

Cultivos hidropónicos bajo un enfoque de economía circular

Hydroponic crops under a circular economy approach

Z. J. Barrera-Ramírez ^a, R. I. Beltrán-Hernández ^a, J. A. Aguilar-Huesca ^a, P. A. López-Pérez ^b,

O. Arce-Cervantes ^c, C. A. Lucho-Constantino ^{a,*}

^a Área Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^b Escuela Superior de Apan, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Apan-Calpulalpan km. 8, Apan Hidalgo, C.P. 43900, México.

^c Área Académica de Ciencias Agrícolas y Forestales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 43600, Tulancingo, Hidalgo, México.

Resumen

Actualmente nos enfrentamos a diferentes situaciones que ponen en riesgo la seguridad alimentaria, entre ellas al aumento de suelos agrícolas degradadas debido a las malas prácticas de cultivo, así como condiciones climáticas impredecibles cada vez más ligadas al cambio climático que dificultan el abasto de alimentos para una población que crece exponencialmente. Este artículo de revisión proporciona una visión amplia de investigaciones relacionadas con el concepto de economía circular y los cultivos hidropónicos, los cuales pueden ayudar a la transición sostenible de la producción de alimentos a nivel mundial, y a la vez promover la gestión sostenible de recursos y residuos utilizados en el sector agrícola. Para ello, se discuten seis aspectos clave de los cultivos hidropónicos bajo un esquema de economía circular (sostenibilidad, reciclaje de nutrientes, energías renovables, gestión de residuos, economía circular e impacto socioeconómico). En conjunto, esta revisión resalta la relevancia de los sistemas hidropónicos en los desafíos agrícolas contemporáneos, así como la promoción de prácticas más sostenibles y eficientes en la producción local de alimentos.

Palabras Clave: Sostenibilidad, reciclaje, cultivos hidropónicos, gestión, socioeconómico.

Abstract

We currently face different situations that put food security at risk, including the increase in degraded agricultural land due to poor cultivation practices, as well as unpredictable weather conditions increasingly linked to climate change that make it difficult to supply food for a population that is growing exponentially. This review provides a broad overview of research related to the concept of the circular economy and hydroponic crops, that can help the sustainable transition of food production globally, while promoting the sustainable management of resources and waste used in the agricultural sector. To this end, six key aspects of hydroponic crops are discussed under a circular economy scheme: sustainability, nutrient recycling, renewable energy, waste management, circular economy, and socioeconomic impact. Taken together, this review highlights the relevance of hydroponic systems in contemporary agricultural challenges, as well as the promotion of more sustainable and efficient practices in food production.

Keywords: Sustainability, recycling, hydroponic crops, management, socioeconomic.

1. Introducción

La integración de cultivos hidropónicos (CH) en la economía circular (EC) representa un paradigma innovador en la producción de alimentos, redefiniendo las prácticas agrícolas y las dinámicas socioeconómicas de las comunidades locales. El propósito de este artículo es analizar los efectos de la implementación de la EC en el ciclo de vida

de los cultivos hidropónicos, desde la producción hasta el consumo. Para ello, se analizaron algunos casos de estudio que permiten comprender de mejor manera su implementación a escala real en estos sistemas de producción de alimentos.

Así mismo, en años recientes se ha incrementado el interés de información científica en los CH como una estrategia sostenible para la producción de alimentos (Mera et al.,

*Autor para la correspondencia: carlos_lucho8906@uaeh.edu.mx (Carlos Alexander Lucho Constantino).

Correo electrónico: ba354557@uaeh.edu.mx (Zulema Jocelyn Barrera Ramírez); rosa@uaeh.edu.mx (Rosa Icela Beltrán Hernández); ag260653@uaeh.edu.mx (Juan Aguilar Huesca); pablo_lopez@uaeh.edu.mx (Pablo Antonio López Pérez); oarce@uaeh.edu.mx (Óscar Arce Cervantes).

2021). Ante este panorama, se reconoce la necesidad de una revisión bibliográfica actualizada para comprender la integración de los CH en los principios de la EC y explorar sus implicaciones en términos de eficiencia, sostenibilidad y desarrollo socioeconómico.

1.1. Metodología

La metodología utilizada en esta revisión bibliográfica se basa en un enfoque selectivo que involucra la identificación y revisión de artículos relevantes en seis temas específicos relacionados con CH y EC en los siguientes buscadores Google académico, Dialnet, SciELO, Microsoft Academic, ScienceDirect. La selección de artículos se llevó a cabo considerando la calidad y pertinencia de la investigación, asegurando un análisis detallado de las contribuciones más significativas en cada tema. A continuación, se mencionan los pasos seguidos para cada tema en documentos consultados en español e inglés (2019 a la fecha).

