roofs and Urban Farming Policies in Enhancing Liveability in Buildings and Cities—Global and Regional Outlook," In: *The Importance of Greenery in Sustainable Buildings. Innovative Renewable Energy*. Springer. 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-68556-0_7
- [33] T.A. Ladan, M.H. Ibrahim, S.S.B.S. Ali, and A. Saputra, "A geographical review of urban farming and urban heat island in developing countries," in *Proc. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/986/1/012071>
- [34] G. Tiny, M.R. Lucas, P.D. Henriques, and A. Marta-Costa, "Family agriculture, sustainable development and ethnographic linear programming - A Review. Economic and Social Development," in *Proc. 78th International Scientific Conference on Economic*



- and *Social Development*, 2022, pp. 285-294. DOI: <https://dx.doi.org/10.22161/ijhaf.6.3.1>
- [35] B.E. Graeub, M.J. Chappell, H. Wittman, S. Ledermann, R. Bezner Kerr, and B. Gemmill-Herrena, "The State of Family Farms in the World," *World Development*, vol. 87, pp. 1-15, Nov. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.05.012>
- [36] J. Möllmann, M. Buchholz, W. Kölle, and O. Musshoff, "Do remotely-sensed vegetation health indices explain credit risk in agricultural microfinance?," *World Development*, vol. 127, p. 104771, 2020. DOI: [10.1016/j.worlddev.2019.104771](https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104771)
- [37] S. Sharon Maria, S. Lakshmy, D.K. Nidhin, and N.K. Shibu, N.K., "Carbon Neutral Communities: Model for Integrating Climate Action into Development Planning," in *Sustainable Cities and Resilience. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 183, Springer, Singapore, 2022. DOI: [10.1007/978-981-16-5543-2_31](https://doi.org/10.1007/978-981-16-5543-2_31)
- [38] J.L. Saenz, B. Downer, M.A. Garcia, and R. Wong, "Rural/urban dwelling across the life-course and late-life cognitive ability in Mexico," *SSM - Population Health*, vol. 17, p. 101031, 2022. DOI: [10.1016/j.ssmph.2022.101031](https://doi.org/10.1016/j.ssmph.2022.101031)
- [39] G. Wies, A. Navarrete-Sequeda, E. Ceccon, J. Larsen, and M. Martinez-Ramos, "What drives management decisions and grain yield variability in Mesoamerican maize cropping systems? Evidence from small-scale farmers in southern Mexico," *Agricultural Systems*, vol. 198, p. 103370, 2022. DOI: [10.1016/j.agsy.2022.103370](https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103370)
- [40] T.Y. Macías Zambrano, C.S. González Calzadilla, V.D. Espinel Pino, T.B. Bravo Mero, and J.C. Vélez Vera, "Rural beekeeping: Eco-friendly complement to traditional agriculture," *International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 7 (2), pp. 741-750, 2022.
- [41] M.A. Magaña Magaña, M.E. Tavera Cortés, L.L. Salazar Barrientos, and J.R. Sanginés García, "Productividad de la apicultura en México y su impacto sobre la rentabilidad," *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 7 (5), pp. 1103-1115, 2016. DOI: [10.29312/remexca.v7i5.235](https://doi.org/10.29312/remexca.v7i5.235)
- [42] H.E. Hernández, G.A. Gutiérrez, I. Gutiérrez-Montes, J.C. Suárez, H.J. Andrade, A.P. Bernal, F. Casanoves, and C. Butler Flora, "How Close Are We to Self-Provisioning? A Look at the Livelihood Strategies of Rural Households in

- the Southern Andean Region o Colombia," *Sustainability*, vol. 14 (15), p. 2504, 2022. Doi: 10.3390/su14052504
- [43] M. Haque, S.K. Acharya, and B. Sarkar, "Farmers' Perception towards Transformation of Rice-based Cropping System into Tea Garden," *Indian Journal of Extension Education*, vol. 58 (1), pp. 12-16, 2022. Doi: 10.48165/IJEE.2022.58103
- [44] United Nations, "Progress towards the Sustainable Development Goals," Economic and Social Council, 2022. [Online] Available: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/29858SG_SDG_Progress_Report_2022.pdf
- [45] Y. Getaneh, A. Alemu, Z. Ganewo, and A. Haile, "Food security status and determinants in North-Eastern rift valley of Ethiopia," *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 8, p. 100290, 2022. Doi: 10.1016/j.jafr.2022.100290
- [46] S.B. Cavalli, P. Soares, S.S. Martinelli, and S. Schneider, "Family farming in times of Covid-19," *Revista de Nutrição*, vol. 33, 2020. Doi: 10.1590/1678-9865202033e200180
- [47] L. van den Berg, P. Hebinck, and D. Roep, "'We go back to the land': processes of re-peasantisation in Araponga, Brazil," *The Journal of Peasant Studies*, vol. 45 (3), pp. 653-675, 2016. Doi: 10.1080/03066150.2016.1250746
- [48] B.S. Amanto, M.C.B. Umanai-lo, R.S. Wulandari, T. Taufik, and S. Susiati, "Local Consumption Diversification," *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol. 8 (8), pp.1865-1869, 2019. [Online]. Available: <https://www.ijstr.org/final-print/aug2019/Local-Consumption-Diversification.pdf>
- [49] T. Zhang, J. Chen, and K.G. Grunert, "Impact of consumer global-local identity on attitude towards and intention to buy local foods," *Food Quality and Preference*, vol. 96, p. 104428, 2022. Doi: 10.1016/j.foodqual.2021.104428
- [50] S.H. Kim, R. Huang, and S. Kim, "Exploring advertising strategy for restaurants sourcing locally: The interplay of benefit appeal and regulatory focus," *Journal of Hospitality and Tourism Management*, vol. 50, pp. 127-138, 2022. Doi: 10.1016/j.jhtm.2022.01.009
- [51] J.B. Kirkpatrick, and A. Davison, "Home-grown: Gardens, practices and motivations in urban domestic vegetable production," *Landscape and Urban Planning*, vol. 170, pp.



24-33, 2018. DOI: 10.1016/j.lan-
durbplan.2017.09.023

- [52] I. Opitz, R. Berges, A. Piorr, and T. Krikser, "Contributing to food security in urban areas: differences between urban agriculture and peri-urban agriculture in the Global North," *Agriculture and Human Values*, vol. 33, pp. 341-358, 2016. DOI: 10.1007/s10460-015-9610-2
- [53] A. Katre, T. Bertossi, A. Clarke-Sather, and M. Parsatoon, "Agroecological Transition: A Territorial Examination of the Simultaneity of Limited Farmer Livelihoods and Food Insecurity," *Sustainability*, vol. 14 (6), p. 3160, 2022. DOI: 10.3390/su14063160
- [54] C.S. Aweke, E. Lahiff, and J.Y. Hassen, "The contribution of agriculture to household dietary diversity: evidence from smallholders in East Hararghe, Ethiopia," *Food Security*, vol. 12, pp. 625-636, 2020. DOI: 10.1007/s12571-020-01027-w
- [55] L. Veloso Dutra, D. de Castro Morais, R.H. Silva Santos, S. do Carmo Castro Franceschini, and S. Eloiza Priore, "Contribution of the production for self-consumption to food availability and food security in households of the rural area of a Brazilian city," *Ecology of Food and Nutrition*, vol. 57 (4), pp. 282-300, 2018. DOI: 10.1080/03670244.2018.1488250
- [56] W.B. Traill, "The Rapid Rise of Supermarkets?," *Development Policy Review*, vol. 24 (2), pp. 163-174, 2006. DOI: 10.1111/j.1467-7679.2006.00320.x
- [57] D.Y. Ayal, I.O. Olawale, and O. Olayide, "Review of Sustainable Agriculture and Food Systems in Africa," *African Journal of Sustainable Development*, vol. 10 (3), 2021. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/358150370>
- [58] J. Camacho-Otero, C. Boks, and I.N. Pettersen, "Consumption in the Circular Economy: A Literature Review," *Sustainability*, vol. 10 (8), p. 2758, 2018. DOI: 10.3390/su10082758
- [59] V.M. Fernández-Cabanás, A. Delgado, J.R. Lobillo-Eguibar, and L. Pérez-Urrestarazu, "Early production of strawberry in aquaponic systems using commercial hydroponic bands," *Aquacultural Engineering*, vol. 97, p. 102242, 2022. DOI: 10.1016/j.aquaeng.2022.102242
- [60] C.M. Galanakis, G. Brunori, D. Chiamonti, R. Matthews, C. Panoutsou, and U.R. Fritsche, "Bioeconomy and green

- recovery in a post-COVID-19 era," *Science of The Total Environment*, vol. 808 (2), p. 152180, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152180
- [61] Y. Geng, J. Sarkis, and R. Bleischwitz, "How to globalize the circular economy," *Nature*, vol. 565 (7738), pp. 153-155, 2019. DOI: 10.1038/d41586-019-00017-z
- [62] S. Milliken, A. Ovca, M. Villarroel, F. Gartmann, N. Antenen, T. Griessler Bulc, B. Kotzen, and R. Junge, "Lessons Learned from Introducing Aquaponics to Higher Education Curricula," in *Enhancing Environmental Education Through Nature-Based Solutions*, Springer, 2022, pp. 153-181. DOI: 10.1007/978-3-030-91843-9_11
- [63] J. Colt, A.M. Schuur, D. Weaver, and K. Semmens, "Engineering Design of Aquaponics Systems," *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, vol. 30 (1), pp. 33-80, 2021. DOI: 10.1080/23308249.2021.1886240
- [64] M. Breitenstein, and A. Hicks, "Review and harmonization of the life cycle global warming impact of five United States aquaponics systems," *Aquacultural Engineering*, vol. 96, p. 102224, 2022. DOI: 10.1016/j.aquaeng.2021.102224
- [65] J.E. Rakocy, M.P. Masser, and T.M. Losordo, "Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics-Integrating fish and plant culture," *Southern Regional Aquaculture Center Publication*, vol. 454, 2006.
- [66] B. Yep, and Zheng, "Aquaponic trends and challenges - A review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 228 (10), pp. 1586-1599, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.290
- [67] B. Kralik, F. Weisstein, J. Meyer, K. Neves, D. Anderson, and J. Kershaw, "From water to table: A multidisciplinary approach comparing fish from aquaponics with traditional production methods," *Aquaculture*, vol. 552, p. 737953, 2022. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2022.737953
- [68] Ghamkhar, R., C. Hartleb, Z. Rabas, and A. Hicks, "Evaluation of environmental and economic implications of a cold-weather aquaponic food production system using life cycle assessment and economic analysis," *Journal of Industrial Ecology*, 2022. DOI: 10.1111/jiec.13230
- [69] N. Romano, A. Powell, S. Islam, H. Fischer, N. Renukdas, A.K. Sinha, and S. Francis, "Supplementing aquaponics with black soldier fly (*Herme-*



tia *illucens*) larvae frass tea: Effects on the production and composition of sweetpotato slips and sweet banana peppers," *Aquaculture*, vol. 555, p. 738160, 2022. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2022.738160

- [70] M.B. Vallejos, M.S. Marcos, C. Barrionuevo, and N.L. Olivera, "Salinity and N input drive prokaryotic diversity in soils irrigated with treated effluents from fish-processing industry," *Applied Soil Ecology*, vol. 175, p. 104443, 2022. Doi: 10.1016/j.apsoil.2022.104443
- [71] A.EH. Zohry, and S. Ouda, "Fish Farms Effluents for Irrigation and Fertilizer: Field and Modeling Studies," in *Climate-Smart Agriculture*, Springer, 2022. Doi: 10.1007/978-3-030-93111-7_3
- [72] J.H. Kang, H.Y. Jung, and J.K. Kim, "Complete reuse of raw fishmeal wastewater: Evidence from a field cultivation study and economic analysis," *Environmental Engineering Research*, vol. 23 (3), pp. 271-281, 2018. Doi: 10.4491/ eer.2017.190
- [73] A. Sathyan, S.A. Muthukumaraswamy, and H. Rahman, "On the Study and Analysis of Automated Aquaponics System Using AVR Micro-controller," in *International Conference on Intelligent Manufacturing and Energy Sustainability 2021*, Springer, 2022, pp. 519-528. Doi: 10.1007/978-981-16-6482-3_51
- [74] J. Hager, L.A. Bright, J. Dusci, and J. Tidwell, *AQUAPONICS - Production Manual. A Practical Handbook for Growers*, Kentucky, USA: University of Kentucky, 2021.
- [75] W.A. Lennard, and B.V. Leonard, "A Comparison of Three Different Hydroponic Sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an Aquaponic Test System," *Aquaculture International*, vol. 14 (6), pp. 539-550, 2006. Doi: 10.1007/s10499-006-9053-2
- [76] FAO, *The State of World Fisheries and Aquaculture. Sustainability in Action*, 2020. [Online] Available: <https://www.fao.org/3/ca9229en/ca9229en.pdf>
- [77] M. Eck, O. Körner, M.H. Jijakli, "Nutrient Cycling in Aquaponics Systems," in *Aquaponics Food Production Systems*. Springer, pp 231-246, 2019. Doi: 10.1007/978-3-030-15943-6_9
- [78] A. Joyce, S. Goddek, B. Kotzen, S. Wuertz, "Aquaponics: Closing the Cycle on Limited Water, Land and Nutrient Resources," in *Aquaponics Food*

- Production Systems*, Springer, pp. 19-34, 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-15943-6_2
- [79] S.G. Alarcón-Silvas, J.A. León-Cañedo, J.F. Fierro-Sañudo, J. Ramírez-Rochín, M.G. Fregoso-López, M.G. Frías-Espericueta, C.C. Osuna-Martínez, and F. Páez-Osuna, "Water quality, water usage, nutrient use efficiency and growth of shrimp *Litopenaeus vannamei* in an integrated aquaponic system with basil *Ocimum basilicum*," *Aquaculture*, vol. 543, p. 737023, 2021. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2021.737023
- [80] G.F.M. Baganz, A. Timpe, D. Baganz, G. Staaks, B. Hunger, W. Kloas, and F. Lohrberg, "City or hinterland - site potentials for upscaled aquaponics in a Berlin case study," *npj Urban Sustainability*, 2022. DOI: 10.1038/s42949-022-00072-y
- [81] A. Greenfeld, N. Becker, J.F. Bornman, S. Spatari, and D.L. Angel, "Is aquaponics good for the environment? - evaluation of environmental impact through life cycle assessment studies on aquaponics systems," *Aquaculture International*, vol. 30 (1), pp. 305-322, 2022. DOI: 10.1007/s10499-021-00800-8
- [82] V. Ondruška, B.S. How, M. Netolický, V. Máša, and S.Y. Teng, "Resource optimization in aquaponics facility via process monitoring and graph-theoretical approach," *Carbon Resources Conversion*, vol. 5 (4), pp. 255-270, Dec. 2022. DOI:10.1016/j.crccon.2022.04.003
- [83] J.G. Vargas-Hernández, "Transformations of Urban Agro Ecology Landscapes in Territory Transition, in Deep Learning for Sustainable Agriculture - Cognitive Data Science in Sustainable Computing, pp. 199-221, 2022. DOI:10.1016/B978-0-323-85214-2.00007-0
- [84] A. Sridhar, A. Balakrishnan, M.M. Jacob, M. Sillanpää, and N. Dayanandan, "Global impact of COVID-19 on agriculture: role of sustainable agriculture and digital farming," *Environmental Science and Pollution Research*, Mar. 2022. DOI:10.1007/s11356-022-19358-w
- [85] S. Burgin, "'Back to the future'? Urban backyards and food self-sufficiency," *Land Use Policy*, vol. 78, pp. 29-35, Nov. 2018. DOI:10.1016/j.landusepol.2018.06.012
- [86] O.O. David, and W. Grobler, "Status Quo of Households' Backyard Food Gardens in South Africa: The "Drivers", " *Sustainability*, vol. 14 (5), p. 2674, Feb. 2022. DOI:10.3390/su14052674