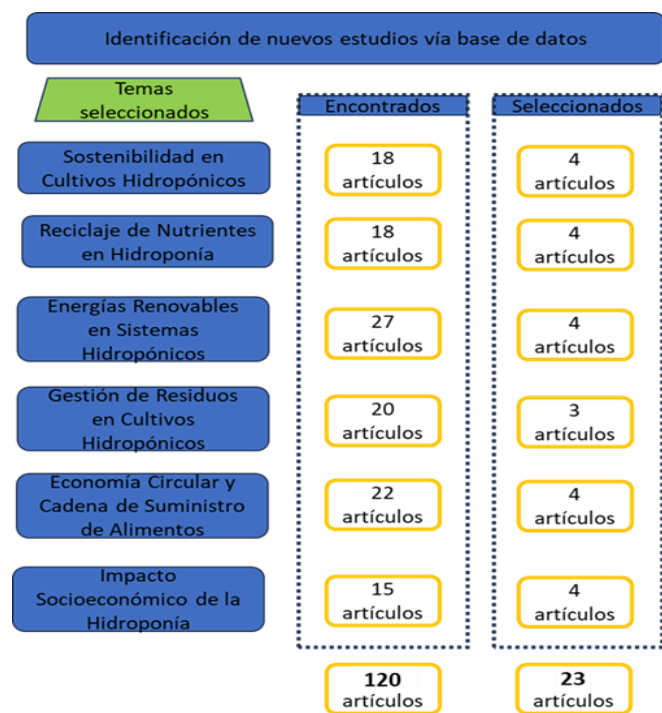


Figura 1. Metodología de búsqueda de información.

La metodología selectiva permite abordar de manera detallada y específica cada uno de los temas seleccionados, garantizando la inclusión de investigaciones relevantes y significativas en la revisión bibliográfica. El análisis y síntesis de estos estudios permitieron una comprensión más profunda de la relación entre los CH y la EC.

2. Cultivos hidropónicos

La palabra hidroponía viene del griego *hydro* (agua) y *ponos* (labor o trabajo) y significa trabajo del agua, es una técnica que se enfoca en la producción de cultivos sin suelo.

Los CH obtienen sus nutrientes de soluciones nutritivas (SN) que están compuestas de minerales disueltos en el agua; y un sustrato inerte encargado de retener dichos nutrientes

(Correa, 2009). De esta manera, se pueden obtener cosechas durante todo el año.

Mediante el uso de hidroponía, se tiene una gran cantidad de beneficios, incluida la ausencia del uso del suelo, la eliminación de hongos y plagas, mejores rendimientos con un crecimiento estable, cero emisiones de nitrógeno de la atmósfera, mayor eficiencia en el uso de agua y nutrientes a través de niveles controlados de concentración en la planta y raíces, menor necesidad de aplicación de fertilizantes, menor incidencia de problemas orgánicos o abióticos y menor uso de pesticidas y residuos de herbicidas, entre otros. Actualmente se emplean diferentes técnicas para cultivar alimentos mediante hidroponía, la elección de estos sistemas depende de la planta que se quiera cultivar, las condiciones locales del clima y el presupuesto, entre otros factores (Velazquez-Gonzalez et al., 2022). En la Figura 2 se puede observar que los componentes principales de estos sistemas incluyen un tanque de almacenamiento para la solución nutritiva (SN), un aireador y una bomba de recirculación.

Las técnicas de cultivos hidropónicos más utilizadas son: riego por goteo (Figura 1a), técnica de película nutritiva (NFT, por sus siglas en inglés; Figura 1b), flujo y reflujo (Figura 1c), cultivo de aguas profundas (DWC, por sus siglas en inglés, Figura 1d), acuaponía (Figura 1e), y aeroponía (Figura 1f), entre otros.

En el riego por goteo, la SN se bombea a las raíces de las plantas con un flujo regulado en intervalos de tiempo predeterminados. En el caso de NFT, la SN fluye a través de la zona de la raíz, las cuales no están completamente sumergidas en la solución, sino en una corriente líquida que fluye a través de un sistema de tuberías. De igual manera, en el sistema de flujo y reflujo, las plantas se colocan en una bandeja, que se llena periódicamente con agua y la SN es bombeada desde un depósito de almacenamiento, todo esto en un proceso de recirculación. Por otra parte, en el DWC la raíz de la planta se sumerge en el tanque de agua con la SN, mientras que el resto de la planta queda por encima del agua. En la acuaponía, el sistema de riego es muy similar al NFT, con la diferencia de que la SN proviene del criadero de peces. Por último, en la aeroponía, las raíces de las plantas se encuentran suspendidas en el aire y obtienen sus nutrientes de la pulverización de la SN con un sistema de aspersiones.

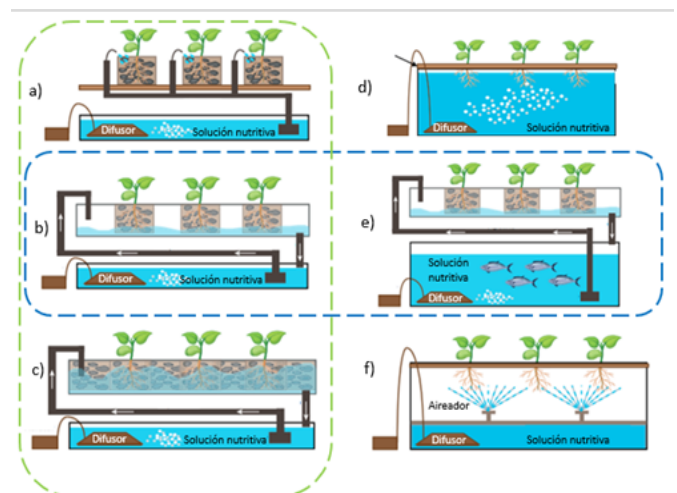


Figura 2. Diferentes tipos de sistemas hidropónicos (a) Sistema de goteo, (b) Técnica de película de nutrientes (NFT), (c) Flujo y reflujo, (d) Cultivo de aguas profundas (DWC); (e) Acuaponía y (f) Aeroponía. Modificada de Velazquez-Gonzalez et al., 2022.

3. Economía circular

El modelo económico lineal consiste en «tomar, hacer y desechar»; por lo cual Steffen et al. (2015) mencionan que tal modelo no es sostenible. Por lo que en el ámbito empresarial se ha optado por explorar la alternativa atractiva y viable de la EC, ya que es reconstituyente y regenerativa por diseño (EMF, 2015a y 2015b) (Figura 2). La EC se basa en mantener los productos, componentes y materiales en sus niveles de uso más altos.

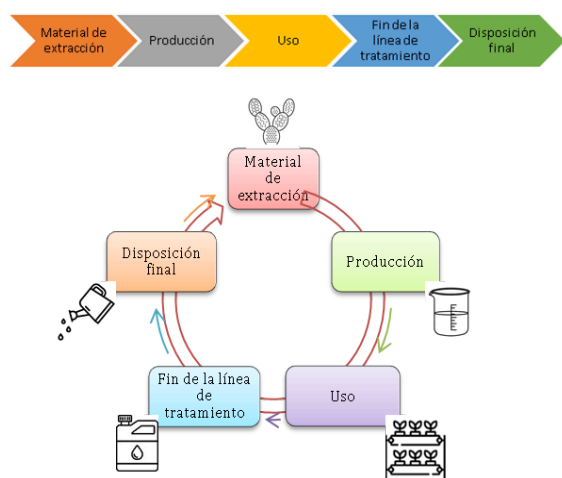


Figura 2. Comparación de economía lineal vs economía circular.

La EC es un ciclo positivo de desarrollo continuo que preserva e incrementa el capital natural, optimiza los recursos y minimiza los riesgos sistémicos (Cerdeja y Khalilova, 2016). Algunas características clave de una EC (EEA, 2016) son: Reducción de insumos y menor utilización de recursos naturales, disminuir el consumo de energía, aumentar el reciclaje de recursos renovables, reducir emisiones, disminuir las pérdidas de los insumos agrícolas y de los residuos, y mantener el valor de productos, componentes y materiales en la economía.

3.1. Implementación de la economía circular en cultivos hidropónicos

Las ventajas económicas impulsan en gran medida la adopción de la EC. La circularidad en la producción podría generar ahorros significativos tanto en recursos como en gastos. La transición a la EC requiere comprender aquellos factores que impulsan y obstaculizan a las empresas al implementarla (Ritzén y Sandström, 2017; Tura et al., 2019). Por otra parte, el progreso de la EC se ve obstaculizado por una transición multidimensional que está interconectada con otros factores (Ritzén y Sandström, 2017). De tal manera, Tura et al. (2019) han identificado siete impulsores y barreras que enfrentan las empresas cuando intentan desarrollar o implementar la EC, entre ellos los ambientales, económicos,

sociales, institucionales, tecnológicos, de tecnología de la información, de la cadena de suministro y organizacionales.

Si bien los desafíos para la implementación de la EC en productos y empresas son específicos de cada contexto con el que se trabaje, los sistemas hidropónicos también enfrentan obstáculos para alcanzar la circularidad total (EMF 2019, Tura et al. 2019). El uso de fertilizantes líquidos en la producción es necesario para proporcionar nutrientes a las plantas y satisfacer la alta demanda energética por el uso de bombas e iluminación artificial en caso de algunos CH verticales. De tal manera, los combustibles fósiles son la principal fuente de energía, lo que dificulta la introducción de la circularidad (EMF 2019). Para comprender el potencial de los sistemas de CH, es esencial analizar el contexto socioeconómico y explorar los factores que impulsan esta aplicación.

4. Estudios de caso de agricultura hidropónica y economía circular

La agricultura hidropónica vertical presenta una industria emergente que podría ayudar a disminuir el impacto ambiental de la agricultura convencional. Este tipo de CH es una forma de agricultura en un ambiente controlado, que generalmente se realiza en interiores y las plantas crecen en ausencia de suelo. La producción hidropónica aporta varios beneficios al sistema alimentario, especialmente en términos de eficiencia en el uso del agua, eficiencia del espacio, producción durante todo el año y productividad del sistema. Sin embargo, existen desafíos de como la dependencia de la energía para crecer los cultivos, una gama limitada de cultivos que son adecuados para la producción hidropónica y un precio más alto del producto. Los sistemas hidropónicos verticales que operan en Suecia utilizan la energía que obtienen principalmente de fuentes renovables (Pozničková, 2019). El gobierno sueco tiene como meta obtener el 100 % de la energía de fuentes renovables en 2040. Cuando la producción se sitúa en capas apiladas verticalmente, la eficiencia del espacio es alta y los suelos agrícolas tiene la oportunidad de recuperar su fertilidad, se puede replantar y generar beneficios para la sociedad. *Urban Oasis®* es una granja hidropónica vertical sueca que aprovecha el espacio vacío de un estacionamiento para CH, lo cual ayuda a potenciar el uso de la superficie urbana (Pozničková, 2019).