- [87] A. Basarir, N.M.N. Al Mansouri, and Z.F.R. Ahmed, "Householders Attitude, Preferences, and Willingness to Have Home Garden at Time of Pandemics," *Horticulturae*, vol. 8 (56), Jan. 2022. DOI:10.3390/horticulturae8010056
- [88] L.S. Chalmin-Pui, A. Griffith, J. Roe, T. Heaton, and R. Cameron, "Why garden? – Attitudes and the perceived health benefits of home gardening," *Cities*, vol. 112, p. 103118, May 2021. DOI:10.1016/j.cities.2021.103118
- [89] M. Cervantes-Zapana, J.L. Yagüe, V.L. De Nicolás, and A. Ramirez, "Benefits of public procurement from family farming in Latin-AMERICAN countries: Identification and prioritization," *Journal of Cleaner Production*, vol. 277, p. 123466, Dec. 2020. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.123466
- [90] A. Sofo, and A. Sofo, "Correction to: Converting Home Spaces into Food Gardens at the Time of Covid-19 Quarantine: all the Benefits of Plants in this Difficult and Unprecedented Period," *Human Ecology*, vol. 48 (141), May 2020. DOI:10.1007/s10745-020-00157-1
- [91] B. Adeleke, S. Cassim, and S. Taylor, "Pathways to low-cost aquaponic systems for sustainable livelihoods and economic development in poor communities: defining critical success factors," *Aquaculture International*, vol.30, pp. 1575–1591, Mar. 2020. DOI:10.1007/s10499-022-00865-z
- [92] M.L. Richardson, and C.G. Arlotta, "Producing Cherry Tomatoes in Urban Agriculture," *Horticulturae*, vol. 8 (274), Mar. 2022. DOI:10.3390/horticulturae8040274
- [93] B. Davis, L. Lipper, and P. Winters, "Do not transform food systems on the backs of the rural poor," *Food Security*, 14, pp. 729–740, Jan. 2022. DOI:10.1007/s12571-021-01214-3
- [94] S. Goddek, A. Joyce, S. Wuertz, O. Körner, I. Bläser, M. Reuter, and K.J. Keesman, Decoupled Aquaponics Systems, in S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, G.M. Burnell (eds), *Aquaponics Food Production Systems*. Springer, Cham., pp. 201–229, Jun. 2019. DOI:10.1007/978-3-030-15943-6_8
- [95] E. Villanueva-Gutiérrez, C. Rodríguez-Armenta, M.L. González-Félix, and M. Pérez-Velázquez, "Incorporating hydrolyzed soy protein or black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal into feeds for *Totoba macdonaldi*," *Aquaculture*, vol. 554, p. 738152,

- May 2022. [DOI:10.1016/j.aquaculture.2022.738152](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738152)
- [96] E.G. Popkova, Vertical Farms Based on Hydroponics, Deep Learning, and AI as Smart Innovation in Agriculture, in E.G. Popkova, B.S. Sergi (eds), Smart Innovation in Agriculture. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 264, Springer, Singapore, pp. 257–262, Feb. 2022. [DOI:10.1007/978-981-16-7633-8_28](https://doi.org/10.1007/978-981-16-7633-8_28)
- [97] R.H. Bosma, L. Lacambra, Y. Landstra, C. Perini, J. Poulie, M.J. Schwaner, and Y. Yin, “The financial feasibility of producing fish and vegetables through aquaponics,” *Aquacultural Engineering*, vol. 78, Part B, pp. 146–154, Aug. 2017. [DOI:10.1016/j.aquaeng.2017.07.002](https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.07.002)
- [98] Y. Hao, K. Ding, Y. Xu, Y. Tang, D. Liu, and G. Li, “States, Trends, and Future of Aquaponics Research,” *Sustainability*, vol. 12 (18), p. 7783, Sep. 2020. [DOI:10.3390/su12187783](https://doi.org/10.3390/su12187783)
- [99] M.K. Rahman, M.M. Masud, R. Akhtar, and M.M. Hossain, “Impact of community participation on sustainable development of marine protected areas: Assessment of ecotourism development,” *International Journal of Tourism Research*, 24 (1), p. 33–43, Jun. 2022. [DOI:10.1002/jtr.2480#](https://doi.org/10.1002/jtr.2480#)
- [100] M. McClatchie, R. Schulting, R. McLaughlin, S. Colledge, A. Bogaard, P. Barratt, and N. Whitehouse, “Food Production, Processing and Foodways in Neolithic Ireland,” *Environmental Archaeology*, 27:1, pp. 80–92, 2022. [DOI:10.1080/14614103.2019.1615215](https://doi.org/10.1080/14614103.2019.1615215)
- [101] A.C. McAlvay, A. DiPaola, A.C. D’Andrea, M.L. Ruelle, M. Mosulishvili, P. Halstead, and A.G. Power, “Cereal species mixtures: an ancient practice with potential for climate resilience. A review,” *Agronomy for Sustainable Development*, 42, num. 100, Oct. 2022. [DOI:10.1007/s13593-022-00832-1](https://doi.org/10.1007/s13593-022-00832-1)



ELABORACIÓN DE PELLETS COMBUSTIBLES A PARTIR DE BAGAZO DE AGAVE

PRODUCTION OF FUEL PELLETS FROM AGAVE BAGASSE

Eliud Escudero Enríquez
Sergio Iván Martínez Guido
Oscar Daniel Lara Montaña
Claudia Gutiérrez Antonio*

Universidad Autónoma de Querétaro, México

*claudia.gutierrez@uaq.mx

Recibido el 18 de enero de 2023, aceptado el 24 de mayo de 2023.

Licencia Creative Commons Reconocimiento - NoComercial - CompartirIguual 4.0 Internacional (cc by-nc-sa 4.0).





Resumen

Uno de los retos más cruciales de la actualidad es satisfacer de la creciente demanda energética a nivel mundial. Durante el último siglo la explotación y uso de los combustibles fósiles ha permitido el desarrollo de las actividades humanas; sin embargo, estos materiales no renovables presentan graves inconvenientes, tales como su impacto ambiental y su inminente agotamiento. En oposición, existen distintas energías renovables, entre las que destacan los biocombustibles que son obtenidos a partir del procesamiento de biomasa. El presente trabajo se enfoca en el uso del bagazo de agave como materia prima para la elaboración de pellets combustibles, los cuales son biomasa compactada en forma de pequeños cilindros que al combustionar generan energía aprovechable. Para la realización del estudio, el bagazo de agave fue recolectado y caracterizado en términos de su humedad, cenizas, carbono, compuestos volátiles y poder calorífico; después, se sometió a un proceso de pelletización con dos diferentes tamaños de partícula, obteniendo así pellets combustibles. Posteriormente, los productos fueron caracterizados con base en los parámetros fisicoquímicos previamente mencionados, los cuales fueron contrastados con lo establecido en la norma ISO 17225. A pesar del déficit en poder calorífico y cenizas, los resultados mostraron que los pellets elaborados tienen propiedades promisorias y, aunque se determinó que en este primer estudio los productos estaban lejos de cumplir la normativa, se identificaron los parámetros del proceso que deben ser modificados para satisfacer el estándar.

Palabras clave: bagazo de agave, biocombustibles, bioenergía, pellets combustibles, residuos, revalorización.

Satisfying the rising global energy demand is an important and complex challenge that both current and future generations must face. During the last century and a half, the exploitation and use of fossil fuels have allowed the development of human activities. These non-renewable fuels have serious drawbacks, including their environmental impact and their imminent exhaustion. Different renewable energies, including biofuels, are obtained from biomass processing. This work focuses on fuel pellets, which are compacted biomass in the form of small cylinders that generate usable energy



Abstract

when combusted. In the present study, agave bagasse, the main residue in the tequila and mezcal industries, was used as raw material to produce fuel pellets. The agave bagasse was collected and characterized in terms of its moisture, ash, carbon, volatile compounds, and calorific value. Afterward, the bagasse was subjected to a pelletization process with two different particle sizes, thus obtaining fuel pellets. The pellets were characterized based on the previously mentioned physicochemical parameters, which were contrasted with those indicated at the ISO 17225 standard. The results showed that despite the deficit in calorific power and ash, the pellets produced have promising properties. It was determined that the pellets do not comply with the regulations, but the process parameters that must be modified to meet the regulations were identified.

Keywords: agave bagasse, biofuels, bioenergy, fuel pellets, residues, revalorization.

Introducción

A nivel internacional, la generación de residuos crece de manera significativa cada año. Entre 2012 y 2016 el incremento fue del 55 % y las estimaciones proyectan que para 2050 este porcentaje aumentará otro 50 % [2]; de estos residuos, los verdes (materia biodegradable, restos de poda, hojas, ramas o residuos leñosos) y alimenticios son los que conforman el grupo de mayor volumen [2], [3]. Por otro lado, en cuanto a nivel nacional, en el periodo comprendido entre 2003 y 2015 se observó en México un incremento del 61.2 % en la generación de residuos [3]. A su vez, en el 2012 se estimó que el potencial energético de 52 104 millones de toneladas de residuos agroindustriales se desaprovechó [4]. Ante esta perspectiva, y dado que se prevé un incremento en los residuos generados por el país, se enfatiza la importancia en el aprovechamiento de

los residuos, ya que pueden ser una vía para satisfacer parcialmente la demanda energética del país.

Las industrias tequilera y mezcalera son algunas de las empresas generadoras de residuos agroindustriales con potencial energético, en particular, la primera presenta una tendencia alcista, ya que su producción ha aumentado en los últimos 10 años en un 45.24 % [7]. Por una parte, el

crecimiento de esta industria impacta de manera positiva en la economía del país, puesto que aumenta el número de empleos, exportaciones e inversiones, entre otros indicadores [7-9]; paralelamente, su desarrollo conlleva un incremento en los residuos que se generan [7] y son desechados a pesar de su potencial energético. El bagazo de agave se encuentra entre estos desperdicios.

De composición fibrosa, el bagazo de agave se genera durante la etapa de molienda en la fabricación de los destilados y representa el 40 % del peso de la piña del agave [10]. Entre los inconvenientes que posee este residuo se encuentran la alta humedad y una lenta tasa de degradación que, aunadas a su inadecuada disposición, generan contaminación. A raíz de este problema se han propuesto alternativas para revalorizar el bagazo de agave, tales como la obtención de compuestos bioactivos y aglomerados [11], o la producción de alimentos y biomateriales [12]. En el área de los bioenergéticos, la conversión del bagazo de agave se ha propuesto para la fabricación de biocombustibles tanto líquidos [12-15] como gaseosos [16-19]; no obstante, la síntesis de biocombustibles sólidos es una alternativa poco explorada para la revalorización de bagazo de agave derivado de la industria tequilera. Por ejemplo, en el trabajo presentado por Blancarte Contreras et al. [20] se utilizó el agave residual generado durante la elaboración del mezcal; a su vez, Chávez Guerrero e Hinojosa [21] estudiaron el calor de combustión de fibras de agave mezcalero, bagazo sin tratar y pirolizado; sin embargo, ninguno de los trabajos proviene del proceso de elaboración de tequila ni evalúa la misma especie vegetal.

Los pellets combustibles están constituidos por biomasa lignocelulósica compactada, estos representan una fuente de energía térmica y/o eléctrica aprovechable a nivel residencial e industrial. Son resultado de un proceso de acondicionamiento conocido como densificación de bio-



Existen combustibles renovables, como es el caso del biocombustible obtenido a partir del procesamiento de biomasa. El presente trabajo se enfocará en el uso del bagazo de agave como materia prima para la elaboración de pellets combustibles.



TABLA 1.

Valores reportados de la composición química del bagazo de agave y rango de valores para materias primas convencionales en la elaboración de pellets combustibles.

masa, del cual se obtiene un producto con bajo contenido de humedad, alta densidad energética, tamaño y forma homogéneos [22], [23]. Por lo general, la elaboración de los pellets combustibles se lleva a cabo con aserrín proveniente de la industria maderera [22] y el proceso se divide en trituración, secado, acondicionamiento y densificado [24]. En cambio, de acuerdo con la norma CEN/TC 14961 [22], mostrada en la Tabla 1, la composición química del bagazo de agave es similar a la que presentan las mezclas tradicionalmente empleadas como materia prima.

COMPUESTO (% EN MASA)	BAGAZO DE AGAVE				MATERIA PRIMA CONVENCIONAL
	ALONSO Y RIGAL [25]	LIÑÁN-MONTES ET AL. [26]	KESTUR ET AL. [27]	CANO-DÍAZ ET AL. [28]	OBERNBERGER Y THEK [22]
Celulosa	43	41.86	73.6	51.82	30 - 40
Lignina	15	7.04	21.1	16.64	30 - 45
Hemicelulosa	19	4.41	-	28.18	25 - 30
Nitrógeno total	3	2	-	-	-
Pectinas	1	-	-	-	-
Grasas	1	-	-	-	-
Azúcares reductores	5	-	-	-	-
Cenizas	6	7.4	5.3	2.57	-
Otros	2	-	-	-	-
Humedad	5	6.44	-	-	-

La elaboración de pellets combustibles a partir de materias primas alternativas al aserrín es un campo que ya ha sido explorado. Sobre esta vía, múltiples biomásas han sido propuestas y evaluadas para su aprovechamiento. Por ejemplo, se ha estudiado la producción de pellets combustibles a partir de residuos forestales, municipales, industriales y provenientes de aglomerados, aserraderos y mueblerías [29]; también se ha propuesto el uso de paja de frijol [30], cáscara de arroz [31], restos de café [32] y corcho [33], así como mezclas de corcho con podas de vid [34] y de remanentes de cebada y aserrín de pino [35].

En este estudio se propone emplear bagazo de agave, proveniente de las industrias mexicanas del tequila y del mezcal, como materia prima y someterlo a un proceso de pelletización. Posteriormente, se realizará una caracterización de los pellets obtenidos y se compararán los valores resultantes con los estipulados por la norma EN-ISO-17225-2, la cual establece los requisitos generales para biocombustibles sólidos.

Materiales y métodos

Materia prima

El bagazo de agave proviene de un magueyal local del municipio de Apaseo el Grande, dedicado a la elaboración de destilados de agave. Se desconocen el tiempo y las condiciones a las cuales estuvo expuesto previo a su recolección, dado que fue tomado de un sitio de almacenamiento al aire libre. Una vez recolectado, el bagazo fue trasladado a las instalaciones del campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro, y colocado sobre un área verde a campo abierto.

Caracterización fisicoquímica de la materia prima y de los pellets obtenidos

El bagazo de agave y los pellets obtenidos se caracterizaron de la siguiente manera (cabe agregar que los estudios se realizaron por triplicado):

- Poder calorífico superior (PCS), valorado por el método establecido por la ISO-18125-2017.
- Humedad, calculada mediante el método UNE-EN14774-1:2010 [37].
- Contenido de cenizas, obtenido mediante el método UNE-EN ISO 11822:2016 [38].
- Contenido de materia volátil, determinado con el método UNE-EN 15148:2010 [39].
- Porcentaje de carbono (C), nitrógeno (N), hidrógeno (H) y azufre (S), calculados mediante el método Dumas modificado [40].



Tratamientos

Se propusieron dos sistemas: el primero, identificado como Tratamiento P1, correspondiente a la fracción del bagazo de agave triturado que se encuentra entre las mallas 20 y 40; el segundo, identificado como Tratamiento P2, correspondiente a la fracción del bagazo de agave triturado que se encuentra después de la malla 40.