5. Sostenibilidad en cultivos hidropónicos

En la búsqueda de prácticas agrícolas más sostenibles de acuerdo a Ruffi-Salís et al. (2020); Debangshi (2021); Gumisiriza et al. (2022); los CH emergen como una solución prometedora que puede abordar desafíos ambientales y optimizar la gestión de recursos hídricos. En la Tabla 1 se muestra el papel crucial que pueden desempeñar los CH en la promoción de la sostenibilidad ambiental y la gestión eficiente del agua dentro del contexto más amplio de una EC.

Tabla 1. Sostenibilidad de los cultivos hidropónicos.

Aspectos	Descripción
Eficiencia en el uso del agua	Los sistemas hidropónicos operan en circuito cerrado, minimizando la pérdida de agua.

Reciclaje de nutrientes	de	El control preciso de nutrientes en sistemas cerrados permite la recuperación y reciclaje de elementos esenciales para los cultivos. Existen diferentes estrategias para cerrar el ciclo de nutrientes.
Reducción de residuos	de	Se compara la generación de residuos generados por la agricultura convencional. Se proponen estrategias para reutilizar sustratos y compostar el material orgánico.
Energía renovable y huella de carbono	de	Se discute la integración de fuentes de energía renovables en sistemas hidropónicos. Estudio de casos y tecnologías para reducir la huella de carbono.
Impacto en la biodiversidad y ecosistemas	y	Evaluación de la coexistencia de la agricultura hidropónica con la biodiversidad y su efecto en la reducción de la pérdida de hábitat.

La sostenibilidad en los cultivos hidropónicos se presenta como un componente esencial en la transición hacia una EC, la adopción de técnicas hidropónicas no solo puede mejorar la eficiencia en el uso de recursos hídricos, sino también promover prácticas agrícolas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente en general. A medida que avanzamos hacia un futuro centrado en la circularidad, los CH se perfilan como un pilar fundamental para la seguridad alimentaria y la posible recuperación de los suelos agrícolas.

6. Reciclaje de nutrientes en hidroponía: Estrategias para minimizar el desperdicio y promover la circularidad

En la Tabla 2 se mencionan algunas estrategias y tecnologías diseñadas para recuperar, reciclar y reutilizar los nutrientes en los sistemas hidropónicos, con el objetivo de minimizar el desperdicio y cerrar el ciclo de nutrientes (Miller et al. (2020); Asaduzzaman et al. (2022); Gómez et al. (2022), Shenoy et al. (2023)).

Tabla 2: Reciclaje de nutrientes.

Aspectos	Descripción
Control preciso de nutrientes	Tecnologías para formulación de soluciones nutritivas según las necesidades de las plantas, evitando excesos y reduciendo desperdicios.
Sistemas de recirculación	Sistemas cerrados que recolectan y reutilizan la solución nutritiva, mejorando la eficiencia en la utilización de nutrientes y minimizando pérdidas.
Tecnologías de monitoreo continuo	Implementación de sensores y sistemas automatizados que ayudan a evitar la acumulación de nutrientes y garantizar una nutrición óptima.
Uso de microorganismos beneficiosos	Aplicación de biofertilizantes que demuestran el efecto benéfico de los microorganismos en la asimilación de nutrientes y en la descomposición de residuos orgánicos.
Técnicas de separación y filtración	Uso de membranas para la recuperación física de nutrientes de soluciones residuales.

La combinación de tecnologías avanzadas, sistemas de recirculación eficientes y prácticas éticas es esencial para aprovechar al máximo los beneficios ambientales y económicos de estas estrategias en la producción de alimentos sostenibles.

7. Energías renovables en sistemas hidropónicos: Hacia una agricultura sostenible

De acuerdo a Jaimes et al. (2019); Alshebli y Bicer (2022); de Souza et al. (2022); Udovichenko et al. (2022); el uso de fuentes de energía renovables en sistemas hidropónicos es un paso crucial para lograr la sostenibilidad y reducir la dependencia de fuentes no sostenibles, por lo cual es necesaria la integración de energías renovables como la solar y eólica en los sistemas de CH, con el objetivo de minimizar la huella ambiental y promover la autosuficiencia energética (Tabla 3).

La integración de fuentes de energía renovables en sistemas hidropónicos no solo reduce la dependencia de fuentes no sostenibles, sino que también contribuye a la mitigación del cambio climático y promueve una agricultura más resiliente y autosuficiente. Este enfoque hacia la sostenibilidad energética es esencial para la evolución de la agricultura hidropónica en armonía con el medio ambiente.