Proceso de pelletizado

El proceso de transformación del bagazo de agave comenzó con una fase de secado que se realizó aplicando radiación solar a la intemperie durante cinco días. A continuación, el bagazo se sometió a un tratamiento de reducción de tamaño a través de una picadora marca BOMERI modelo PD6RM con motor KOHLER de gasolina con potencia de 9.5 hp. Posteriormente, el bagazo ya triturado fue sometido a un tamizado empleando dos mallas de calibres 20 y 40; se separaron e identificaron las fracciones como P1 (fracción entre malla 20 y malla 40) y P2 (fracción que pasó por la malla 40). Después se realizó una segunda fase de secado donde la biomasa triturada y tamizada fue expuesta a radiación durante dos horas, al término de las cuales se registró la humedad de ambas fracciones. Seguidamente, ambas partes se sometieron a un proceso de densificado en una pelletizadora MELKO 7LSP200 C. Los comprimidos se dejaron enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente y se almacenaron en bolsas resellables para trasladarlos. Luego se extrajeron de las bolsas de transporte y se colocaron en charolas de aluminio durante un día en una tercera fase de secado. Por último, se almacenaron nuevamente en bolsas resellables.

Análisis estadístico

Los resultados experimentales de la biomasa y los pellets combustibles fueron evaluados mediante ANOVA, además de una prueba de mínima diferencia significativa (MDS) de Student, ambas con p igual a 0.05.

Resultados y discusión

Se identificó qué parámetros fisicoquímicos de los pellets obtenidos infringen la EN-ISO-17225-2; dicha información permite evaluar las causas del incumplimiento y proponer modificaciones para alcanzar la norma. Asimismo, al hacer una comparación entre los tratamientos se encontró una diferencia significativa en el desempeño de los diferentes tamaños de partícula. De los resultados se concluye que el bagazo tiene propiedades promisorias como materia prima para la elaboración de pellets combustibles.

Caracterización del bagazo de agave

En la Tabla 2 se presentan los parámetros del bagazo de agave previos al proceso de pelletización. En ella puede corroborarse que el contenido de energía es promisorio, debido a que los valores obtenidos se encuentran, en su mayoría, dentro del rango que solicita la norma. Los únicos valores que incumplen con lo requerido son los contenidos de cenizas y nitrógeno.

TABLA 2.

Valores de los parámetros analizados en el bagazo de agave obtenidos en este estudio, así como aquellos reportados en la literatura.

REFERENCIA	PCS (MJ/kg)	HUMEDAD (%)	CENIZAS (%)	VOLÁTILES (%)	C (%)	N (%)	H (%)	S (%)
Bagazo de agave (este estudio)	16.78	4.63	15.55	78.60	34.57	1.95	4.38	< 0.01
Frijol [30]	8.22 - 15.99	8.53 - 10.71	4.96 - 6.22	93.66 - 94.59	53.98 - 54.72	0.61 - 6.41	-	-
Aserrín [41]	14.725	6.51	2.19	-	-	-	-	-
EN plus A1 [42]	16.56	< 10	< 0.7	-	-	< 0.3	-	< 0.04
EN plus A2 [42]	-	-	< 1.2	-	-	< 0.5	-	< 0.05
EN plus B [42]	-	-	< 2.0	-	-	< 1	-	-

Caracterización de los pellets obtenidos

Los pellets elaborados se situaron para el proceso de pelletización con una lectura de humedad de 25 % para P1 y 30 % para P2. Los análisis rea-



TABLA 3.

Valores de los parámetros analizados en los pellets obtenidos.

lizados en este estudio (Tabla 3) muestran que, en comparación con el bagazo de agave, el poder calorífico disminuyó en promedio un 32.3 %, el contenido de cenizas aumentó un 142 % y el contenido de azufre pasó de < 0.01 % a ~9.65 %. Por otro lado, el contenido de sólidos volátiles disminuyó en promedio un 39.16 %.

	PCS (MJ/KG)	HUMEDAD (%)	CENIZAS (%)	VOLÁTILES (%)	C (%)	N (%)	H (%)	S (%)
P1	12.19	4.11	39.45	34.17	32.06	2.85	4.05	9.67
P2	10.53	5.67	35.81	61.47	27.50	2.90	3.33	9.62
Astillas de madera [22]	17.64 - 18.72	-	0.4 - 1.3	76.0 - 86.0	47.1 - 51.6	0.09 - 0.17	6.1 - 6.3	0.007 - 0.10
Corteza [22]	17.64 - 20.16	-	2.0 - 5.0	69.6 - 77.2	48.8 - 52.5	0.10 - 0.50	4.6 - 6.1	0.01 - 0.20
Paja [22]	-	-	4.9 - 6.0	70.0 - 81.0	43.2 - 48.1	0.3 - 0.05	5.0 - 6.0	0.05 - 0.11
Restos de corcho [43]	21.41	8.02	4.81	-	50.50	0.43	5.80	0.03
Aserrín de pino [43]	20.80	9.30	0.90	-	50.50	0.48	6.10	0.03
Brotos de vid [43]	18.70	10.80	7.10	-	46.90	0.58	5.70	0.05
Ramas de olivo [43]	18.82	6.50	3.32	-	47.02	0.34	7.62	0.00
Paja de cebada [43]	17.43	7.20	10.51	-	43.85	0.77	5.50	0.10
Paja de trigo [43]	18.25	9.40	9.10	-	45.10	0.91	6.00	0.00
EN plus A1 [42]	16.56	<10	< 0.7	-	-	< 0.3	-	< 0.04
En plus A2 [42]			< 1.2	-	-	< 0.5	-	< 0.05
En plus B [42]			< 2.0	-	-	< 1	-	

Discusión

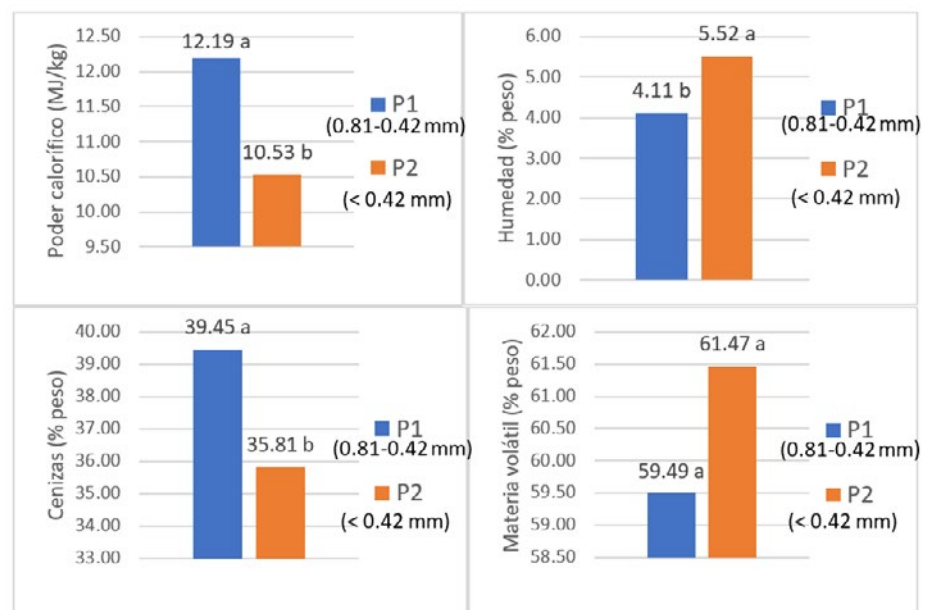
Los datos experimentales obtenidos del análisis realizado con la prueba MDS de Tukey con $p < 0.05$ revelaron que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los pellets elaborados con los tratamientos P1 y P2. Dicha disparidad se evidencia en la discrepancia entre los

valores de PCS, contenidos de humedad, cenizas y materia volátil que presentó cada tratamiento, lo que indica que existe un efecto en el tamaño de partícula empleado.

De la comparación de los pellets que resultan de los dos tratamientos considerados, resalta que P1 tiene un mayor poder calorífico y un menor contenido de humedad y de materia volátil; mientras que P2 ostenta un menor contenido de cenizas. Por otro lado, con respecto al análisis elemental realizado, se observó que aquellos pellets constituidos a partir del tratamiento P1 exhibieron un mayor contenido de carbono pero menor de nitrógeno, en comparación con los derivados del tratamiento P2. Sobre esta misma línea, en cuanto al hidrógeno, P1 es el que tiene mayor proporción, aunque P2 es el que cuenta con menor porcentaje de azufre (Figura 1). Del análisis de los parámetros fisicoquímicos, se infiere que el tratamiento con las mejores características es P1.

FIGURA 1.

Representación gráfica de los resultados obtenidos para las propiedades de los pellets elaborados. Las letras a y b indican el grupo estadístico correspondiente a cada valor, de acuerdo con la prueba MDS de Tukey con $p < 0.05$.



Al evaluar los resultados de P1, es claro que el valor de PCS de 12.19 MJ/kg está por debajo de la normativa, pues el valor requerido es de 16.53 MJ/kg. Por el contrario, los contenidos de cenizas, azufre y nitrógeno sobrepasan el límite de la normativa. En otras instancias, de la comparación con pellets derivados de otras biomásas, se concluye que el tratamiento P1 posee un PCS menor y un contenido de cenizas y azufre superior.

El poder calorífico tiene una relación directa con el contenido de carbono e inversa con el de cenizas [43]; por tanto, la deficiencia de este factor



puede deberse a una baja concentración de carbono, una alta de cenizas, o una combinación de ambas. Sin embargo, en caso de reducirse el contenido de cenizas, se tendría un doble beneficio, ya que permitiría incrementar el poder calorífico y cumplir con lo establecido en la norma.

Por su parte, con respecto al poder calorífico y el contenido de azufre, cabe señalar que el bagazo de agave empleado como materia prima se encontraba dentro de los parámetros solicitados. En este contexto, es importante hacer notar que los pellets pasaron por un proceso de secado previo a ser analizados. Por tal motivo, es posible que los contenidos de humedad y azúcar permitieran la proliferación, no contemplada, de microorganismos con procesos biológicos capaces de generar compuestos azufrados. Un ejemplo son las bacterias oxidantes de azufre que, dentro del pellet, podrían llegar a tomar H_2S (g) y depositarlo como H_2SO_4 (ac) [44], [45], alterando su composición elemental y sus características fisicoquímicas. En este sentido, el control del nivel de humedad posterior a la molienda del bagazo podría ser una etapa clave para adecuar los parámetros fisicoquímicos del pellet.

Si bien se desconoce el proceso por el que pasó el bagazo antes de ser recolectado, se sabe que generalmente es desechado en el suelo [46]. En consecuencia, es factible que durante esta disposición se combine con óxidos de silicio y aluminio presentes en el terreno [47]. Dichos contaminantes podrían ser el motivo de la cantidad de ceniza que se reporta tanto en el bagazo como en los pellets [48]. De ser cierta esta hipótesis, un mayor control de la forma en que se desecha la biomasa previo a la molienda mejoraría la calidad de los pellets al reducir el contenido de ceniza.

Conclusión

En este estudio se describe la elaboración de pellets combustibles con dos distintos tamaños de partículas a partir de bagazo de agave. Durante el proceso se realizó la caracterización fisicoquímica tanto de la materia prima como de los pellets obtenidos; como resultado, se observó que los pellets combustibles incumplían con la norma EN-ISO-17225-2 debido a un bajo poder calorífico y un elevado porcentaje de cenizas. No obstante, a partir de la relación encontrada entre el contenido de cenizas

y el poder calorífico, será posible modificar la proporción de cenizas a través de puntos de control en la disposición del bagazo. Tal corrección podría dar como resultado pellets con mejores características. De igual modo, se vislumbra que la combinación de bagazo con una materia prima convencional, como el aserrín, podría ser una alternativa más para el aprovechamiento de este residuo.

Además de lo anterior, se encontró que el tamaño de la partícula de la materia prima afecta las propiedades fisicoquímicas de los pellets. Asimismo, debido a que durante el proceso de pelletización existe el riesgo de contaminación, se destaca la importancia de abordar estudios para observar si este fenómeno sigue presentándose. En otras instancias, con base en los resultados del análisis de la biomasa, se concluye que el bagazo de agave tiene potencial como materia prima para la elaboración de pellets combustibles. A su vez, se abre la posibilidad de emprender investigaciones que incluyan mezclas de esta biomasa con otras, para evaluar las propiedades de los pellets elaborados. Sin embargo, la manera en que se dispone del bagazo de agave en la industria lo expone a una contaminación que implica una posible disminución de la calidad del bagazo como biocombustible. Por eso es importante procurar una ampliación de los estudios para dimensionar la repercusión de esta etapa sobre el aprovechamiento del bagazo.

Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el patrocinio proporcionado al estudiante que desarrolló el proyecto, así como a la Universidad Autónoma de Querétaro por su apoyo durante el proceso de esta investigación.

Fuentes de financiamiento

El financiamiento de este estudio proviene del apoyo recibido por el proyecto 320583, de la Convocatoria de Ciencia Básica y/o de Frontera, Modalidad: Paradigmas y Controversias de la Ciencia 2022.



Referencias

- [1] "Years of fossil fuel reserves left", 2020. Our World In Data, 2015. Disponible: <https://ourworldindata.org/grapher/years-of-fossil-fuel-reserves-left>
- [2] S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata, F. V. Woerden, *What a waste 2.0 A global Snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Group, 2018.
- [3] SEMARNAT, "Informe de la Situación del Medio Ambiente en México". *Compendio de Estadísticas Ambientales*. Indicadores Clave de desempeño ambiental y de crecimiento verde. SEMARNAT, 2015.
- [4] SEMARNAT, "Diagnostico básico para la gestión integral de los residuos". SEMARNAT, 2020.
- [5] R. Palomo, I. López, F. Islas, K. L. Galindo, D. Munguía, J. A. Rincón, M. A. Cortés, F. Alatríste, E. Razo, "Agave biomass biorefinery: processing and perspectives", *Clean Tech Environ Policy*, vol. 20, no. 7, pp. 1423-1441, septiembre 2018.
- [6] A. Kumar, C. Ram, "Agave biomass: a potential resource for production of value-added products", *Environmental Sustainability*, vol. 4, no. 2, pp. 245-259, Abril 2021.
- [7] *Consumo de agave para Tequila y Tequila 100% de agave*. Consejo Regulador del Tequila. 2021, agosto, 30. Disponible: <https://www.crt.org.mx/EstadisticasCRTweb/>
- [8] SECTUR, "Diagnostico de competitividad y sustentabilidad para los denominados pueblos mágicos de Jalisco Estudio de Tequila". SECTUR, 2013.
- [9] BECLE S.A.B de C.V., "Información financiera trimestral primer trimestre", estado de información financiera, 2022.
- [10] M. Cedeño, "Tequila Production", *Critical Reviews in Biotechnology*, vol. 15, no. 1, pp. 1-11, 1995.
- [11] G. Iñiguez-Cobarrubias, S. E. Lange, R. M. Rowell, "Utilization of byproducts from the tequila industry: part 1: agave bagasse as a raw material for animal feeding and fiberboard", *Bioresource Biotechnology*, vol.77, pp. 25-32, 2001.
- [12] J. Álvarez-Chávez, M. Villamiel, L. Santos-Zea, A. K. Ramírez-Jiménez, "Agave by-products: An overview of their Nutraceutical Value,

- current applications, and processing methods", *polysaccharides*, vol.2, pp. 720-743, Septiembre 2021
- [13] A. Aguirre, H. A. Ruiz, M. A. Cerqueria, R. Ramos, R. M. Rodríguez, S. Marques, R. M. Lukasik, "Sustainable approach of high-pressure agave bagasse pretreatment for ethanol production", *Renewable Energy*, Vol. 115, pp. 1347-1354, 2020.
- [14] J. Arrizon, J. C. Mateos, G. Sandoval, B. Aguilar, J. Solis, M. G. Aguilar, "Bioethanol and Xylitol production from different lignocellulosic hydrolysates by sequential fermentation", *Journal of Food Process Engineering*, vol. 35, no. 3, pp. 437-454, 2018.
- [15] L. Caspeta, M. A. Caro, T. Ponce, A. Martinez, "Enzymatic hydrolysis at high-solids loadings for the conversion of agave bagasse to fuel ethanol", *Applied Energy*, Vol. 113, pp. 277-286, 2014.
- [16] A. Tapia, E. Ibarra, E. Razo, "Hydrogen and methane production potential of agave bagasse enzymatic hydrolysates and comparative techno-economic feasibility implications", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, no. 33, pp. 17792-17801, 2019.
- [17] V. Duran, S. Hernández, I. Ortíz, "Evaluation of steam explosion pretreatment and enzymatic hydrolysis conditions for agave bagasse in biomethane production", *BioEnergy Research*, vo. 14, pp. 1328-1337, January 2021.
- [18] J. J. Montoya, D. K. Olmos, R. Palomo, V. Montiel, A. G. Mari, E. Razo, "Improvement of continuous hydrogen production using individual and binary enzymatic hydrolysates of agave bagasse in suspended-culture and bio-film reactors", *Bioresource Technology*, vol. 283, pp. 251-260, 2019.
- [19] C. A. Contreras, H. O. Méndez, L. Arellano, F. Alatraste, E. Razo, "Continuous hydrogen production from enzymatic hydrolysate of Agave tequilana bagasse: effect of the organic loading rate and reactor configuration", *Chemical Engineering Journal*, vol. 313, pp. 671-679, 2017.
- [20] E. Blancarte, S. Corral, T. G. Domínguez, J. E. Lujan, J. R. Goche, E. Montiel, "Improving the physical, Mechanical and energetic Characteristics of Pine Sawdust by the addition of up to 40% Agave durangensis Gentry Pellets", *Energies*, 2022.



- [21] L. Chávez, H. Hinojosa, "Bagasse from the mezcal industry as an alternative renewable energy produced in arid lands", *Fuel*, vol. 89, no. 12, pp 4049-4052, 2010.
- [22] I. Obernberger, G. Thek, "The pellet handbook the production and thermal utilization of biomass pellets", Reino Unido, earthscan, 2010.
- [23] D. Sjoding, E. Kanoa, P. Jensen, "Developing a wood/densified biomass industry in Washington state: opportunities and challenges". United States of America, Washington State University Extension energy program, 2013.
- [24] Z. Kocsis, E. Csanády, Theory and practice of wood pellet production. Springer editorial, 2019.
- [25] M. S. Alonso, L. Rigal, "Caracterización y valorización del bagazo de agave tequilana weber de la industria del tequila", *Revista chapin-go serie horticultura*, vol. 3, no. 2, pp. 31-19, 1997.
- [26] A. Liñán, S. M. de la Parra, M. T. Garza, R. B. García, E. Soto, F. J. Cerino, "Characterization and thermal analysis of agave bagasse and malt spent grain", *J Therm Anal Calorim*, vol. 115, no. 1, pp. 751-758, 2014.
- [27] S. Kestur, T. H. S. Flores, L. P. Dos Santos, J. Dos Santos, I. Mazzaro, A. Mikowski, "Characterization of blue agave bagasse fibers of mexico", *Composites: Part A*, vol. 45, pp. 153-161, 2013.
- [28] G. S. Cano, A. Rosas, E. Vivaldo, L. Flores, M. A. Vega, M. G. Hernández, A. Martinez, "Determination of the composition of lignocellulosic biomasses from combined analyses of thermal, spectroscopic, and wet chemical methods", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 60, pp. 3502-3515, 2021.
- [29] J. A. Japhet, B. S. Luka, I. B. Maren, S. G. Datau, "The potential of wood and agricultural waste for pellet fuel development in Nigeria – A technical review", *IJEAST*, vol. 4, no. 11, pp. 598-607, Marzo 2020.
- [30] D. Trejo Zamudio, "Producción de pellets de residuos de cultivo de frijol con máximo contenido energético", tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, UAQ, Querétaro, Qro. 2018.
- [31] N. Hernández, C. Gutiérrez, J. F. García, A. A. Feregrino, M. Toledano, "Valorización de cascarilla de arroz y paja de frijol mediante la produc-

- ción de pellets combustibles: un enfoque experimental y de modelado”, *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 21, no.2, 2022.
- [32] L. A. Rodríguez, “Producción de pellets combustibles de cascabillo de café con máximo poder calorífico”, tesis de maestría, Facultad de ingeniería, UAQ, Querétaro, Qro. 2021.
- [33] I. Montero, M. T. Miranda, F. J. Sepúlveda, J. I. Arranz, M. J. Trinidad, C. V. Rojas. *Analysis of pelletizing of wastes from cork industry*. Dyn Energ. Sostenibilidad 2014, 3, DOI:10.6036/ES7011.
- [34] I. Mediavilla, M. J. Fernández, L. S. Esteban, “Optimization of pelletization and combustion in a boiler of 17.5 kWth for vine shoots and industrial cork residue”. *Fuel Processing Technology*. 2009, 90, 621–628.
- [35] C. Serrano, E. Monedero, M. Lapuerta, H. Portero, “Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets”. *Fuel Processing Technology*. 2011, 92, 699–706
- [36] International Organization for Standardization, “ISO 18125:2017 Solid biofuels – Determination of calorific value”, 18125, Abril, 2017.
- [37] Asociación Española de Normalización, “UNE-EN 14774-1:2010 Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 1: Humedad total. Método de referencia”, 14774-1, Agosto 14, 2010.
- [38] Asociación Española de Normalización, “UNE-EN ISO 18122:2016 Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de ceniza”, 18122, Abril 13, 2016.
- [39] Asociación Española de normalización, “UNE-EN 15148:2010 Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de materias volátiles”, 15148, Abril 06, 2016.
- [40] Analytical Methods Committee, “CHNS Elemental Analysers”, AMCTB 29, April. 2008.
- [41] C. Vasilatos, C. Dimitris, T. Theodorou, C. Stouraiti, M. Andreadi, N. Koukouzas, “A comparative study of selected properties of biomass and coal fuels from Greece”, *Materials Proceedings*, vol. 5, 2021.
- [42] Solid biofuels – Fuel specifications and classes – part 2: graded wood pellets, ISO 17225-2:2021, 2021.



- [43] T. Miranda, I. Montero, F. J. Sepúlveda, J. I. Arranz, C. V. Rojas, S. Nogales, "A review of pellets from different sources", *Materials Proceedings*, vol. 8, pp. 1413-1427, 2015.
- [44] L. E. Young, C. Kyung-Suk, R. H. Wook, "Simultaneous removal of H₂S and NH₃ in biofilter inoculated with acifithiobacillus thiooxidans TAS", *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 99, no. 6, pp. 611-615, 2005.
- [45] K. Rana, N. Rana, B. Singh, "Applications of sulfur oxidizing bacteria", *Physiological and Biotechnological Aspects of Extremophiles*, R. Salwan y V. Sharma, Eds. Academic Press, 2020, pp. 131-136.
- [46] Consejo Regulador del Tequila, *Manual del técnico Tequilero*. Consejo Regulador del tequila, 2019.
- [47] I. Inamuddin, M. I. Ahamed, R. Boddula, T. A. Altahi, *Applied soil chemistry*. Wiley editorial, 2021.
- [48] M. A. Abdoli, A. Golzary, A. Hosseini, P. Sadeghi, *Wood Pellets as a renewable source of energy from production to consumption*. Springer Editorial, 2018.

EVALUACIÓN DEL EFECTO ACARICIDA DE *PLECTRANTHUS SP.* MEDIANTE LA PRUEBA *IN VITRO* DE PAQUETE LARVAL (LPT) PARA EL CONTROL DE *RHIPICEPHALUS MICROPLUS*

EVALUATION OF THE ACARICIDAL EFFECT OF *PLECTRANTHUS SP.* THROUGH THE *IN VITRO* LARVAL PACKET TEST (LPT) TO CONTROL *RHIPICEPHALUS MICROPLUS*

Luis David Muñoz Contreras
Octavio Roldán Padrón
Iván Gómez Sánchez
Gabriela Aguilar Tipacamú
Alma Rosa Martínez Ramos*

Universidad Autónoma de Querétaro, México

*alma.rosa.martinez@uaq.mx



Resumen

El control de garrapatas es una actividad fundamental para la producción bovina en pastoreo. Actualmente las garrapatas han desarrollado resistencia a diferentes ixodicidas, provocando cuantiosas pérdidas en la producción ganadera, contaminación ambiental y afectaciones a la salud de quienes aplican estos productos. Por tal razón, es importante explorar alternativas como el uso de extractos naturales para el control de este ácaro. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto acaricida del extracto de la planta comúnmente conocida como "vaporub" (*Plectranthus* spp) en el control de garrapata *Rhipicephalus microplus*. Se obtuvo el extracto de la planta con un rotavapor para su posterior evaluación mediante una prueba *in vitro* de paquete larval (LPT, por sus siglas en inglés) durante 24 hrs. Asimismo, se valoraron los tratamientos con las siguientes concentraciones del extracto: T1, 0.05 %; T2, 0.50 % y T3, 5.00 %, más el control (tricloroetileno y aceite de oliva en una relación 2:1). A partir de 4.30 kg de materia fresca vegetal se consiguieron 38 ml de extracto de *Plectranthus*, lo que representó un rendimiento del 0.97 %. El tratamiento T3 mostró el porcentaje de mortalidad de larvas más alto (9.64 ± 0.88 %); sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos ($p \leq 0.05$). A partir de los resultados, se propuso evaluar el extracto en mayores concentraciones durante diferentes estadios de la garrapata y a un mayor tiempo de exposición, para lograr un mayor porcentaje de mortalidad.

Palabras clave: acaricida natural, ganado bovino, *Plectranthus* spp, prueba de paquete larval (LPT), *Rhipicephalus microplus*, salud animal.

Tick control is a fundamental activity for cattle grazing production. Currently, ticks have developed resistance to different ixodicides, causing substantial losses in cattle production, environmental contamination and health problems for those who apply these products. For this reason, it is important to explore alternatives such as the use of natural extracts for the control of this mite. The objective of this work was to evaluate the acaricidal effect of the extract of the plant commonly known as "vaporub" (*Plectranthus* spp) in the control of the tick *Rhipicephalus microplus*. The plant extract was obtained with a rotary evaporator for subsequent evaluation by means



Abstract

of an *in vitro* larval package test (LPT) for 24 hrs. Treatments with the following concentrations of the extract were also evaluated: T1, 0.05 %; T2, 0.50 % and T3, 5.00 %, plus the control (trichloroethylene and olive oil in a 2:1 ratio). From 4.30 kg of fresh vegetable matter, 38 ml of *Plectranthus* extract were obtained, which represented a yield of 0.97 %. Treatment T3 showed the highest percentage of larval mortality (9.64 ± 0.88 %); however, no significant differences were found among treatments ($P \leq 0.05$). Based on the results, it was proposed to evaluate the extract at higher concentrations during different tick stages and at a longer exposure time, in order to achieve a higher mortality rate.

Keywords: animal health, cattle, *Rhipicephalus microplus*, *Plectranthus spp*, larval packet test (LPT), natural acaricidal.

Introducción

La garrapata *Rhipicephalus microplus* y las enfermedades que transmite causan ingentes pérdidas económicas a la producción bovina, por lo que son una de las mayores amenazas que enfrenta la ganadería bovina [1]. Las pérdidas económicas causadas por este ácaro están calculadas en México y el mundo en el orden de los 573 millones y 2.5 billones de dólares anuales, respectivamente [2]. Los daños que provocan las garrapatas sobre la salud de los animales se clasifican en directos e indirectos, siendo las primeras lesiones en la piel, pérdida de sangre y muerte por toxicidad, como reacción a la mordedura. También pueden ocasionar disminución de los parámetros productivos (leche y carne) y reproductivos. Por otro lado, los daños indirectos se deben a la transmisión de agentes patógenos como *Babesia bigemina*, *Babesia bovis* y *Anaplasma marginale*, causantes de la babesiosis y anaplasmosis bovina [3]. Los métodos para el control de garrapatas se fundamentan en el



El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto acaricida del extracto de la planta comúnmente conocida como “vaporub” (*Plectranthus* sp) en el control de garrapata *Rhipicephalus microplus*.

uso intensivo de acaricidas sintéticos, como los organofosforados y piretroides [4]. El mercado mexicano dispone de productos acaricidas, donde uno de los principales es la ivermectina (lactonas marocíclicas), que se obtiene por la fermentación de *Streptomyces spp.*; posee efectos de actividad tanto nematicida como acaricida [5]. Dentro de sus funciones se encuentra la de combatir garrapatas y moscas, aunque el riesgo de generar poblaciones de garrapatas resistentes es mayor. Asimismo, se ha demostrado que la aplicación de lactonas macrocíclicas tiene un impacto ambiental negativo: en fincas donde los animales han sido tratados con estas, disminuye la diversidad y abundancia de las poblaciones de escarabajos estercoleros, fundamentales por desin-

tegrar la materia fecal, la cual posteriormente se reintegra al suelo [6]. Hoy en día los productos sintéticos son los principales autores en la problemática del medio ambiente, debido a que los residuos generan daños al planeta como la contaminación del suelo, aire y agua. Además, si son empleados de forma incorrecta pueden intoxicar al aplicador.

Por otro lado, los extractos de diversas plantas han manifestado un efecto acaricida. Estos no afectan al medio ambiente y disminuyen el desarrollo de resistencia por parte de la garrapata. Además, los productores han recurrido a opciones de bajo costo en prácticas de higiene animal por lo que el uso de estos extractos se convierte en una alternativa para el control de este ácaro [7], [8], [9], [10]. En este sentido, *Plectranthus spp.* es un arbusto carnoso, de hojas suculentas y aromáticas que se encuentra de forma silvestre en varias regiones de Jalpan de Serra, Querétaro. La planta contiene una mezcla de compuestos bioactivos, como esteroides, triterpenos, sesquiterpenos y monoterpenoides [11], [12], [13]. De acuerdo con Ochoa *et al.* el mecanismo de acción de los monoterpenoides en larvas de garrapata es la neurotoxicidad, similar a la producida por los organofosforados tras la inhibición de la enzima acetilcolinesterasa. El efecto neurotóxico se produce cuando, en la transmisión del impulso nervioso, las vesículas de las terminales nerviosas liberan acetilcolina, que después ingresa a la sinapsis a través de la unión a su receptor. La inhibición de la enzima acetilcolinesterasa genera una acumulación de acetilcolina y en consecuencia ocurre una alteración en el impulso nervioso [15], [16]. Esto sugiere que *Plectranthus* podría tener un efecto acaricida en el estadio larval, aunque las investigaciones al respecto

son inexistentes. Sumado a lo anterior, se realizaron pruebas empíricas en la localidad de Jalpan de Serra que consistieron en crear extractos de agua con las hojas frescas de la planta para su posterior aplicación en la piel de los animales con la ayuda de una mochila aspersora. Las pruebas mostraron el potencial de esta planta para el control de garrapatas. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto acaricida de *Plectranthus* mediante una prueba de paquete larval contra *Rhipicephalus microplus*.

El presente proyecto se llevó a cabo mediante una colaboración entre la Facultad de Ingeniería campus Conca y la Facultad de Ciencias Naturales campus Juriquilla de la Universidad Autónoma de Querétaro. El estudio fue aprobado por el comité de ética de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (clave CEAIFI-158-2019-TL).

Materiales y Métodos

Materia vegetal

Se recolectaron de forma manual las hojas sanas de plantas de vaporup (*Plectranthus spp.*) a las 8:00 horas aproximadamente. El material vegetal se obtuvo de la finca El Tigre, ubicada en la comunidad Embocadero, en Jalpan de Serra, Querétaro.

Obtención del extracto de *Plectranthus spp.*

Se deshidrataron 4.30 kg de materia vegetal en una estufa a 40 °C durante 3 días. Posteriormente, el resultante se maceró con metanol al 80 % en una relación de 1:10 (w/v). La solución se agitó por 16 horas y se filtró con un papel de 0.22 µm. Finalmente, la muestra se colocó en un rotavapor a una temperatura de 40 °C, una presión de 180 milibares y una temperatura del agua de 2-5 °C. De acuerdo con Jyoti et al. [7], se evaluaron tres concentraciones del extracto obtenido (T1: 0.05 %, T2: 0.50 %, T3: 5.00 %) más el control (tricloroetileno y aceite de oliva en una relación 2:1).