Tabla 3. Fuentes renovables en hidroponía

Aspectos	Descripción
Energía solar en sistemas hidropónicos	Uso de paneles fotovoltaicos y sistemas de concentración solar, los cuales son utilizados para el bombeo de agua y nutrientes, iluminación y otros componentes en los CH.
Energía eólica en agricultura hidropónica	Las turbinas eólicas adaptadas a entornos agrícolas, destacan por su capacidad para generar electricidad de manera eficiente, especialmente en regiones con vientos constantes.
Sistemas híbridos renovables	Eficacia de sistemas híbridos que integran tanto energía solar como eólica, para garantizar un suministro constante y confiable de energía en sistemas hidropónicos.
Almacenamiento de energía	Tecnologías de almacenamiento, como baterías solares y sistemas de almacenamiento térmico, que permiten almacenar energía para su uso durante periodos sin sol o viento.
Evaluación económica y ambiental	Análisis económico y ambiental de la implementación de energías renovables en sistemas hidropónicos, considerando costos iniciales, retorno de inversión y beneficios a largo plazo.

8. Gestión de residuos en cultivos hidropónicos: Estrategias para una eficiencia sostenible

Magwaza et al. (2020); Van Der Velden et al. (2022); Santos et al. (2023); mencionan que la gestión eficiente de residuos en sistemas hidropónicos es esencial para garantizar prácticas agrícolas sostenibles y reducir el impacto ambiental, algunas de estas estrategias específicas están diseñadas para gestionar eficientemente los residuos generados en cultivos hidropónicos, con un enfoque especial en el compostaje de materiales orgánicos y la reutilización de sustratos (ver Tabla 4).

Tabla 4. Gestión de Residuos

Aspectos	Descripción
Compostaje de materiales orgánicos	Técnicas de compostaje adaptadas a entornos hidropónicos para transformar los residuos de raíces y material vegetal, en composta de alta calidad.
Reutilización de sustratos	Prácticas para limpiar y desinfectar sustratos después de un ciclo de cultivo, permitiendo su reutilización en ciclos subsiguientes y reduciendo la generación de residuos.
Tecnologías de descomposición y reciclaje	Implementación de tratamientos biológicos (aerobios y anaerobios) para la obtención de bioproductos para los cultivos, minimizando la cantidad de residuos, así como la emisión de gases de efecto invernadero, entre otros efectos benéficos para el ambiente.
Valorización de residuos orgánicos	Investigación de estrategias para extraer compuestos útiles, como bioestimulantes o fitoquímicos, a partir de los residuos orgánicos generados en cultivos hidropónicos.
Innovaciones en gestión de residuos	Tecnologías de reciclaje avanzadas o métodos de valorización más eficientes.

En este contexto Chowdhury y Asiabanpour (2024) realizaron un estudio donde se implementó un modelo de economía circular, utilizando residuos generados por hidroponía y acuaponía, junto con té de vermicompost y té de compost aeróbico/compost rápido, como nutrientes para seis plantas halófitas distintas. La simulación de este estudio mostró que los CH que utilizan productos orgánicos obtenidos mediante tecnologías de descomposición o reciclaje, o bien como los nutrientes obtenidos en la acuaponía presentan mejores rendimientos en los cultivos. La gestión eficiente de residuos en cultivos hidropónicos no solo es esencial para minimizar el impacto ambiental, sino que también contribuye a la optimización de recursos y a la sostenibilidad a largo plazo. La combinación de compostaje, reutilización de sustratos y tecnologías de procesamiento avanzadas forma la base de un enfoque integral para gestionar los residuos de manera sostenible en la hidroponía.

9. Economía circular y cadena de suministro de alimentos en cultivos hidropónicos: Una perspectiva integral

La implementación de cultivos hidropónicos presenta una oportunidad única para transformar la cadena de suministro de alimentos hacia una economía circular. Este tema analiza cómo los cultivos hidropónicos influyen en la cadena de suministro, desde la producción hasta el consumo, promoviendo prácticas sostenibles y cerrando los ciclos de nutrientes de manera eficiente. Algunos autores como Martín y Molín (2019); Suntrisna (2020); Balqiah et al. (2020); Trisnasari y Saridewi (2023), mencionan los siguientes aspectos clave, descritos en la Tabla 5.

Tabla 5. Economía circular y cultivos hidropónicos.

Aspectos	Descripción
Producción eficiente y local	Los CH permiten una producción eficiente y local, reduciendo la dependencia de largas cadenas de suministro y disminuyendo la huella de carbono del transporte de alimentos.
Reducción de desperdicios en la producción	La precisión en el control de nutrientes en los sistemas hidropónicos contribuye a una producción más precisa y consistente, reduciendo los desperdicios y optimizando el uso de recursos.
Reciclaje de envases y materiales de embalaje	Reciclaje y reutilización de envases y materiales de embalaje en la producción de alimentos hidropónicos, buscando minimizar la generación de residuos y cerrar los ciclos de materiales.
Cadena de suministro ininterrumpida	La resistencia y flexibilidad de los sistemas hidropónicos pueden contribuir a una cadena de suministro más robusta, mitigando impactos adversos y mejorando la resiliencia ante eventos inesperados.
Participación de los consumidores	Se ha encontrado una conexión directa entre consumidores y los productores de sistemas hidropónicos, lo cual fortalece la participación en una EC, promoviendo la sostenibilidad y la apreciación de productos locales y frescos.
Desafíos y oportunidades en la implementación	Abordaje de desafíos potenciales y oportunidades asociadas con la implementación de CH en la cadena de suministro, como costos iniciales, adaptación tecnológica y beneficios a largo plazo.