Modelo *in vitro*: prueba de paquete larval (LPT)

Las larvas de *Rhipicephalus microplus* utilizadas en el experimento pertenecen a la cepa media joya (referente nacional susceptible a ixodicidas), proporcionada por el Laboratorio de Artropodología del CENID-PAVET del Centro Nacional de Servicios de Constatación en Salud Animal (CENAPA) al Laboratorio de Microbiología Veterinaria de la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad Autónoma de Querétaro. La prueba de paquete larval se realizó de acuerdo con [7]. Brevemente, se recortaron 12 cuadros (para los tratamientos y sus repeticiones) de papel filtro de 8.5 cm de largo por 7.5 cm de ancho. Los tratamientos se prepararon al diluir tricloroetileno y aceite de oliva en una relación 2:1 para el control, y el extracto a las concentraciones ya mencionadas. Se agregó un volumen de 0.7 ml de cada dilución preparada a los cuadros de papel filtro y se dejaron evaporar con los tratamientos durante 2 horas. Posteriormente éstos se doblaron por la mitad y se colocaron clips metálicos a los lados, formando paquetes para la recepción de las larvas. Se colocaron 100 larvas en cada paquete, y la parte superior se selló con un tercer clip. Los paquetes con larvas se incubaron a 28 ± 1 °C y 85 ± 5 % de humedad relativa durante 24 horas.

Conteo de larvas

Transcurridas 24 horas, se abrieron los paquetes y se contaron las larvas vivas y muertas con un contador manual de 4 dígitos. Las larvas que movían las patas, pero no caminaban fueron consideradas muertas. Los resultados se compararon con el tratamiento control (tricloroetileno y aceite de oliva). De acuerdo con [17], el porcentaje de mortalidad corregido de larvas (*MC* %) se realizó aplicando la fórmula de Abbott [18]:

$$MC \% = \frac{Mortalidad_t - Mortalidad_c}{100 - Mortalidad_c} \times 100$$

Donde, $Mortalidad_t$ denota el porcentaje de mortalidad del tratamiento y $Mortalidad_c$ indica la mortalidad del control.

Análisis estadístico

Los datos experimentales se sometieron a un análisis ANOVA y a una prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Los resultados se expresan como la media \pm la desviación estándar.

Resultados y discusión

Obtención del extracto

A partir de 4.30 kg de materia fresca vegetal se obtuvieron 38 ml de extracto de *Plectranthus*, lo equivalente a un rendimiento del 0.97 %. Esta tasa de los aceites esenciales adquiridos a partir de las plantas varía según el método utilizado para la extracción. Comúnmente se emplea el de hidrodestilación para obtener el aceite esencial de *Plectranthus*; sin embargo, existen otros, como la destilación por arrastre de vapor, extracción con CO₂ supercrítico y extracción con hexano, cuyos rendimientos son de 0.55, 1.40 y 6.52 %, respectivamente [13]. Por otro lado, Dao et al. [19] realizaron la extracción de los aceites esenciales de esta misma planta mediante la hidrodestilación asistida por microondas, alcanzando un rendimiento de 0.1374 %. Adicionalmente, Samad et al. [20] también aprovecharon la tecnología de microondas para optimizar el rendimiento de la extracción, así como el equipo rotavapor y el etanol como solvente, llegando a un rendimiento de hasta 39.81 %. El método empleado en el presente trabajo fue la destilación mediante un equipo rotavapor y metanol como solvente. El funcionamiento de este mecanismo consiste en evaporar sustancias que luego serán condensadas y separadas en sus diferentes componentes. El equipo reduce la presión atmosférica para separar los solventes del soluto y luego destilarlos en el tubo de condensación a baja temperatura; posteriormente son recolectados en el matraz correspondiente. Es similar a la destilación por arrastre de vapor, pero con la reducción de presión. De acuerdo con lo anterior, es posible que con el equipo rotavapor asistido por la tecnología de microondas y hexano como solvente se obtenga un mayor rendimiento en la extracción de los aceites esenciales de *Plectranthus*.



TABLA 1.

Porcentaje de mortalidad de larvas en la prueba de paquete larval.

TRATAMIENTO	CONCENTRACIÓN DEL EXTRACTO (%)	PORCENTAJE DE MORTALIDAD DE LARVAS
T1	0.05	8.36a ± 4.35
T2	0.50	7.12a ± 1.20
T3	5.00	9.64a ± 0.88
Control	0.00	0.22b ± 0.37

Los resultados se presentan como la media ± la desviación estándar. Letras diferentes indican diferencia significativa ($p \leq 0.05$).

Porcentaje de mortalidad a partir de la prueba *in vitro* de paquete larval

Los resultados de la prueba *in vitro* se calcularon a partir de la Ecuación (1). Las concentraciones evaluadas resultaron diferentes al control. El tratamiento T3 con una concentración de 5.00 % representó la mortalidad más alta, aunque fueron inexistentes diferencias significativas entre los tratamientos.

La especie *Plectranthus* contiene una mezcla de esteroides y triterpenos, campesterol, α -amirina y β -amirina, así como mono y diterpenoides, involucrados en la resistencia de esta planta contra insectos y microorganismos [12], [21]. Más del 85 % de la literatura de *Plectranthus* se basa en los valores terapéuticos de este género, sus propiedades nutricionales y hortícolas atribuidas a su naturaleza aromática, así como su capacidad productiva de aceite esencial [22]; sin embargo, a pesar de que sus componentes monoterpenoides causan una neurotoxicación similar a la de los organofosforados contenidos en acaricidas comerciales, son inexistentes los estudios que reporten actividad plaguicida sobre esta planta.

Un estudio de la Universidad de Nuevo León evaluó la actividad acaricida de extractos metanólicos de la semilla de *Litchi chinensis* y de las hojas de *Artemisia ludoviciana* y *Cordia boissieri* [10]. La evaluación se realizó en dos poblaciones de garrapatas, una del estado de Nuevo León y otra de Veracruz, a través de una prueba *in vitro* con concentraciones al 5.00, 10.00 y 15.00 %. Como parte de sus resultados, el extracto de *L. chinensis* mostró porcentajes de mortalidad del 99.44 y 99.73 %; el de *A. ludoviciana*, de 89.34 y 89.21 %; el de *C. boissieri*, 33.04 y 10.33 % para las poblaciones de Nuevo León y Veracruz, respectivamente. Además, Pajuelo

[9] reportó porcentajes de mortalidad del 78.30, 82.50, 88.30 y 100 %, aplicando concentraciones de 6.00, 8.00, 10.00, 15.00 y 25.00 % del extracto de *Sapindus saponaria*. Ambos estudios experimentaron con dosis más altas que las utilizadas en el presente, además de haber empleado la prueba de inmersión de larvas, muy similar a la prueba LPT, pero con un paso adicional: las larvas se colocan en tubos tipo Eppendorf, a los que se les agrega la solución del extracto y se mantienen en agitación durante 10 min. Es posible que este paso adicional, así como las concentraciones evaluadas, permitieran mayores porcentajes de mortalidad en aquellos estudios.

Otros autores evaluaron los aceites esenciales de *Syzygium aromaticum*, *Cinnamomum zeylanicum* y *Cymbopogon citratus* en una prueba LPT a concentraciones en un rango de 0.05-5.00 %, mismas concentraciones utilizadas en el presente estudio. Entre sus resultados reportaron valores LC50 de 0.301, 0.086 y 0.246 %, respectivamente. El LC50 determina la concentración letal de una sustancia para cierto organismo en un 50 % de la población total expuesta a dicha sustancia. Dicho de otro modo, a concentraciones de 0.301, 0.086 y 0.246 %, lograron alcanzar el 50 % de mortalidad de las larvas. Además, observaron una mortalidad dependiente de la concentración [7]. Otros estudios como el elaborado por Thorsell et al. [23], evidencian una acción repelente de algunas plantas contra ninfas de garrapata. Los autores evaluaron extractos etanólicos de abedul, citronella, trébol, eucalipto, geranio, lavanda, hierbabuena y girasol a una concentración del 10.00 %, obteniendo un rango de mortalidad del 80 al 90 %, 8 horas después de la aplicación. Para este estudio, además de usar una concentración más alta, también se contempló un estadio distinto de la garrapata.

Previo a la evaluación *in vitro* realizada en este trabajo, se había observado de manera empírica un efecto acaricida potencial de *Plectranthus* spp. en las cepas de garrapatas localizadas en Jalpan de Serra, Querétaro; sin embargo, fue en un estadio distinto al de esta evaluación, no sobre el larvario. Así, los bajos porcentajes de mortalidad obtenidos en este análisis están relacionados tanto en la concentración como con el estadio de las garrapatas evaluado. El efecto acaricida de los extractos de una planta depende de factores como la concentración, el estadio de la garrapata, la especie vegetal y tipo de compuestos bioactivos que contiene, el método de evaluación y el tiempo de exposición a los tratamientos.



Por otro lado, la eficiencia en la extracción de compuestos bioactivos es un aspecto crítico en el estudio de los mismos. Resulta de la interacción de la capacidad de solubilización del solvente con la solubilidad relativa de los compuestos en la muestra. En este sentido, los solventes deben establecer puentes de hidrógeno, específicamente para lograr la solvatación y liberación de las especies unidas a la matriz. La polaridad de los solventes rige la selectividad del sistema de partición y, por lo tanto, determina las especies fenólicas que se pueden distribuir en el extracto [24], [25]. El uso de otros solventes, como el hexano, podría no solamente mejorar el rendimiento del extracto, sino también la biodistribución de los compuestos, por lo que podría resultar en un mayor índice de mortalidad sobre las garrapatas.

Conclusiones

En la evaluación del efecto acaricida de los extractos de las plantas y sus compuestos bioactivos, es importante considerar los factores que influirán en el resultado, como las técnicas y el extractante utilizado en la obtención de dichos compuestos. Después, resulta imprescindible prestar atención a las concentraciones de los extractos y el estadio de la garrapata. Los resultados de este estudio sugieren que *Plectranthus* spp. blande un efecto acaricida, debido a una diferencia significativa en comparación con el control. No obstante, en estudios posteriores será necesario evaluar condiciones adicionales en los factores mencionados. La presente investigación establece una pauta para el análisis del comportamiento de esta planta contra las garrapatas, pero además ofrece una alternativa accesible para los productores en la región de la Sierra Gorda de Querétaro, ya que la especie se encuentra disponible de manera silvestre.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería campus Conca y al laboratorio de microbiología veterinaria de la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad Autónoma de Querétaro, por su apoyo para llevar a cabo este estudio.

Fuentes de financiamiento

Este proyecto fue solventado por la Facultad de Ingeniería campus Con- cá, el laboratorio de microbiología veterinaria de la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad Autónoma de Querétaro y la SEDESU a través del Corredor Regional de Formación Integral para la Sustentabilidad en el Estado de Querétaro (CORESU) con clave 06/01-COPROADESUQ-05-08-2021.



Referencias

- [1] L. Mayahua Quiahua, "Actividad acaricida de la semilla del árbol de neem (*Azadirachta indica*) sobre garrapatas (*Rhipicephalus microplus*)", Tesis de maestría, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, 2015. <http://cdigital.uv.mx/handle/123456789/39514>
- [2] R. I. Rodríguez Vivas, L. Grisi, A. A. P. De León, H. S. Villela, J. F. Torres Acosta, H. F. Sánchez, D. R. Salas, R. R. Cruz, F. Saldierna y D. G. Carrasco, "Potential economic impact assessment for cattle parasites in Mexico", *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, vol. 8, no. 1, pp. 61-74, 2017. Doi: <https://doi.org/10.22319/rmcp.v8i1.4305>
- [3] D. I. Domínguez García, R. Rosario Cruz, C. Almazán García, J. A. Saltijeral Oaxaca y J. De la Fuente, "*Boophilus microplus*: Aspectos Biológicos y moleculares de la resistencia a los acaricidas y su impacto en la salud animal", *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, vol. 12, no. 2, pp. 181-192, 2010.
- [4] A. Araque, S. Ujueta, R. Bonilla, D. Gómez y J. Rivera, "Resistencia a acaricidas de *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* de algunas explotaciones ganaderas de Colombia", *U.D.C.A Act. & Div. Cient.*, vol. 17, no. 1, pp. 161-170, 2014.
- [5] O. Olmedo, E. E. Bohrer de Azevedo y C. Tobal, "Efecto de la concentración de ivermectina sobre el control de parásitos internos y el desempeño productivo de bovinos", *Ciencia Veterinaria*, vol. 17, no. 1, pp. 19-34, 2015. <https://cerac.unlpam.edu.ar/index.php/veterinaria/article/view/170>
- [6] G. Basto Estrella, R. I. Rodríguez Vivas, H. Delfín González, E. Reyes Novelo, "Escarabajos estercoleros (*Coleoptera: Scarabaeidae: Scarabaeinae*) de ranchos ganaderos de Yucatán, México", *Revista Mexicana de Biodiversidad*, vol. 83, no. 2, pp. 380-386, 2012.
- [7] Jyoti, N. K. Singh, H. Singh, N. Mehta y S. S. Rath, "In vitro assessment of synergistic combinations of essential oils against *Rhipicephalus*

- (*Boophilus microplus* (Acari: Ixodidae)", *Experimental Parasitology*, vol. 201, pp. 42-48, 2019.
- [8] G. N. Njoroge y R. W. Bussmann, "Herbal usage and informant consensus in ethnoveterinary management of cattle diseases among the Kikuyus (Central Kenya)", *Journal of Ethnopharmacology*, vol. 108, no. 3, pp. 332-9, 2006. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16879938/>
- [9] P. D. Pajuelo, "Evaluación *in vitro* de los extractos crudos de *Sapindus saponaria* sobre huevos y larvas *Boophilus microplus*", Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María, Perú, 2012.
- [10] G. Romario, "Evaluación de alternativas fitoterapéuticas y acaricidas sintéticos sobre *Rhipicephalus* (*Boophilus*) *microplus* (Acari: Ixodidae)", Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, 2020. <http://eprints.uanl.mx/19988/1/1080314471.pdf>
- [11] C. W. Lukhoba, M. S. Simmonds y A. J. Paton, "*Plectranthus*: a review of ethnobotanical uses", *Journal of Ethnopharmacology*, vol. 103, no. 1, pp. 1-24, 2006. pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16289602/
- [12] A. R. Osman, "Genetic variability and total phenolic compounds among six *Coleus blumei* varieties using RAPD", *Analysis Journal of Applied Sciences Research*, vol. 9, no. 3, pp. 1395-1400, 2013.
- [13] G. Arumugam, M. K. Swamy y U. R. Sinnia, "*Plectranthus amboinicus* (Lour.) Spreng: Botanical, Phytochemical, Pharmacological and Nutritional Significance", *Molecules*, vol. 21, no. 4, pp. 369, 2016. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27043511/>
- [14] S. A. Ochoa, L. E. Sánchez Torres, G. V. Nevárez Moorilón, A. D. Camacho y B. Noguera Torres, "Essential oils and their components as an alternative in the control of mosquito vectors of disease", *Biomedica*, vol. 37, no. 0, pp. 224-243, 2017. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29161495/>
- [15] M. Orias Vásquez, "Intoxicación por organofosforados", *Revista Médica Sinergia*, vol. 5, no. 8, 2020. Doi: <https://doi.org/10.31434/rms.v5i8.558>
- [16] P. J. Houghton, Y. Ren y M. J. Howes, "Acetylcholinesterase inhibitors from plants and fungi", *Natural Product*



Reports, vol. 23, no. 2, pp. 181-199, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1039/b508966m>

- [17] B. Avinash, R. Venu, M. Alpha Raj, K. Srinivasa Rao, C. Srilatha y T. N. Prasad, "In vitro evaluation of acaricidal activity of novel green silver nanoparticles against deltamethrin resistance *Rhipicephalus (Boophilus) micropalus*", *Veterinary Parasitology*, vol. 237, pp. 130-136, 2017. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28246003/>
- [18] W. S. Abbott, "A Method of Computing the Effectiveness of an Insecticide", *Journal of Economic Entomology*, vol. 18, no. 2, pp. 265-267, 1925. <https://doi.org/10.1093/jee/18.2.265>^a
- [19] T. P. Dao, D. C. Nguyen, D. T. Nguyen, T. H. Tran, P. T. Nhan Nguyen, N. T. Hong Le, X. T. Le, D. H. Nguyen, D. V. Vo y L. G. Bach, "Extraction Process of Essential Oil from *Plectranthus amboinicus* Using Microwave-Assisted Hydrodistillation and Evaluation of it's Antibacterial Activity", *Asian Journal of Chemistry*, vol. 31, no. 5, pp. 977-981, 2019. DOI: <https://doi.org/10.14233/ajchem.2019.21667>
- [20] N. A. Samad, D. N. A. Zaidel, E. Salleh, A. H. M. Yusof, D. J. Dailin y D. N. A. Zaidel, "Optimization of *Plectranthus amboinicus* (Lour.) Spreng extraction process using microwave-assisted technique", *Chemical Engineering Transactions*, vol. 72, pp. 397-402, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1972067>
- [21] J. Grayer, M. R. Eckert, A. Lever, N. C. Veitch, G. C. Kite y A. J. Paton, "Distribution of exudate flavonoids in the genus *Plectranthus*", *Biochemical Systematics and Ecology*, vol. 38, no. 3, pp. 335-341, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bse.2010.01.014>
- [22] R. H. Alasbahi y M. F. Melzig, "Plectranthus barbatus: a review of phytochemistry, ethnobotanical uses and pharmacology - Part 1", *Planta Med*, vol. 76, no. 7, pp. 653-661, 2010. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20178070/>
- [23] W. Thorsell, A. Mikiver y H. Tunón, "Repelling properties of some plant materials on the tick *Ixodes ricinus* L", *Phytomedicine*, vol. 13, no. 1-2, pp. 132-134, 2006. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16360943/>
- [24] O. R. Alara, N. H. Abdurahman y C. I. Ukaegbu, "Extraction of phenolic com-

pounds: A review", *Current Research in Food Science*, vol. 4, pp. 200-214. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33899007/>

- [25] E. Gil Martín, T. Forbes Hernández, A. Romero, D. Cianciosi, F. Giampieri y M. Battino, "Influence of the extraction method on the recovery of bioactive phenolic compounds from food industry by-products", *Food Chemistry*, vol. 1, no. 378. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35085901/Referencias>



INSECTOS COMO ALIMENTO Y PARA EL DESARROLLO DE UNA AGRICULTURA SOSTENIBLE

INSECTS AS FOOD AND FOR THE DEVELOPMENT OF A
SUSTAINABLE AGRICULTURE

Ema Alejandra Ferruzca Campos
Ramón Gerardo Guevara González
Rosario Guzmán Cruz*

Universidad Autónoma de Querétaro, México

*rosario.guzman@uaq.mx



Resumen

El crecimiento poblacional de los últimos años ha tenido implicaciones importantes para la seguridad alimentaria debido a la demanda cada vez mayor de alimentos. Sobre este contexto es que ha ganado relevancia la exploración de alternativas para la producción de alimentos con alta calidad nutricional y aptos tanto para consumo humano como animal. Por otra parte, la producción de insectos como fuente potencial de alimentos (ricos en proteínas y nutrientes) también abre oportunidades de crecimiento para el sector industrial a través de la elaboración de alimentos para consumo humano y animal, lo que representa una alternativa sostenible que contribuye a la seguridad alimentaria. De igual modo, el sector agrícola se beneficia al utilizar el frass de insectos como un subproducto bioestimulante, fertilizante orgánico o sustituto de plaguicidas, puesto que promueve el crecimiento de las plantas y aumenta su tolerancia al estrés abiótico y biótico. Por consiguiente, el objetivo de la presente revisión es sistematizar la información sobre la producción de insectos como fuente alternativa de proteínas, para consumo humano y animal. Asimismo, se pretende contribuir a la búsqueda de fuentes orgánicas de nutrientes para el suelo a través del uso de residuos de insecto como bioestimulante, elicitor o fertilizante, lo que contribuye al desarrollo de una agricultura sostenible.

Palabras clave: bioestimulante, fertilizante, frass de insecto, proteínas.

The population growth in recent years has significant implications for food security due to the increasing demand for food. Therefore, exploring alternative options for producing high-quality, nutritionally rich food for both human and animal consumption is important. In addition, insect waste or frass can be utilized as a source of fertilizer or bio-stimulant in crops due to its high nitrogen content. Thus, the objective of this review is to systematize information on insect production as an alternative source of protein for human and animal consumption, as well as to contribute to the search for organic sources of nutrients for the soil through the use of insect waste (frass) obtained during their production as a bio-stimulant, elicitor,



Abstract

or fertilizer. This contributes to the development of sustainable agriculture. Due to the advantages of insect production as a potential source of protein and nutrients, significant opportunities for growth are opening up in the industrial sector through the production of food for human and animal consumption. This sustainable alternative contributes to food security. Moreover, the agricultural sector benefits from utilizing insect frass as a byproduct, serving as a biostimulant, organic fertilizer, or pesticide substitute, promoting plant growth and increasing their tolerance to abiotic and biotic stresses.

Keywords: biostimulant, fertilizer, insect frass, proteins.

Introducción

Desde mediados del siglo pasado, el crecimiento poblacional se ha visto reflejado en cifras cada vez más desmesuradas. En 1950 la población mundial se estimaba en 2500 millones de personas, mientras que para noviembre de 2022 el número había aumentado a 8000 millones. Bajo dicha propensión, se espera que en los próximos 30 años la población mundial aumente en 2000 millones de personas, de manera que para 2050 a nivel mundial habría 9700 millones de habitantes, que podrían llegar a un máximo de casi 10400 millones alrededor del 2100 [1]. Tales tendencias conllevan implicaciones para la seguridad alimentaria debido a que, en paralelo al crecimiento poblacional, la demanda de alimentos es cada vez mayor.

Los alimentos de origen animal son una gran fuente de proteína, sin embargo, el sector del que son obtenidos, el ganadero, es uno de los principales generadores de gases de efecto invernadero, representando un 40 % de las emisiones en América Latina. Sumado a lo anterior, su impacto también se observa en el porcentaje de tierras y agua destinado a la producción de alimentos, pues el sector acapara el 80 % de los pastizales y suelos [2]. Por otro lado, en la producción agrícola se aplican fertilizantes y pesticidas sintéticos que pueden generar contaminación química en los ecosistemas marinos y terrestres, además de tener graves consecuencias para la salud [3]. De manera tal, el reto de la agricultura gira en torno a la implementación de insumos inocuos para el ambiente

y los seres vivos, aumentando la tolerancia al estrés en los cultivos y su calidad nutricional [4]. Por estos motivos, es trascendental explorar alternativas para la producción de alimentos.

En la medicina oriental tradicional, se explotan las propiedades farmacológicas de los insectos para el tratamiento de padecimientos como la gastritis, fiebre, tos, asma, artritis, reumatismo y diabetes [5], [6]. Dichos beneficios han motivado a realizar investigaciones científicas centradas en las ventajas de los insectos para la salud humana [7]. Por esta razón, se ha comenzado a examinar opciones innovadoras de materias para la producción de alimentos, entre las que se encuentran insectos como los grillos (*Acheta domesticus*), las larvas de mosca soldado negra (*Hermetia illucens*) y gusanos de la harina (*Tenebrio molitor*). Estos, además de utilizarse para el consumo humano, también constituyen una fuente de alimento para variadas especies de animales, tales como aves, reptiles, mamíferos pequeños y algunos peces [8]. Por ejemplo, en Perú la crianza y consumo masivo del grillo común (*Acheta domesticus*) es una alternativa tanto para alimento de ganado (y otros animales de granja), como para consumo humano. Esta opción destaca por su valor nutricional, costo de producción y leve impacto ambiental [9]. Además, los residuos muestran potencial como bioestimulante o generador de fertilizante en los cultivos, dado su elevado contenido de nitrógeno.

En Europa, desde la década de 2010 (Estados Unidos se ha unido a esta tendencia recientemente) se ha introducido con éxito una serie de productos naturales derivados de componentes celulares de plantas, animales y microorganismos. Dichos bioproductos actúan como bioestimulantes, elicitores o fertilizantes y contienen microorganismos vivos o compuestos derivados de bacterias, hongos, algas e insectos. Entre sus efectos destaca la promoción del crecimiento vegetal y la restauración de la fertilidad del suelo [10].

Por otro lado, una amplia gama de insectos comestibles, en forma cruda y procesada, ha sido parte de la dieta de numerosas culturas desde tiempos antiguos, un ejemplo de ello son las culturas mesoamericanas prehispánicas [11]. Recientemente, ha crecido el interés de investigación en el cultivo, procesamiento y consumo de insectos comestibles. Tales estudios tienden a enfocarse, principalmente, en erradicar las inseguridades alimentarias prevalentes en los países en desarrollo e impulsar la nutrición [12].



Con base en lo anterior, el objetivo de la presente revisión es sistematizar la información acerca de la producción de insectos como fuente proteínica alternativa para consumo humano y animal. De igual forma, se pretende aportar en la búsqueda de fuentes orgánicas de nutrientes para el suelo a través la conversión de *frass* (combinación de restos de insectos) en insumos para el desarrollo de una agricultura sostenible. En este sentido, la revisión bibliográfica se basa en un análisis exhaustivo de la literatura reportada, orientado a los insectos comestibles, cultivo para alimentación humana y animal, residuo de insectos y sus utilidades en la agricultura. La investigación se realizó en las principales bases de datos: Scopus, Web of Science, IEEE, Google Scholar, Scielo, ResearchGate y Wiley. Cabe destacar que se consideraron los estudios de los últimos diez años, con el fin de enfocar y acotar la cantidad de literatura a revisar, así como para identificar las tendencias y direcciones más actuales.

Producción de grillo como potencial alimento

En los últimos años, la cría de insectos como alimento para consumo humano y animal ha aumentado, debido a que son una fuente importante de proteínas y nutrientes [8], [9], [13]. Adicionalmente, los beneficios de producir insectos incluyen menor explotación de las tierras agrícolas, alta eficiencia de conversión alimentaria y elevadas tasas reproductivas. Sumado a lo anterior, los insectos demandan bajo consumo de recursos para su crianza y producción [14], puesto que pueden alimentarse con desechos vegetales obtenidos del sector agrícola o de la dieta humana, como tallos, hojas, frutas o verduras [16]. En consecuencia, comparada con la producción de carne, se considera una alternativa sostenible, además de un comestible totalmente orgánico, nutritivo y proveedor complementario de proteínas [15].

En otras instancias, según un informe de abril de 2019 [17], se estima que a nivel mundial existen más de 250 empresas que cultivan insectos, o derivados de ellos, para fines dietarios. De ellas, alrededor de 133, principalmente de Europa, Asia del Sur y América del Norte, se enfocan al consumo humano [8]. Entre los principales países productores se encuentran Bélgica, Brasil, Canadá, Dinamarca, España y Estados Unidos; estos dos últimos son los primeros en la fabricación de mosca

doméstica y mosca soldado. También destacan Finlandia, Francia (líder en gusano amarillo de las harinas), Holanda, Reino Unido, Vietnam y Tailandia (primer productor global de grillos con fines comestibles en el planeta). Por su parte, en México se industrializa la comida entomófaga en Oaxaca, Hidalgo, Puebla, Estado de México, Ciudad de México y Querétaro, entre otras entidades [15].

Características nutricionales

Los insectos se constituyen principalmente de proteínas, lípidos y ácidos grasos, carbohidratos, vitaminas, fibra, nitrógeno no proteico y cenizas [18], [19]; sin embargo, su composición se ve influida por el tipo de ejemplar, la etapa o estadio de crecimiento en el que se encuentre y la alimentación que lleve. En este sentido, las proteínas son el elemento principal de la composición nutricional de los insectos. Asimismo, dichos metabolitos poseen diversas propiedades tecnológicas, entre las que se encuentran solubilidad, capacidad de formar emulsiones, absorber agua y formar geles [18].

Por otro lado, como se puede ver en la Tabla 1, los insectos cuentan con aminoácidos esenciales [8]. De esta manera, el perfil de aminoácidos de los insectos comestibles cumple con los requisitos nutricionales para adultos publicados por la OMS, en términos de metionina, metionina+cisteína, fenilalanina y tirosina [8]. Por otra parte, al comparar la cantidad de proteína cruda presente en la harina de carne y la de soya contra la harina de larvas de mosca doméstica, se muestra que esta última contiene una mayor proporción [20].

En contrapartida, el exoesqueleto de los insectos (así como de los crustáceos) se compone principalmente de quitina, un polisacárido considerado como fibra, ya que es indigerible para los humanos y animales no rumiantes. De igual forma, contiene altas cargas de minerales como calcio y fósforo [21], por lo que algunos ejemplares presentan más hierro que la carne bovina [17]. Por consiguiente, el consumo de insectos constituye una fuente de proteínas, aminoácidos, ácidos grasos y minerales propicia para contribuir con el requerimiento nutricional de las personas en cualquier etapa de desarrollo [22].



TABLA 1.

Insectos comestibles más consumidos.

ORDEN [8]	INSECTO [8]	CONSUMO HUMANO (%) [17]	COMPOSICIÓN NUTRICIONAL		
			PROTEÍNAS (%) [19]	AMINOÁCIDOS [19]	EXTRACTO ETÉREO (%) [19]
Coleóptera	Escarabajos	31	20-71	Ácidos glutámico, aspártico, fenilalanina y alanina	
Lepidóptera	Orugas	18	13-64	Ácidos glutámico, aspártico, fenilalanina y alanina	6-77
Himenóptera	Abejas, avispas y hormigas	14	10-62	Ácido glutámico, leucina y alanina	
Ortóptera	Saltamontes, langosta y grillos	13	27-76		4-22
Hemíptera	Cigarras, fulgoromorfos, saltahojas, cochinillas y chinches	10		Prolina, leucina, tirosina, alanina, valina y metionina	6-46
Isóptera	Termitas	3			21-46
Efemeróptera	Libélulas	3	36-68		
Díptera	Moscas	2	36-70	Ácidos glutámico, aspártico, fenilalanina y alanina	
	Otros	5			

Alimentación humana

En el mundo, se destinan más de 2000 especies de insectos para consumo humano [23], principalmente en países tropicales. Entre ellas, los órdenes coleóptera con 634 especies, lepidóptera con 359, himenóptera con 302, ortóptera con 279, hemíptera con 220, isóptera con 63, odonata con 60 y díptera con 25 [24]. Como ventaja extra, pueden consumirse en las etapas de huevo, larva, pupa y adultez [25]. No obstante, en los países occidentales, hay un rechazo generalizado hacia la idea de consumir insectos, ya sea debido a motivos culturales o por considerarlos desagradables o

nocivos [17]. Aunado a esto, en los países occidentales escasea la regulación legislativa, lo que representa uno de los obstáculos más desafiantes para incluir a los insectos como fuentes de proteínas [25].

Los insectos pueden consumirse enteros, triturados o como harina. Esta última forma de preparación es la más utilizada para adiccionarla a alimentos de consumo humano, como pan, pastas, salsas, golosinas para niños, paté, barras energéticas, bebidas con y sin alcohol, galletas, tortillas de maíz, carne para hamburguesas y salchichas [8].

Algunas de las harinas más estudiadas y adoptadas como reemplazo proteico en alimentos para humanos provienen de los grillos domésticos (*Acheta domestica*), seguidos de las larvas de moscas soldado negro (*Hermetia illucens*) y los gusanos de la harina (*Tenebrio molitor*) [8].