La implementación de CH ejerce una influencia significativa en la cadena de suministro de alimentos, desencadenando una transición hacia una EC. Este enfoque integral no solo beneficia a la sostenibilidad ambiental, sino que también fortalece la resiliencia de la cadena de suministro y promueve una mayor participación y conciencia por parte de los consumidores en la EC. Sin embargo, la mayoría de estos estudios son de naturaleza teórica, por lo que es importante investigar la eficiencia y la viabilidad de los sistemas hidropónicos en el contexto real que abarque diferentes aspectos mencionados en la Tabla 5. De acuerdo a Chowdhury y Asiabanpour (2024), los sistemas que promuevan prácticas sostenibles que valoricen los residuos orgánicos para cerrar ciclos de nutrientes tienen mayor posibilidad de cumplir la función de EC.

10. Impacto socioeconómico de la hidroponía circular: Fortaleciendo comunidades locales

Según Huera, (2019); Ekaputri et al., (2021); Ghanayem et al., (2022); Gonzáles Romero, (2022), la adopción de sistemas hidropónicos no solo transforma la forma en que se producen alimentos, sino que también tiene un impacto significativo en las comunidades locales. Este tema evalúa el efecto de la implementación de la hidroponía circular en los usuarios, en términos de empleo, seguridad alimentaria y desarrollo económico sostenible, entre otros (ver Tabla 6).

Tabla 6. Impacto socioeconómico.

Aspectos	Descripción
Generación de empleo local	La operación, mantenimiento y gestión de instalaciones hidropónicas generan empleo directo en la comunidad, contribuyendo al desarrollo económico y mejorando la calidad de vida.

Mejora de la seguridad alimentaria local	La producción local mediante hidroponía fortalece la seguridad alimentaria, proporcionando un suministro constante de alimentos frescos y nutritivos a la comunidad.
Desarrollo de emprendimientos locales	La adopción de sistemas hidropónicos puede impulsar el desarrollo de emprendimientos locales, fomentando la diversificación de la producción y la creación de pequeñas empresas sostenibles.
Capacitación y desarrollo de habilidades	La implementación de sistemas hidropónicos impulsa la necesidad de capacitación y desarrollo de habilidades, empoderando a la comunidad con conocimientos técnicos y prácticos.
Inclusión social y participación comunitaria	Los CH ayudan a promover la inclusión social y la participación comunitaria, generando colaboración y un sentido de responsabilidad compartida hacia la producción local.

La hidroponía circular no solo es una innovación en la producción de alimentos, sino también una fuerza transformadora en las comunidades locales. Por tal motivo, la evaluación del impacto socioeconómico de estos sistemas es esencial para comprender cómo pueden contribuir de manera integral al desarrollo sostenible, fortaleciendo el tejido social y económico de las comunidades. La Figura 3 menciona las características que tienen algunos sistemas hidropónicos que se comercializan en México con un costo promedio de 262-1150 dólares. Las técnicas de cultivo más utilizadas son NFF y DWC.

Página	Producto	Sistema	Costo (USD)	No. plantas	Dimensiones
GroHo	Kit NFT Horizontal 64 Plantas	NFT	180.40	64	1,0 m x 1,1 m x 0,50 m
Verde Compacto	Huvster Home	NFT	1550.43	68	80 X 50 X 200 cm
Hydro Environment	Paquete Básico Para NFT V.6	NFT	257.17	25	5 ductos de 11 cm x 9 cm x 1m largo
Hidroflora	Sistema Root Spa 4 Cubetas	DWC	134.55	5	5 baldes de 5 galones
Acrole Cultivos Hidropónicos	Sistema Hidropónico Vertical 20 plantas	DWC	13017.68	20	Base de 30 cm x 150 cm de Alto
GroHo	Hydro 40 Vertical Fijo	NFT	262.41	40	.60 m x 1.00 m x 0,20 m

Figura 3. Características de sistemas hidropónicos comerciales a pequeña escala.

Con los sistemas hidropónicos se puede producir por lo menos 30 plantas/m² (Sulma et al., 2019), y con los sistemas de agricultura vertical alrededor de 150 plantas/m². Esto aporta beneficios al sistema alimentario, en términos de eficiencia en el uso del agua, del espacio, producción durante todo el año y productividad del sistema. Para la implementación de CH a escala doméstica que tenga un impacto socioeconómico bajo un esquema de EC es necesario hacer una inversión de 300 a 500 dólares, así como un área mínima de 2 m². Por otra parte, para mayor producción de

plantas hay propuestas de sistemas de agricultura vertical automatizados con una productividad similar a 5000 m² en un espacio de 30 m². Sin embargo, los costos de inversión de estos sistemas son superiores a los 100,000 dólares (Figura 4).

Página	Producto	Sistema	Costo (USD)	No. plantas	Dimensiones
GroHo	Grow Stream 80	NFT	1646.20	80	4.10 m x 1.05 m x 0.57 m
Verde Compacto	Huvster Vegetales	NFT	125,000	30000	Contenedor inteligente de 30 m ² .
Hydro Environment	Paquete completo para NFT V6	NFT	360.39	25	5 ductos de 11 cm x 9 cm x 1m largo
Hidroflora	Sistema Root Spa 8 cubetas	DWC	256.65	8	8 baldes de 5 galones
Acrole Cultivos Hidropónicos	Sistema hidropónico h138 plantas + insumos	NFT	42181.74	138	1.5 m x 1.1 m x 2 m
GroHo	Pack Hydro 160 Vertical Móvil	NFT	688.21	160	1.60 m x 2.10 m x 0.5 m

Figura 4. Características de sistemas hidropónicos comerciales a escala media.

Es importante considerar que los sistemas hidropónicos deben de cumplir con la mayoría de los aspectos mencionados en la Tabla 1 para ser considerados bajo una perspectiva integral de EC. Adicionalmente, se debe considerar cultivar especies de plantas que aporten un mayor contenido de nutrientes y proteína con la finalidad de mejorar la alimentación de la población.

11. Conclusiones

Los cultivos hidropónicos emergen como un enfoque integral para abordar desafíos agrícolas y ambientales contemporáneos, destacando la importancia de prácticas más sostenibles y circulares en la producción local de alimentos. La aplicación de prácticas como el reciclaje de nutrientes, la integración de energías renovables y la gestión de residuos eficientes son esenciales para la sostenibilidad y autonomía a largo plazo de los sistemas hidropónicos. Así mismo, la sostenibilidad y eficiencia de los cultivos hidropónicos minimizan los impactos ambientales, y optimizan el uso de los recursos hídricos. De tal manera que la implementación de una economía circular en los cultivos hidropónicos tiene un impacto socioeconómico positivo en la cadena de suministro alimentario, generando empleo local, mejorando la seguridad alimentaria y reduciendo la dependencia de cadenas largas.

Referencias

Asaduzzaman, M., Niu, G. y Asao, T. (2022). Editorial: Nutrients Recycling in Hydroponics: Opportunities and Challenges Toward Sustainable Crop