Alimentación animal

La producción de insectos para la formulación de harinas alternativas a las de soya, maíz y pescado y piensos para animales es una opción a las fuentes convencionales de nutrientes necesarios en la alimentación del ganado y las mascotas [26],[27]. Al igual que ocurre en la dieta humana, las especies recurrentes para alimentación animal son las larvas de mosca soldado negra, las del gusano de la harina y el grillo doméstico [17], [18]. Por otra parte, diversos estudios han mostrado que es posible reemplazar parcialmente la harina de pescado por harina de insectos sin comprometer el rendimiento y la calidad del producto [28], [29]. En este contexto, desde el año 2017 los reglamentos de la Unión Europea permiten la harina de larva de mosca soldado negra en la alimentación de especies acuáticas. En el caso de las aves, las inclusiones de harina de insecto son variables del 1 al 28 %, sin alteraciones observables en el rendimiento de los animales ni en las características organolépticas de la carne [8]. Por su parte, con las gallinas ponedoras no se han reportado efectos negativos sobre la producción de huevos o la calidad de los cascarones [30]. En la Tabla 2 se muestran las ventajas y desventajas de la inclusión de insectos para la alimentación humana y animal.



TABLA 2.

Principales ventajas y desventajas del consumo de insectos [8].

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Son ricos en proteínas, grasas buenas, calcio, hierro y zinc.	La legislación para productos elaborados a partir de insectos es escasa.
Producen menos gases de efecto invernadero que el ganado.	Gran parte de la población rechaza su consumo.
Los grillos necesitan 12 veces menos alimento que el ganado, 4 veces menos que las ovejas, y la mitad de alimento que los cerdos y los pollos de engorda para producir la misma cantidad de proteínas.	Las personas alérgicas a los crustáceos pueden presentar alergias a los insectos.
Pueden alimentarse de residuos biológicos y agropecuarios para transformarlos en nutrientes de alta calidad.	
Requieren menos agua y tierra que el ganado tradicional.	

***Frass* de insecto para una agricultura sostenible**

Los agricultores han tratado de maximizar sus cosechas a través de productos naturales que ayuden a mejorarlas. Para este fin, tradicionalmente se han ocupado bioestimulantes, tales como el estiércol, residuos líquidos o extractos de algas aplicables para aumentar el crecimiento de las plantas, sus frutos y rendimientos. No obstante, la mayoría son productos químicos que perjudican la estructura del suelo y disminuyen su fertilidad. Ante esta problemática surge la necesidad de contar con nuevas alternativas para producir alimentos de manera sostenible y así contrarrestar los efectos del uso excesivo de agroquímicos. Este reto también abre la puerta a la generación de tecnologías que prescindan del uso de combustibles fósiles y sean menos tóxicas para los ecosistemas.

Como se dijo anteriormente, la tendencia a aprovechar los insectos como alimento ha provocado la proliferación de empresas privadas dedicadas a la elaboración de productos derivados de insectos [17]. Sobre esta línea, un aspecto fundamental del proceso de crianza y producción en masa es la cantidad de residuos resultantes (exoesqueletos mudados y

excrementos), también conocidos como *frass* de insecto. Dicho remanente representa un subproducto importante dentro del sistema. Un estudio de la producción diaria de *frass* en la industria determinó que el gusano amarillo de la harina (*Tenebrio molitor*) puede consumir 220 g de alimento en forma de maíz y zanahorias. De tal proceso resulta una producción de 4 g de biomasa de insectos y 180 de excrementos y residuos [31]. Ante este panorama de la industria, se abre la posibilidad de encontrar alternativas para el uso del *frass* de insecto como abono o fertilizante orgánico [32], [33].

La quitina que se obtiene de la piel mudada durante la producción de insectos es un polímero biodegradable con potencial como bioestimulante en la agricultura [34]. Esta sustancia aporta diversos beneficios, dependiendo de su aplicación; por ejemplo, puede disminuir el empleo de fungicidas químicos cuando se aplica como un sustrato foliar debido a que favorece a las poblaciones bacterianas nativas [35]. Por otra parte, al aplicarlo en el suelo el sustrato actúa como nutriente vegetal, promueve el crecimiento en plantas y aumenta la tolerancia al estrés biótico y abiótico [36].

Una de las posibles disposiciones del *frass* es como abono granulado [11], [37], debido a que incrementa la población y la actividad microbiana en el suelo, mejora la disposición de nutrientes y sus propiedades [10]. A su vez, también puede ser empleado como recubrimiento de semillas, impregnado en una taza de plántula biodegradable o aplicado junto a las raíces de cada planta durante el momento de la siembra.

Por consecuencia, es fundamental para la agronomía y economía estudiar los microorganismos presentes en el excremento de insectos. Estos agentes se consideran bioprotectores, biocontroladores, biofertilizantes o bioestimulantes, debido a que regulan el crecimiento, aceleran la germinación de las semillas, fortalecen el vigor de las plantas y optimizan el rendimiento agrícola [38]. La aplicación de fertilizantes orgánicos en lugar de sintéticos es económicamente factible y un enfoque necesario a largo plazo para la agricultura sostenible.

El *frass* es benéfico para la fisiología vegetal y además refuerza el sistema inmunológico; así, es notable la mejora en el crecimiento y desarrollo, sin las sobrecargas de agroquímicos tóxicos habituales, tales como los insecticidas, fungicidas y bactericidas. En síntesis, los residuos de



insectos son potenciales sustitutos de los actuales plaguicidas químicos o como reguladores del crecimiento de las plantas. De lo anterior resultaría una producción con niveles mínimos (o incluso nulos) de toxicidad hacia el medio ambiente y los seres vivos [4].

Discusión

Aunque los tabúes alimentarios limitan el consumo de insectos [16], su inclusión en suplementos deportivos, infantiles y vegetarianos [39-41] se ha elevado, debido a sus niveles proteínicos y equilibrio de aminoácidos reportados en nuevos estudios. En las proteínas de los insectos, se han reportado diversos péptidos bioactivos cuyas propiedades combaten la oxidación, los tumores y los hongos, por mencionar algunos ejemplos [42]. [7], [43-46] informan que los insectos comestibles contienen compuestos bioactivos, como fenoles y flavonoides, que inhiben los elementos oxidantes, glucémicos, inflamatorios, cancerígenos, microbianos y bacterianos de la enzima lipasa pancreática y además regulan la insulina [47-49]. Aunque tales atributos a menudo se deben a la sinergia de diferentes componentes, varios estudios constatan el papel clave del contenido de polifenoles en relación con bioactividades específicas [43]. Por añadidura, las propiedades bioactivas de los péptidos derivados de insectos observados en humanos y organismos modelo también pueden mediar efectos ventajosos para la salud en el ganado que han suscitado un interés creciente [50-52].

Por otro lado, al transformar a los insectos en ingredientes alimentarios es imprescindible garantizar su inocuidad. Entre las tecnologías utilizadas para estos fines se encuentran el secado en estufa/horno y la liofilización. El primero reduce el contenido de humedad al disminuir las reacciones degradativas enzimáticas y microbiológicas; sin embargo, tiene desventajas como alteraciones funcionales de las proteínas, oxidación de lípidos y variaciones en el color. El segundo, la liofilización, reduce la acción microbiana y la degradación oxidativa; no obstante, aunque es recurrente en investigación, resulta costosa a nivel industrial [8].

Hasta el momento, se desconocen casos graves de transmisión de enfermedades o parásitos a humanos derivados del consumo de insectos. En comparación con los mamíferos y las aves, los insectos parecen

plantear un riesgo menor de transmisión de infecciones zoonóticas a los humanos, aunque es un tema que debe investigarse más a fondo [17]. De igual forma, el consumo de insectos puede producir alergias comparables a las ocasionadas por los crustáceos, que también son invertebrados [9]; y en otros estudios se han reportado alergias alimentarias con una prevalencia de hasta un 12.9 % [53]. Sin embargo, este porcentaje es equiparable al de otros productos alimentarios potencialmente alérgenos, como el maní, huevo y ajonjolí (los cuales han llegado a valores de casi el 10 %) [40].

Existen varios ejemplos de aplicación de los insectos como alimento para animales. Uno de ellos proviene de investigadores de Brasil y Camerún, quienes sustituyeron exitosamente parte de las raciones a base de soya por insectos en la alimentación de pollos, bovinos, porcinos, caprinos y ovinos. Posteriormente encontraron que el perfil de aminoácidos de la harina de insectos es similar al de la harina de pescado [39]. Otro ejemplo proviene de China, Sudáfrica, España y Estados Unidos, donde algunos productores se encuentran trabajando en la crianza de enjambres de moscas para la acuicultura y piensos de aves de corral a través de la bioconversión de residuos orgánicos [54].

Con respecto a las harinas de insecto, las larvas de la mosca soldado negra se aprovechan como proteína baja en grasa en la dieta de bovinos, cerdos, pollos, gallinas, peces (trucha, tilapia, bagre y salmón) y crustáceos (langostino de agua dulce) [55]. En otros estudios, las larvas de mosca doméstica son suministradas, frescas, enteras o picadas, secadas al sol o en horno y molidas como harina, a aves de corral y peces [56]. Por su parte, las larvas del gusano de la harina se producen para mascotas como peces tropicales, aves, reptiles, batracios y pequeños mamíferos insectívoros, así como para la acuicultura (bagre africano, dorada, trucha arcoíris, lubina europea) y la avicultura [18, 55, 57]. A su vez, la harina del gusano de seda, debido a su alto contenido proteico, es apta para la alimentación de aves de corral (pollos de engorde, gallinas ponedoras), cerdos, conejos, peces (carpa común, púa plateada, tilapia de Mozambique, salmón chum, bagre asiático y bagre caminando, lubina japonesa), crustáceos y animales rumiantes (terneros, corderos) [58].

Con el inicio del cambio climático, la resistencia a los pesticidas y la continua pérdida de tierra ocasionada por el crecimiento excesivo de la población, la necesidad de nuevas prácticas agrícolas innovadoras



ha cobrado una relevancia sin precedentes. Durante décadas se han realizado esfuerzos en pos de insumos agrícolas orgánicos viables que no solo sean beneficiosos para los humanos, sino que también sean inocuos para el medio ambiente, ya que la sostenibilidad de la producción hortícola es fundamental para satisfacer las demandas de los consumidores a largo plazo. Para conseguir lo anterior, es necesario optimizar el aprovechamiento de los recursos para fabricar y proporcionar productos saludables. En este sentido, el frass de insecto ha resultado una buena alternativa.

En un estudio realizado en invernadero [59] se encontró que el excremento de diferentes insectos herbívoros era capaz de activar las respuestas defensivas de la planta en tratamiento. Para obtener dicha reacción, mediada por los ácidos salicílico y jasmónico, se provocaron diferentes interacciones: el gusano cogollero (*Trichoplusia ni*) en col, el gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) en arroz, el barrenador europeo del maíz (*Ostrinia nubilalis*) en ese grano, y el gusano del tomate (*Helicoverpa zea*) en ese fruto. Esta información sirve de apoyo para continuar investigando el potencial bioestimulante del excremento de insecto y sus beneficios en la agricultura protegida.

En otras instancias, se ha encontrado que los microorganismos presentes en los excrementos de insectos pueden activar las respuestas defensivas de la planta de maíz. Se llegó a tal conclusión *a posteriori* de aislar e identificar en excrementos de insectos la bacteria *Pantoea ananatis*. Dicho hallazgo demuestra la capacidad de la planta para incrementar la expresión del gen codificador para el inhibidor de la proteinasa de maíz inducido por herbívoros (mpi), lo que disminuye los ataques del insecto. Sin embargo, en plantas de tomate no se lograron los mismos resultados [60].

En cuanto al frass de grillo aplicado en la producción de tomate bajo invernadero, un estudio evaluó el efecto bioestimulante y elicitor sobre las características morfológicas de la planta de tomate, como la altura, el diámetro basal y el número de hojas. Los resultados revelaron que el recurso en cantidades específicas elicitó la resistencia de la planta de jitomate al estrés. Asimismo, se descubrió que el residuo al 0.01 % tiene un efecto bioestimulante, debido a un incremento en las variables morfológicas de la planta en comparación con el testigo [61]. De forma similar, [11] en otra investigación se demostró un aumento de la tolerancia al

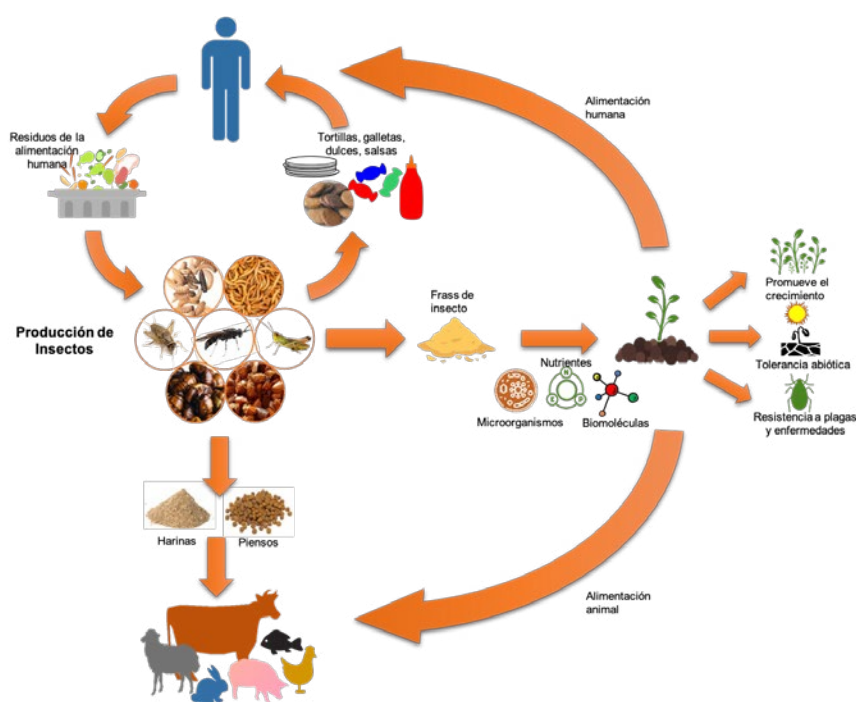
estrés biótico y abiótico de las plántulas frente a la sequía, las inundaciones y la salinidad, debido a la esterilización de los excrementos. A partir de lo anterior, se identificaron numerosos aislados bacterianos y fúngicos capaces de fijar nitrógeno atmosférico, solubilizar fosfatos y potasio, y producir sideróforos, auxinas y ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC) desaminasa.

Por otra parte, se realizó un ensayo del uso de excremento de grillo como enmienda de nitrógeno (N) en maíz dulce con dos dosis de aplicación (125 lbs y 150 lbs de N por acre) en comparación con un control. Aquí se evaluó el rendimiento del cultivo y los niveles de nitrato (NO_3^-); a partir del aumento reportado se demuestra que la aplicación de los excrementos puede ser una enmienda efectiva de N [33].

FIGURA 1

Uso de insectos para alimentación de humanos y animales, y de frass para agricultura sostenible.

En síntesis, los insectos como alimento para consumo humano y animal representan una alternativa totalmente orgánica a la carne, además de ser una fuente confiable de proteínas y otros nutrientes; a su vez, se propone como una estrategia sostenible para producir alimentos seguros, saludables y económicos. De igual forma, este tipo de producción requiere de menor explotación de las tierras, restaura la fertilidad del suelo y mitiga el cambio climático; así contribuye al desarrollo de una agricultura sostenible.





Conclusiones

Debido al aumento de la población mundial ahora son imprescindibles alternativas sostenibles para la producción de alimentos. Los insectos son una opción rentable, en virtud de su contenido de proteínas y nutrientes, así como de su potencial como bioestimulantes o fertilizantes naturales en la agricultura. Sin embargo, existen barreras culturales y regulatorias que limitan su adopción en algunos países occidentales.

En este contexto, la producción de insectos abre grandes oportunidades de crecimiento al sector industrial, a través de la elaboración o adición de alimentos para consumo humano y animal que contribuyen a la seguridad alimentaria. Asimismo, el sector agrícola se beneficia del *frass* de insectos como un subproducto bioestimulante, fertilizante orgánico o sustituto de plaguicidas.