- Production Under Controlled Environment Agriculture. *Front. Plant Sci.* 13:845472. doi: 10.3389/fpls.2022.845472
- Balqiah, T.E., Pardyanto, A., Astuti, R.D. y Mukhtar, S. (2020). Understanding how to increase hydroponic attractiveness: Economic and ecological Benefit. En E3S Web of Conferences 211, 01015 (2020). *The Ist JESSD Symposium* 2020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021101015>
- Cerda, E., y Khalilova, A. (2016). Economía circular. *Economía circular; estrategia y competitividad empresarial* 11-20. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5771932>
- Chowdhury y Asiabanpour (2024). A circular economy integration approach into vertical farming with computer-based simulation model for resource optimization and waste reduction. *Journal of Cleaner Production* 470, 143256. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143256>
- Debangshi, U. (2021). Hydroponics—an overview. *Chronicle of Bioresource Management*, 5(3), 110-114. <https://ojs.pphouse.org/index.php/CBM/article/view/3917/1391>
- EEA (2016). Circular economy in Europe. Developing the knowledge base. EEA Report No. 2/2016, *European Environment Agency*. <https://www.eea.europa.eu/publications/circular-economy-in-europe>
- Ekaputri, R.Z., Jumiarni, D., Usman, B., Karyadi, B. y Putra, E.P. (2021). The Potential of Hydroponics as a Solution for Food Security and Economics Resilience: Issues and Challenges of Smart-Agriculture. Engagement: *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 5(2), 493-505. <https://doi.org/10.52166/engagement.v5i2.457>
- EMF (2015a). Towards the circular economy. Business rationale for an accelerated transition. *Ellen MacArthur Foundation*, Isle of Wight. https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/TCE_Ellen-MacArthur-Foundation_26-Nov-2015.pdf
- EMF (2015b). Circular economy overview. <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/overview/concept>
- Ghanayem, A.A., Almohamed, S., Al Assaf, A. y Majdalawi, M. (2022). Socioeconomic Analysis of Soil-Less Farming System -An Comparative Evidence from Jordan, The Middle East. *International Journal of Food and Agricultural Economics (IJFAEC)*, 10 (3), 205-223. doi:10.22004/ag.econ.324828
- Gómez, M.A.C., Herrera M.M., y Lancheros, G.J.A. (2022). Los sistemas acuapónicos como fuente de alimento con la implementación de nuevas tecnologías. *Revista internacional de pedagogía e innovación educativa*, 2(1), 245-256. <https://doi.org/10.51660/ripie.v2i1.77>
- Gumisiriza, M.S., Ndakidemi, P., Nalunga, A., y Mbega, E.R. (2022). Building sustainable societies through vertical soilless farming: A cost-effectiveness analysis on a small-scale non-greenhouse hydroponic system. *Sustainable Cities and Society*, 83, 103923. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103923>
- Jaimés, F., Collazos, B., Arce, E. y Chauca, M. (2019). Hydroponic System with Automated Hydrolysis Using Renewable Energy Self-Sustainable. En *MATEC Web de Conferencias* (Vol. 256, p. 02012). Ciencias EDP. https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2019/05/mateconf_icmme2019_02012.pdf
- Magwaza, S.T., Magwaza, L.S., Odindo, A. O. y Mditshwa, A. (2020). Hydroponic technology as decentralised system for domestic wastewater treatment and vegetable production in urban agriculture: A review. *Sci Total Environ.* 1:698: 134154. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134154>
- Martín, M. y Molín, E. (2019). Environmental Assessment of an Urban Vertical Hydroponic Farming System in Sweden. *Sustainability*. 2019; 11(15):4124. <https://doi.org/10.3390/su11154124>
- Miller A., Adhikari R. y Nemali K. (2020) Recycling Nutrient Solution Can Reduce Growth Due to Nutrient Deficiencies in Hydroponic Production. *Front. Plant Sci.* 11:607643. doi: 10.3389/fpls.2020.607643 <https://s3.amazonaws.com/wp-content/uploads/2022/07/Miller-A.-Adhikari-R.-and-Nemali-K..pdf>
- Pozničková, D. (2019). Hydroponic farming and circular economy - implementation of circular economy into hydroponic production (Master's thesis). Swedish University of Agricultural Sciences. https://stud.epsilon.slu.se/14983/1/poznickova_d_190829.pdf
- de Souza M.R.M., Rabelo de P.V., Silva V.C.E., Leite B.R., Lessi dos R.L. (2022). Economic analysis of a photovoltaic energy system in the activation of hydroponic systems. <https://www.taaeufla.eeng.ufla.br/index.php/TAAE/article/view/41/2>
- Rufi-Salis, M., Petit-Boix, A., Villalba, G., Sanjuan-Delmás, D., Parada, F., Ercilla-Montserrat, M., y Gabarrell, X. (2020). Recirculating water and nutrients in urban agriculture: An opportunity towards environmental sustainability and water use efficiency?. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121213. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121213>
- Santoso, R., Bachtiar, A., Nurhayati, N., Erliyani, I. y Alfiyanto, A. (2023). Community development through the use of plastic waste management as hydroponic. *Community Development Journal: Jurnal Pengabdian Masyarakat*. 4(2). <https://doi.org/10.31004/cdj.v4i2.13340>
- Desarrollo comunitario mediante el uso de gestión de residuos plásticos como hidropónico. *Jurnal Pengabdian Masyarakat*. 4 (2), 1549-1552.
- Shenoy, R.S., Narayanan, P., y Bhat, S. (2023). Emerging Technologies for Separation and Recycle of Phosphorus from Sewage Sludge for Hydroponic Farming System. In: Shah, M.P. (eds) *Biorefinery for Water and Wastewater Treatment*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20822-5_12
- Steffen, W.; Richardson, K.; Rockström, J.; Cornell, S.E., Fetzer, I.; Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R.; De Vries, W.; De Wit, C.A., Folke, C.; Gerten, D.; Heinke, J.; Mace, G. M.; Persson, L. M.; Ramanathan, V.; Reyers, B.Y. Sörlin, S. (2015). Planetary Boundaries: Guiding Human Development on A Changing Planet. *Science*, 347 (6223), 1259855(1-10). DOI: 10.1126/science.1259855
- Sulma, S., Gimenes, R. T., & Binottob, E (2019). Viabilidad económica para el despliegue de sistemas hidropónicos en países emergentes: Una propuesta de ajuste diferenciado de riesgos. *Política de Uso de la Tierra*, 83, 357–369. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.02.020>
- Trisanari, W. y Saridewi, T.R. (2023). Smart Greenhouse Technology for Hydroponic Farming: Is it Viable and Profitable Business?. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 13(4), pp. 1333-41. doi:10.18517/ijaseit.13.4.17916.
- Udovichenko, A., Fleck, B. A, Weis, T. y Zhong, L. (2021). Framework for design and optimization of a retrofitted light industrial space with a renewable energy-assisted hydroponics facility in a rural northern canadian community. *Journal of Building Engineering*, 37(102160). <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102160> Get rights and content
- Van Der Velden, R., da Fonseca-Zang, W., Zang, J., Clyde-Smith, D., Leandro, W.M., Parikh, P., y Campos, L.C. (2022). Closed-loop organic waste management systems for family farmers in Brazil. *Environmental Technology* 43 (15). <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1871660>
- Velazquez-Gonzalez, R.S.; Garcia-Garcia, A.L.; Ventura-Zapata, E.; Barceinas-Sanchez, J.D.O.; Sosa-Savedra, J.C. (2022). A Review on Hydroponics and the Technologies Associated for Medium- and Small-Scale Operations. *Agriculture* 2022, 12, 646. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050646>