Pocas personas aceptan la idea de consumir insectos, sobre todo ingerirlos directamente, debido a los prejuicios sobre su limpieza y apariencia. Puesto que los aspectos negativos del uso de insectos como alimento tienden a eclipsar los beneficios y el alto valor nutricional que contienen, es necesario implementar estrategias de difusión para vencer las barreras culturales y así aumentar su consumo. La industrialización de alimentos pretende cambiar la percepción que las personas tienen y ayudar a superar los prejuicios para integrar con mayor libertad los insectos en sus procesos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro por su apoyo durante la investigación.

Fuentes de financiamiento

Este proyecto fue solventado mediante el convenio FIN202105 de la Convocatoria para la Atención a Problemas Nacionales 2021.

Referencias

- [1] Organización de las Naciones Unidas. "Global Issues. Population". un.org/en/global-issues/population.
- [2] FAO. "Ganadería sostenible y cambio climático en América Latina". [fao.org](http://www.fao.org/americas/prioridades/ganaderia-sostenible/es/). <http://www.fao.org/americas/prioridades/ganaderia-sostenible/es/>
- [3] E. Lindgren, F. Harris, A. D. Dangour, A. Gasparatos, M. Hiramatsu, F. Javadi, B. Locken, T. Murakami, P. Scheelbeek y A. Haines, "Sustainable food systems. A health perspective", *Sustain Sci*, no. 13, pp. 1505-1517, 2018.
- [4] M. C. Vázquez, I. P. Contreras, L. M. Montoya, I. T. Pacheco, D. Schwarz, R. G. González, "Eustressors: Chemical and physical stress factors used to enhance vegetables production", *Scientia Horticulturae*, vol. 250, pp. 223-229, 2019.
- [5] J. H. Lee, T. K. Kim, C.H. Jeong, H. I. Yong, J. Y. Cha, B. K. Kim, Y. S. Choi. "Biological activity and processing technologies of edible insects: A review", *Food Science and Biotechnology*, vol. 30, no. 8, pp. 1003-1023, 2021.
- [6] A. E. Ortiz, D. H. Saavedra, J. L. Mendoza, I. F. Ramírez, O. M. Izaguirre, M. R. Gómez, R. R. Camacho, "Consumption of cricket (*Acheta domestica*) flour decreases insulin resistance and fat accumulation in rats fed with high fat and fructose diet", *Journal of Food Biochemistry*, vol. 46, no. 9, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/jfbc.14269>
- [7] D. Aiello, M. Barbera, D. Bongiorno, M. Cammarata, V. Censi, S. Indelicato, F. Mazzotti, A. Napoli, D. Piazzese, F. Saiano, "Edible Insects an Alternative Nutritional Source of Bioactive Compounds: A Review", *Molecules*, vol. 28, no. 2, pp. 699, 2023.
- [8] C. Avendaño, M. Sánchez, C. Valenzuela, "Insectos: son realmente una alternativa para la alimentación de animales y humanos", *Revista chilena de nutrición*, vol. 47, no. 6, pp. 1029-1037, 2020.
- [9] L. A. Arévalo, J. Lannacone. "Crianza del grillo (*acheta domestica*) como fuente alternativa de proteínas para el consumo humano", *Scientia*, vol. 17, no. 17, pp. 161-173, 2015.
- [10] S. M. Hamed, A. A. Abd El-Rhman, N. A. Raouf, I. B. Ibraheem, "Role of marine



macroalgae in plant protection & improvement for sustainable agriculture technology", *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 7, no.1, pp. 104-110, 2018

- [11] J. Poveda, A. J. Gómez, Z. S. Santamaría, R. U. Martín, R. Rivas, P. G. Fraile, "Mealworm frass as a potential biofertilizer and abiotic stress tolerance-inductor in plants", *Appl Soil Ecol*, no. 142, pp. 110-122, 2019.
- [12] A. M. Liceaga, "Edible insects, a valuable protein source from ancient to modern times", *Advances in Food and Nutrition Research*, vol. 101, pp.129-152, 2022.
- [13] S. Imathiu, "Benefits and food safety concerns associated with consumption of edible insects", *NFS journal*, vol. 18, pp. 1-11, 2020.
- [14] Organización de las Naciones Unidas. "World: total population", un.org/wpp/graphs/probabilistic/pop/tot/900
- [15] UNAM. "Cultivo y consumo de insectos, opción ante la creciente demanda de alimentos", *Boletín UNAM-DGCS*, 236, 2020. dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2020_236.html
- [16] J. Chakravorty, S. Ghosh, C. Jung, V.B. Rochow, "Nutritional composition of *Chondacris rosea* and *Brachytrupes orientalis*: Two common insects used as food by tribes of Arunachal Pradesh, India", *Journal of Asia-Pacific Entomology*, vol. 17, pp. 407- 415, 2014.
- [17] A. Van Huis, "Insects as food and feed, a new emerging agricultural sector: a review", *Journal Insects as Food and Feed*, vol. 6, pp. 27- 44, 2019
- [18] H. Makkar, G. Tran, V. Heuzé, P. Ankers. "State-of-the-art on use of insects as animal feed", *Anim Feed Sci Technol*, vol. 197, pp. 1-33. 2014.
- [19] M. Sánchez, F. Barroso, F. Manzano-Agugliaro. "Insect meal as renewable source of food for animal feeding: A review", *Journal of Clean Production*, 65, pp. 16-27, 2014.
- [20] A. Batal, N. Dale. "Feedstuffs Ingredient Analysis Table: 2016 edition", 2016. [Online]. Available: [en línea] https://feedstuffs.farmcentric.com/mdfm/Feeess50/author/427/2015/11/Feedstuffs_RIBG_Ingredient_Analysis_Table_2016.pdf . [consulta: 03-09- 2022].
- [21] S. Belluco, C. Losasso, M. Maggioletti, C. Alonzi, M. Paoletti, A. Ricci, "Edible

insects in a food safety and nutritional perspective: a critical review", en *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol.12, pp. 296-313, 2013.

- [22] R. Durán-Galdo, L. Saavedra-García, "Entomofagia, ¿Una potencial alternativa para la seguridad alimentaria?: Una revisión narrativa", *Rev. Española Nutr. Comunitaria*, **28**, 14. 2022.
- [23] Y. Jongema, "List of edible insect species of the world", *Laboratory of Entomology*, Wageningen U. R. wur.nl/en/research-results/chair-groups/plant-sciences/laboratory-of-entomology/edible-insects/world-wide-species-list.ht
- [24] S. Chomchai, P. Laoraksa, P. Virojvatanakul, P. Boonratana, C. Chomchai, "Prevalence and cluster effect of self-reported allergic reactions among insect consumers", *Asian Pacific J Allergy Immunol*, **38**(1):406. 2020.
- [25] A. Van Huis, J. Van Itterbeeck, H. Klunder, E. Mertens, A. Halloran, G. Muir, P. Vantomme, "Edible insects: future prospects for food and feed security", *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Roma, IT, 2013.
- [26] A.M. Rodríguez, "Propuesta de alternativas de producción de proteína para alimentación animal a partir de insectos en Colombia", México, CDMX: Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2020. repository.unad.edu.co/handle/10596/36259
- [27] D. Lenz, J. S. Pappalardo, A. A. Pazos, F. E. Mutti, G. S. Gallardo, A. G. Aparicio, V. C. Fernandez. "Piensos a base de insectos para alimentación animal", *Plataforma Agraria Libre de Canarias*, vol. 59, pp. 1-1, 2022.
- [28] R. Toriz, V. Ruiz, U. García, L. Hernández, M. Fonseca, G. Rodríguez, "Assessment of Dietary Supplementation Levels of Black Soldier Fly, *Hemertia illucens*, Pre-pupae Meal for Juvenile Nile Tilapia, *Oreochromis Niloticus*", *Southwestern Entomol*, vol. 44, pp. 251-259, 2019.
- [29] T. Stadlander, A. Stamer, A. Buser, J. Wohlfahrt, F. Leiber, C. Sandrock. "Hermetia illucens meal as fish meal replacement for rainbow trout on farm", *Journal of Insects as Food and Feed*, vol. 3, pp. 165-175, 2017.
- [30] T. Veldkamp, G. Bosch. "Insects: a protein-rich feed ingredient in pig and poultry



diets", *Animal Frontiers*, vol. 5, pp. 45-50, 2015.

- [31] H. Wang, K. Rehman, X. Liu, Q. Yang, L. Zheng, W. Li. "Insect biorefinery: a green approach for conversion of crop residues into biodiesel and protein", *Biotechnology for Biofuels*, vol. 10, pp. 304, 2017.
- [32] J. C. Ortiz, A. T. Ruiz, J. A. Morales, M. Thomas, M. G. Rojas, J. K. Tomberlin. "Insect mass production technologies", *Insects as Sustainable Food Ingredients*, Academic Press, 2016, vol. 6, pp. 153-201.
- [33] H. Darby, A. Gupta, E. Cummings, L. Ruhl, S. Ziegler. "Cricket Frass as a Potential Nitrogen Fertility Source", *Northwest Crops & Soils Program*, pp. 86, 2017.
- [34] F. Amerany, M. Rhazi, S. Wahbi, M. Taourirte, A. Meddich. "The effect of chitosan, arbuscular mycorrhizal fungi, and compost applied individually or in combination on growth, nutrient uptake, and stem anatomy of tomato", *Scientia Horticulturae*, vol. 261, 2020.
- [35] C. L. Velásquez, M. L. Pirela, A. Chirinos, L. I. Avelizapa, "Nuevos retos en agricultura para los biopolímeros de quitina y quitosano. 1. Efectos beneficiosos para los cultivos", *Revista Iberoamericana de Polímeros*, vol. 20, no. 3, pp. 118-136, 2019.
- [36] R. Pichyangkura, S. Chadchanwan. "Biostimulant activity of chitosan in horticulture", *Scientia Horticulturae*, vol. 196, pp. 49-65, 2015.
- [37] A. M. Dulaurent, G. Daoulas, M. P. Faucon, D. Houben. "Earthworms (*Lumbricus terrestris* L.) mediate the fertilizing effect of frass", *Agronomy*, vol. 10, no. 6, pp. 783, 2020.
- [38] L. P. de Souza, L. M. Garcia, C. Rodrigues, M. C. Camara, G. V. de Melo, J. de Oliveira, C. R. Soccol. "Potential applications of plant probiotic microorganisms in agriculture and forestry", *AIMS Microbiol*, vol. 3, pp. 629-648, 2017.
- [39] L. Melgar, A. Hernandez, C. Salinas. "Edible insects processing: traditional and innovative technologies", *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol. 18, pp. 1166-1191, 2019.
- [40] S. Kim, C. Weaver, M. Choi. "Proximate composition and mineral content of five edible insects consumed in Korea", *CyTA Journal of Food*, vol. 15, pp. 143-146, 2017.
- [41] Y. Park, Y. Choi, K. Hwang, T. Kim, C. Lee, D. Shin. "Phys-

- icochemical Properties of Meat Batter Added with Edible Silkworm Pupae (*Bombyx mori*) and Transglutaminase", *Korean Journal for Food Science Animal Resources*, vol. 37, pp. 351-359, 2017.
- [42] M. Liu, Y. Wang, Y. Liu, R. Ruan. "Bioactive peptides derived from traditional Chinese medicine and traditional Chinese food: a review", *Food Research International*, vol. 89, pp. 63-73, 2016.
- [43] A. J. da Silva, L. M. de Oliveira, M. da Rocha, C. Prentice. "Edible insects: An alternative of nutritional, functional and bioactive compounds", *Food chemistry*, vol. 311, 2020.
- [44] G. Ssepuuya, J. Kagulire, J. Katongole, D. Kabbo, J. Claes, D. Nakimbugwe. "Suitable extraction conditions for determination of total anti-oxidant capacity and phenolic compounds in *Ruspolia differens* Serville", *Journal of Insects as Food and Feed*, vol. 7, no. 2, pp. 205-214, 2021.
- [45] M. C. Nino, L. Reddivari, C. Osorio, I. Kaplan, A. M. Liceaga. "Insects as a source of phenolic compounds and potential health benefits", *Journal of Insects as Food and Feed*, vol. 7, no. 7, pp. 1077-1087, 2021.
- [46] M.C. Nino, L. Reddivari, M. G. Ferruzzi, A. M. Liceaga. "Targeted Phenolic Characterization and Antioxidant Bioactivity of Extracts from Edible *Acheta domesticus*", *Foods*, vol. 10, no. 10, 2021.
- [47] M. Issaoui, A. M. Delgado, G. Caruso, M. Micali, M. Barbera, H. Atrous, A. Ouslati, N. Chammem. "Phenols, flavors, and the mediterranean diet", *Journal of AOAC International*, vol. 103, no. 4, pp. 915-924, 2020.
- [48] M. Nardini. "Phenolic Compounds in Food: Characterization and Health Benefits", *Molecules*, vol. 27, no. 3, pp. 783, 2022.
- [49] Z. Zhang, S. Chen, X. Wei, J. Xiao, D. Huang. "Characterization, Antioxidant Activities, and Pancreatic Lipase Inhibitory Effect of Extract From the Edible Insect *Polyrhachis vicina*", *Frontiers in Nutrition*, vol. 9, 2022.
- [50] A. Jozefiak, R. M. Engberg. "Insect proteins as a potential source of antimicrobial peptides in livestock production. A review", *Journal of Animal and Feed Sciences*, vol. 26, no. 2, pp. 87-99, 2017.



- [51] T. Veldkamp, L. Dong, A. Paul, C.C. Govers. "Bioactive properties of insect products for monogastric animals—a review", *Journal of Insects as Food and Feed*, vol. 8, no. 9, pp. 1027-1040, 2022.
- [52] Y. Quah, S. R. Tong, J. Bojarska, K. Giller, S. A. Tan, Z. M. Ziora, T. Esatbeyoglu T. T. Chai. "Bioactive peptide discovery from edible insects for potential applications in human health and agriculture", *Molecules*, vol. 28, no. 3, 2023.
- [53] I. Pali-Schöll, R. Binder, Y. Moens, F. Polesny, S. Monsó. "Edible insects-defining knowledge gaps in biological and ethical considerations of entomophagy", *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 59, no. 17, pp. 2760-2771, 2019.
- [54] A. Martínez, C. Marín, D. Rodrigo, P. S. Fernández, C. M. Rosell. "Los insectos alimentan al mundo", Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos, www.acnv.es/news/los-insectos-alimentan-al-mundo/
- [55] M. Zumbado, D. Azofeifa. "Insectos de importancia agrícola – Guía Básica de entomología", *Programa Nacional de Agricultura Orgánica*, mag.go.cr/bibliotecavirtual/H10-10951.pdf.
- [56] V. Heuzé, G. Tran. "Housefly maggot meal", feedipedia.org/node/671
- [57] G. Tran, C. Gnaedinger, C. Mélin. "Mealworm (*Tenebrio molitor*)". feedipedia.org/node/1640
- [58] V. Heuzé, G. Tran, S. Giger, F. Lebas. "Harina de pupa de gusanos de seda". feedipedia.org/node/199
- [59] S. Ray, S. Basu, L. J. Rivera, F. E. Acevedo, J. Louis, G.W. Felton, D. S. Luthe, "Lessons from the far end: caterpillar frass-induced defenses in maize, rice, cabbage, and tomato", *Journal of Chemical Ecology*, vol. 42, pp. 1130-1141, 2016.
- [60] F. E. Acevedo, M. Peiffer, C.W. Tan, B. A. Stanley, A. Stanley, J. Wang, A. G. Jones, K. Hoover, C. Rosa, D. Luthe, G. Felton. "Fall armyworm-associated gut bacteria modulate plant defense responses". *Molecular Plant-Microbe Interactions*, vol. 30, pp.127-137, 2017.
- [61] E. A. Ferruzca, R. G. Guevara, R. Guzmán, R. Reynoso. "Bio-stimulant or Elicitor Effect Of Cricket Frass (*Acheta domestica*) On The Production Of Tomato Under Greenhouse", XVIII Congreso Internacional de Ingeniería CONIIN, México, 2022.





UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO