



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE POSTGRADO

**RESPUESTA DE HORTALIZAS Y PAPA A CONCENTRACIONES CRECIENTES
DE NUTRIENTES EN SISTEMA AEROPÓNICO: UNA REVISIÓN
SISTEMÁTICA**

AFE para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo y al Grado de
Magíster en Ciencias Agropecuarias

VLADIMIR NICOLAI MONROY ROA

Guía de AFE
Ricardo Alfredo Pertuzé Concha

Profesores Consejeros
Víctor Hugo Escalona Contreras
María Loreto Prat del Río

SANTIAGO - CHILE
2024

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

**RESPUESTA DE HORTALIZAS Y PAPA A CONCENTRACIONES CRECIENTES
DE NUTRIENTES EN SISTEMA AEROPÓNICO: UNA REVISIÓN
SISTEMÁTICA**

AFE presentada como parte de los requisitos para optar al Título Profesional de
Ingeniero Agrónomo y al Grado de Magíster en Ciencias Agropecuarias.

(VLADIMIR NICOLAI MONROY ROA)

	Calificaciones
GUÍA DE AFE	
Ricardo Alfredo Pertuzé Concha Ingeniero Agrónomo, Ph. D.	6,7
PROFESOR CONSEJERO	
María Loreto Prat del Río Ingeniera Agrónoma, Mg. Sc, Dr.	6,4
Víctor Hugo Escalona Contreras Ingeniero Agrónomo, Dr.	6,0

Santiago, Chile
2024

DEDICATORIA

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento en primer lugar a mis padres, Lucía y Víctor o como les digo de cariño, “Coleguita” y “Chalito”, quienes siempre estuvieron a mi lado en los momentos más difíciles, brindándome su amor incondicional y su apoyo durante todos estos años de tanto esfuerzo. A mi querido hermano Arturo, o como me gusta llamarlo, “hijo”, quien siempre ha sabido contagiar mi vida con su alegría y cariño, haciéndome sonreír incluso en los momentos más complejos.

A mi amada pareja, Verónica, quiero agradecerle por su constante compañía y apoyo, por las veces que me quitó de la mente la idea de abandonar este arduo proceso, por las veces que me ayudó con la redacción y ortografía, sin duda su presencia me dio fuerzas para seguir adelante. A mi querida suegra Verónica por siempre regalarme algo de su vasta experiencia en cada proyecto en el que me he embarcado.

No puedo dejar de mencionar a mi profesor guía, Ricardo Pertuzé, quien demostró una paciencia infinita y me brindó un apoyo invaluable en este largo camino. También quiero agradecer a José Ignacio Covarrubias, quien me brindó su orientación en las etapas iniciales de este trabajo, ayudándome a darle forma al estudio que quería llevar a cabo.

Sus palabras de aliento, su apoyo constante y su sabiduría han sido fundamentales en mi crecimiento personal y profesional. Sinceramente no tengo palabras suficientes para expresar mi agradecimiento hacia cada uno de ustedes. Este logro no habría sido posible sin su incondicional ayuda y confianza en mí.

Nuevamente, gracias de todo corazón. Su presencia en mi vida ha sido un regalo invaluable. Estoy eternamente agradecido por su amor, apoyo y guía en este viaje.

“Viste coleguita, si se pudo...”

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
Pregunta de investigación.....	3
Objetivo General	3
Objetivo Específico	3
METODOLOGÍA	4
Revisión sistemática	4
Proceso de selección de los estudios.....	4
Proceso de extracción de datos	5
Lista de los datos.....	5
Evaluación del riesgo de sesgo de los estudios individuales	6
Fuentes de información.....	6
Estrategia de búsqueda.....	7
RESULTADOS.....	8
Selección de los estudios	8
Características de los estudios	8
Distribución temporal y geográfica de los artículos seleccionados	13
Información general de los artículos seleccionados	16
Solución nutritiva	16
Conductividad eléctrica de la solución nutritiva (CE)	17
Invernadero.....	22
Sistema de cultivo aeropónico.....	23
Lechuga (<i>Lactuca sativa</i>)	23
Papa (<i>Solanum tuberosum</i>).....	24
Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>).....	26
Pimiento (<i>Capsicum annuum</i>).....	27
DISCUSIÓN	28
CONCLUSIONES.....	31
BIBLIOGRAFÍA.....	32
ANEXOS	37

RESUMEN

El crecimiento de la población mundial y la falta de espacios para cultivar hortalizas son dos de los principales desafíos en la agricultura. Esta situación ha impulsado la búsqueda de nuevos métodos de producción que permitan reducir el uso de recursos y generar alimentos saludables y seguros en áreas de cultivo más limitadas. El propósito de esta revisión sistemática consistió en investigar y recopilar información sobre el comportamiento de hortalizas cultivadas en sistemas sin suelo bajo diferentes concentraciones de nutrientes. Esta revisión se realizó utilizando las bases de datos como Web of Science, Scopus y Science Direct. El estudio se centró en el cultivo aeropónico, con el propósito de optimizar los recursos involucrados en el proceso productivo, particularmente la reducción del consumo hídrico en la producción de alimentos. Se eligieron para el estudio lechuga, tomate y papa debido a su mayor disponibilidad de información en estas bases de datos, mientras que el cultivo de pimiento se incorporó por referencias de artículos. Dentro de los resultados obtenidos, resalta la importancia de múltiples variables que afectan la respuesta de estos cultivos en un ambiente aeropónico sometidas a conductividades eléctricas crecientes como son la variedad, la frecuencia de provisión de solución nutritiva, la temperatura interna en la cámara y la densidad de plantación. El aumento de la conductividad eléctrica en la solución nutritiva por sobre el umbral tolerado por los cultivos (2-2,4 dS/m para lechuga, 2,5 a 4 dS/m para papa y 3-5 dS/m para tomate) conllevaría un impacto significativo tanto productivo, ambiental y monetario.

Palabras clave: Conductividad eléctrica, salinidad, hidroponía, cultivo sin suelo

ABSTRACT

The growth of the world population and the lack of space to grow vegetables are two of the main challenges in agriculture. This situation has prompted the search for new production methods to reduce the use of resources and generate healthy and safe food in more limited growing areas. The purpose of this systematic review was to investigate and collect information on the performance of vegetables grown in soilless systems under different nutrient concentrations. This review was conducted using databases such as Web of Science, Scopus and Science Direct. The study focused on aeroponic cultivation, with the purpose of optimizing the resources involved in the production process, particularly the reduction of water consumption in food production. Lettuce, tomato and potato were chosen for the study due to their greater availability of information in these databases, while bell pepper was included due to article references. The results obtained highlight the importance of multiple variables that affect the response of these crops in an aeroponic environment subjected to increasing electrical conductivity, such as variety, frequency of nutrient solution supply, internal chamber temperature and planting density. Increasing the electrical conductivity in the nutrient solution above the threshold tolerated by the crops (2-2,4 dS/m for lettuce, 2,5 to 4 dS/m for potato and 3-5 dS/m for tomato) would have a significant productive, environmental and monetary impact.

Key words: Electrical conductivity, salinity, hydroponics, soilless cultivation

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la superficie utilizada para el cultivo de hortalizas ha aumentado en los últimos años, registrando una tasa de crecimiento anual del 1,5% desde 2008 a 2018 (FAOSTAT, 2018). Sin embargo, la producción tradicional de hortalizas en suelo aún enfrenta desafíos para garantizar la obtención de alimentos de buena calidad e inocuos, lo que es fundamental en la producción hortícola. El desafío hoy en día es asegurar la disponibilidad de alimentos que no representen riesgos para la salud humana (INIA, 2020). La exposición directa al suelo favorece que el sistema se vea afectado por plagas y enfermedades, en muchas ocasiones el clima y las propiedades fisicoquímicas del suelo pueden ser una de las principales limitantes en el proceso productivo. Benitez-Altuna *et al.* (2021) muestran como el aumento en el uso de fertilizantes y pesticidas con el objetivo de aumentar la producción, provoca erosión del suelo, pérdida de biodiversidad y contaminación de aguas, esto afecta la salud de quienes habitan y trabajan en el sector productivo. Debido a esto, es crucial estudiar, entender y desarrollar nuevas metodologías que aumenten y mejoren la eficiencia del uso de los recursos, con un enfoque principal en la producción alimentaria para abordar de forma integral esta problemática.

En este sentido, la hidroponía se presenta como una alternativa factible para la producción de hortalizas, ya que permite cultivar sin la necesidad de utilizar el suelo como sustrato directo y con un uso eficiente del agua (Gangopadhyay, 2021). La hidroponía es un sistema de cultivo que tiene como fundamento la utilización de una solución nutritiva que puede ser aportada en forma de lámina (NFT), flujo profundo o bandeja flotante y en lugar del suelo se utilizan otras formas de sostén para el crecimiento de las plantas (Maliqa *et al.*, 2021). La hidroponía permite un mayor control sobre las condiciones de cultivo, lo que se traduce en una mayor eficiencia en el uso de los recursos y una mayor producción de alimentos en un espacio reducido (Gilsanz, 2012). Esto es importante en Chile, puesto que, el 56,3% de la superficie de hortalizas es regada utilizando sistemas de riego tradicionales y tan solo un 43,7% utiliza sistema de riego tecnificado (INE, 2021).

Además, la hidroponía permite la automatización de tareas en el sistema productivo, lo que da alternativas para mitigar la disminución de mano de obra y acelerar los procesos productivos. Una vista al desarrollo del sector agropecuario al 2030 indica que un 20% de los cultivos estarían limitados por disponibilidad, acceso a recurso hídrico y riego mientras que un 12% estaría limitado por mano de obra y recurso humano (ODEPA, 2017). Adicionalmente, la sobreexplotación continua de los recursos en la agricultura tradicional ha promovido la degradación de suelos cultivables (Maliqa *et al.*, 2021). De esta forma, se requiere implementar sistemas de cultivo capaces de disminuir los requerimientos necesarios en este proceso y aportar a disminuir la huella que deja la práctica de la agricultura tradicional (ODEPA, 2017).

La demanda de cultivos sigue en aumento dado que, según expertos la población seguirá aumentando de forma exponencial. Para el año 2050, se prevé que la población mundial aumentará y alcanzará casi los 9.700 millones de personas (FAO, 2017). Por tanto, es de suma importancia fomentar la innovación y optimización de los sistemas y recursos implicados en la producción con la finalidad de obtener alimentos de alta calidad, sanos e

inocuos en un corto periodo de tiempo y eficientes en la utilización de recursos, tanto hídricos como minerales, asociados en su producción (ODEPA, 2017).

Dentro de la clasificación de cultivos sin suelo, el sistema de cultivo aeropónico es una alternativa al sistema hidropónico que presenta ventajas en cuanto a la eficiencia en la utilización de los recursos. En primer lugar, la aeroponía utiliza una fina niebla de solución de nutrientes para cultivar las plantas (Gopinath *et al.*, 2017), lo que permite una mayor aireación de la solución nutritiva, un menor volumen de agua requerido y un mayor acceso de las raíces a los nutrientes, lo que se traduce en un mayor crecimiento de las plantas (Kamil, 2020). Además, la exposición de las raíces al aire evita problemas de insuficiencia de oxígeno, lo que se traduce en un mayor crecimiento de las plantas. Otra ventaja de la aeroponía es que utiliza un volumen menor de agua que el sistema hidropónico (Ritter *et al.*, 2001), lo que se traduce en una mayor eficiencia en el uso de los recursos hídricos.

Como se menciona anteriormente, la aeroponía permite una mayor aireación de la solución nutritiva gracias a la forma en que se aporta la solución nutritiva, esta se inyecta al sistema en forma de microgotas mediante la ayuda de boquillas, esto incrementa el acceso de las raíces a los nutrientes generando una mayor eficiencia en el uso de los recursos hídricos y minerales (Millan y Sanjeev, 2007). Por lo tanto, la implementación de la aeroponía en la producción de hortalizas podría ser una alternativa viable para mejorar la eficiencia en la utilización de los recursos y aumentar la producción de alimentos en un espacio reducido, contrario al sistema hidropónico, el sistema aeropónico cuenta con ventajas en la producción de cultivos en forma vertical mediante columnas.

La solución nutritiva proporciona los nutrientes en forma de sales, el agua y el oxígeno necesarios para el crecimiento de las plantas (Preciado, 2006) por lo que se debe contar con una fórmula de nutrientes correctamente diseñada y una reposición adecuada de nutrientes durante el ciclo de producción del cultivo para lograr una producción eficiente y uniforme (Genhua, 2022). Novella *et al.* (2008) mencionan que la concentración de la solución de nutrientes afecta significativamente el crecimiento de las plantas de papa y el rendimiento de los mini-tubérculos durante su ciclo productivo por sobre el umbral de 5,8 dS/m.

Por otra parte, la conductividad eléctrica (CE) es un parámetro crucial en la producción de hortalizas en sistemas sin suelo (Rosadi *et al.*, 2014; Genhua, 2022), ya que se asocia directamente a la salinidad de la solución nutritiva. La CE se modifica por la presencia de nutrientes en su forma iónica en la solución, lo que influye en la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Rosadi *et al.* (2014) estudiaron el cultivo de tomate, encontrando que una concentración demasiado alta o baja de la solución nutritiva por sobre el umbral de 3 dS/m puede influir negativamente en el crecimiento y el rendimiento del cultivo.

Pregunta de investigación

¿Existe algún beneficio al aumentar la concentración de nutrientes en la solución nutritiva en la producción de hortalizas y papa bajo un sistema de cultivo aeropónico?

Objetivo General

Analizar el comportamiento de hortalizas y papa en un sistema aeropónico utilizando distintas concentraciones de nutrientes en la solución nutritiva.

Objetivo Específico

Identificar los máximos de concentración de nutrientes tolerados por hortalizas y papa en un sistema aeropónico que no limiten los rendimientos.

Identificar la existencia de otros parámetros que modifiquen el rendimiento de hortalizas y papa en un sistema de cultivo aeropónico.

METODOLOGÍA

Revisión sistemática

Proceso de selección de los estudios

Se realizó una revisión sistemática basada en el protocolo PRISMA 2020 (Yepes-Núñez *et al.*, 2021). Se tomaron en cuenta principalmente los artículos disponibles en las bases de datos mencionadas anteriormente consultadas hasta junio de 2023. Este enfoque garantiza la objetividad y la confiabilidad de los hallazgos obtenidos, promoviendo la búsqueda de información actualizada, asegurando la aceptación por parte de editores y revisores especializados (Yepes-Núñez *et al.*).

Las bases de datos utilizadas para la investigación fueron seleccionadas siguiendo el protocolo PRISMA 2020 (Yepes-Núñez *et al.*, 2021). Se consultaron bases de datos de literatura científica como Web of Science, Scopus y Science Direct. Estas bases de datos ofrecen acceso a una amplia gama de publicaciones académicas, incluyendo artículos de revistas y libros acreditados. Para asegurar la objetividad y fiabilidad de los hallazgos, se aplicaron restricciones en el motor de búsqueda de cada base de datos, limitando las búsquedas al título, resumen y año de publicación. En el proceso de selección de artículos se comenzó por identificar las hortalizas que serían utilizadas para esta investigación, para esto se realizó un análisis previo de la disponibilidad de información para cada especie vegetal, luego de eso se priorizaron aquellos que mostraban una frecuencia mayor. Esto garantiza una selección representativa de los estudios y evita posibles sesgos en los resultados. Asimismo, se utilizaron términos específicos como el nombre de la hortaliza (lechuga, tomate, papa, ajo, pimiento, entre otras) y la palabra "Aeroponics" en el título y resumen respectivamente, para priorizar el enfoque en estudios relacionados con el sistema de cultivo aeropónico.

Las primeras búsquedas se llevaron a cabo utilizando los términos "*soilless cultivation AND electrical conductivity*" y posteriormente "*soilless cultivation OR hydroponics OR aeroponics*". De esta manera, se realizó una exhaustiva búsqueda con el objetivo de recopilar toda la información disponible sobre estos métodos de cultivo sin suelo, la idea de esto fue generar un catastro de información disponible en estas bases de datos. Todos los resultados de las búsquedas se registraron en una planilla Excel, donde se categorizó por palabra clave de búsqueda, base de dato donde fue recopilado y fecha de publicación. Los artículos desde el año 2015 en adelante se seleccionaron con el objetivo de realizar una revisión sistemática de las técnicas y tecnologías empleadas en la actualidad.

Luego de que se realizaron búsquedas de forma general para generar el catastro de las especies que tenían una mayor cantidad de estudios, se decidió que las principales hortalizas de consumo cultivadas en aeroponía son: lechuga (*Lactuca sativa*), tomate (*Solanum lycopersicum*) y papa (*Solanum tuberosum*), este último cultivo será considerado como una hortaliza en este estudio. Finalmente, las búsquedas se limitaron al título por estas especies como "*Lettuce OR Lactuca sativa*", "*Tomato OR Solanum lycopersicum*" y "*Potato OR*

Solanum tuberosum”, por su parte, “*Aeroponics*” se agregó a la búsqueda en el resumen de cada estudio. Con la ayuda de operadores booleanos se acotó la búsqueda mediante conectores como AND, NOT y OR para agregar sinónimos o palabras que se alejan del objetivo de búsqueda.

Más tarde se incluyeron estudios de interés que se encontraron en la bibliografía de los artículos seleccionados en primera instancia desde las bases de datos, estos estudios no fueron restringidos por su fecha de publicación siempre y cuando cumplieran un rol fundamental en el estudio donde fueron citados.

Proceso de extracción de datos

Se hizo uso de herramientas informáticas como planillas Excel para organizar la información recopilada, hojas de cálculo para facilitar la generación de gráficos y el programa InfoStat 2020e para la elaboración de gráficos. Para organizar cada uno de los datos recopilados se crearon categorías en una planilla de cálculo donde se organizaron por columnas y filas datos como: Año publicación, autor(es), título del artículo, especie estudiada, base de dato, país del estudio, tipo de solución nutritiva utilizada, conductividad eléctrica, pH y utilización de invernadero, todo esto para más adelante poder sintetizar los resultados de forma óptima y poder comparar con mayor facilidad.

Lista de los datos

Se utilizaron diferentes métodos para determinar los resultados que debían ser seleccionados. Una de las formas fue a través de la observación de las diferencias físicas en las especies vegetales expuestas a diferentes concentraciones de solución nutritiva. Estas diferencias fueron evaluadas utilizando la conductividad eléctrica como indicador. Además, se tomaron en cuenta mediciones en órganos específicos, como el largo de la raíz, el largo del tallo, el número de hojas, número de tubérculos, entre otros. También se recopilaron otros datos relevantes, como el pH, el tipo de solución nutritiva, la variedad y lugar de estudio. Estos métodos permitieron obtener una visión más completa y precisa de los resultados obtenidos.

Los datos recopilados incluyeron información obligatoria e información dependiente del artículo. Entre los datos obligatorios se encuentran la CE, el pH, año de publicación, país donde se realizó el estudio, tipo de solución nutritiva y variedad estudiada. Por otra parte, la información dependiente del artículo incluye resultados relevantes de parámetros que pudiesen influir en el rendimiento de los cultivos en un sistema sin suelo. Además, se registró el uso de invernadero durante el experimento. Estos datos proporcionaron una visión completa, detallada y comparable de los resultados obtenidos en el estudio, permitiendo un análisis exhaustivo de los efectos de las diferentes concentraciones de solución nutritiva en las especies vegetales estudiadas.

Criterios de elegibilidad

Para seleccionar los estudios, se establecieron requisitos de inclusión. Estos requisitos incluyeron lo siguiente:

1. El artículo seleccionado debía ser un estudio experimental con resultados originales y basados en experimentos.
2. Artículo realizado en las hortalizas seleccionadas en este estudio. Esto aseguraba que los resultados fueran relevantes y aplicables al cultivo en cuestión.
3. El estudio debía incluir una comparación o análisis relacionado con la importancia o implicancia de la conductividad eléctrica en el cultivo estudiado. Esto garantizaba que la investigación se alineara con el objetivo del estudio y permitía evaluar la relevancia de la conductividad eléctrica en el contexto específico del cultivo.

Al establecer estos requisitos de inclusión, se pudo seleccionar los estudios de manera objetiva, asegurando así la calidad y relevancia de los resultados obtenidos.

Evaluación del riesgo de sesgo de los estudios individuales

Con el objetivo de disminuir el riesgo de sesgo en los estudios seleccionados, se implementaron las siguientes restricciones:

1. Selección de estudios: Se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva y sistemática de la literatura, utilizando criterios claros y predefinidos para la inclusión y exclusión de los estudios. Esto contribuye a minimizar el sesgo en la selección.
2. Extracción de datos: Se utilizó un formulario estandarizado y predefinido que incluyó variables como CE, pH, solución nutritiva, entre otros. Esto asegura una extracción objetiva de datos y reduce el sesgo en la obtención de información.
3. Análisis y síntesis de resultados: Se realizó un análisis de los estudios incluidos en la revisión sistemática, tomando en consideración posibles sesgos y limitaciones. Este enfoque permite tener una visión completa y precisa de los resultados, evitando conclusiones sesgadas.

Estas medidas adoptadas garantizan una evaluación rigurosa y una reducción significativa del sesgo en el estudio, lo que aumenta la validez y fiabilidad de los resultados obtenidos.

Fuentes de información

Para recopilar información bibliográfica, se consultaron bases de datos especializadas de carácter científico, para el caso del presente estudio se seleccionaron Web of Science, Scopus, y Science Direct. Además, se revisaron las referencias citadas en los estudios seleccionados desde las bases de datos. Los artículos que fueron escogidos para esta revisión sistemática fueron recopilados desde abril hasta junio de 2023.

Estrategia de búsqueda

La búsqueda de artículos científicos se llevó a cabo utilizando filtros en el motor de búsqueda de las bases de datos seleccionadas, donde se utilizó en primera instancia una búsqueda por “título”. Se empleó una búsqueda por palabras clave en el “resumen” y se restringió la búsqueda por fecha para incluir artículos publicados desde 2015 hasta 2023. Además, para la búsqueda de artículos se utilizaron operadores booleanos para conectar la búsqueda a través del título y el resumen, con el fin de incorporar sinónimos de búsqueda y evitar palabras que estuvieran fuera de la búsqueda, pero se asemejaran y no tuvieran relación con el objetivo del estudio. Esta estrategia permitió obtener resultados más precisos y relevantes para la investigación en cuestión.

RESULTADOS

Selección de los estudios

Después de realizar las búsquedas iniciales de las principales hortalizas de consumo cultivadas en aeroponía, se observó una mayor disponibilidad de estudios relacionados al cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*), tomate (*Solanum lycopersicum*) y papa (*Solanum tuberosum*), esto indica que estos tres cultivos han sido objeto de una mayor atención y estudio con relación al sistema de cultivo aeropónico y la respuesta ante un cambio en la CE. En concreto, se encontraron 17 artículos sobre lechuga, 16 artículos sobre tomate y 38 artículos sobre papa. Cabe señalar que la espinaca (*Spinacia oleracea*) se identificó como el cuarto cultivo más frecuente. Sin embargo, inicialmente se decidió excluirla del estudio debido a la escasez de información disponible en comparación con los otros tres cultivos antes mencionados y con el fin de delimitar el alcance del trabajo. No obstante, posteriormente se optó por incluir un estudio sobre el pimiento (*Capsicum annuum* L.), basándose en las referencias de un artículo seleccionado, dada la relevancia de sus resultados para el caso de estudio en cuestión. Estos resultados preliminares proporcionan una visión general de la disponibilidad de literatura científica sobre el tema y forman la base para el siguiente paso del estudio. Los resultados se presentan en diagrama de flujo en la figura. 1.

Posterior a la selección por lectura de resumen, se llevó a cabo la selección por lectura de texto completo, en este último punto, se excluyeron dos artículos: Tessema & Dagne, (2018) y Abitew *et al.* (2023). Estos artículos no cumplieron con el tercer requisito de inclusión, al no presentar ningún estudio relacionado con el impacto o medición de CE en el cultivo que se estaba estudiando. Por lo tanto, se decidió no considerarlos en el análisis.

Características de los estudios

Los estudios que cumplieron con los criterios de inclusión luego de la revisión de resumen y texto completo fueron seleccionados para este estudio, en el Cuadro 1 se presentan los artículos recopilados desde Web of Science, Scopus, Science Direct y también los que se seleccionaron desde referencias de los artículos seleccionados desde las bases de datos. Dentro de todos los artículos que fueron seleccionados, incluyendo los incorporados desde referencias, se observa que la mayoría fueron realizados entre el periodo de 2015 y 2023, con excepción de tres estudios en el cultivo de papa que fueron incluidos a través de referencias (Novella *et al.*, 2008; Chang *et al.*, 2011; Chang *et al.*, 2005) y aunque estos trabajos no cumplieran con el criterio de año establecido en los parámetros de selección, se decidió incorporarlos debido a su relevancia significativa para el caso de estudio. Una característica común en estos estudios es el uso de un sistema de cultivo sin suelo, con un enfoque principal en el sistema aeropónico. Además, se encontró que estos artículos se centran en la medición de características morfológicas del cultivo y/o en la comparación de respuestas fisiológicas

de las hortalizas ante diferentes concentraciones de nutrientes en la solución nutritiva. Estas características proporcionan una visión panorámica de los estudios revisados y establecen las bases para la próxima fase de la investigación.

Cuadro 1. Artículos seleccionados para la revisión sistemática según cultivo, autor/año y fuente de recolección.

Cultivo	Autor/Año	Título	Fuente
Lechuga	(Awalina <i>et al.</i> , 2022)	Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) Growth in Aeroponic Systems with Differences in Nutritional Time	Scopus
Lechuga	(Carotti <i>et al.</i> , 2023)	Improving water use efficiency in vertical farming: Effects of growing systems, far-red radiation and planting density on lettuce cultivation	ScienceDirect
Lechuga	(Choong <i>et al.</i> , 2016)	Growing different lactuca genotypes aeroponically within a tropical greenhouse - cool rootzone temperatures decreased rootzone ethylene concentrations and increased shoot growth.	Referencias
Lechuga	(Hikosaka <i>et al.</i> , 2015)	Dry-fog aeroponics affects the root growth of leaf lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L. cv. Greenspan) by changing the flow rate of spray fertigation	Scopus
Lechuga	(Tunio <i>et al.</i> , 2022)	Effects of droplet size and spray interval on root-to-shoot ratio, photosynthesis efficiency, and nutritional quality of aeroponically grown butterhead lettuce	Web of Science
Lechuga	(Li <i>et al.</i> , 2018)	Growth Responses and Root Characteristics of Lettuce Grown in Aeroponics, Hydroponics, and Substrate Culture	Web of Science
Lechuga	(Mohamed <i>et al.</i> , 2022)	Development and experiment of the intelligent control system for rhizosphere temperature of aeroponic lettuce via the Internet of Things	Web of Science
Papa	(Balena <i>et al.</i> , 2021)	Growth, yield and dormancy of aeroponically produced potato minitubers as a function of planting density and harvesting date	Web of Science

Cultivo	Autor/Año	Título	Fuente
Papa	(Calori <i>et al.</i> , 2017)	Electrical conductivity of the nutrient solution and plant density in aeroponic production of seed potato under tropical conditions (winter/spring)	Web of Science
Papa	(Chang <i>et al.</i> , 2005)	Optimizing electrical conductivity and pH of nutrient solution for hydroponic culture of seed potatoes (<i>Solanum tuberosum</i>)	Referencias
Papa	(Chang <i>et al.</i> , 2011)	Growth and Yield Response of Three Aeroponically Grown Potato Cultivars (<i>Solanum tuberosum</i> L.) to Different Electrical Conductivities of Nutrient Solution	Referencias
Papa	(Čížek & Komárková, 2022)	Comparison of aeroponics technology with a conventional system of production of potato minitubers in the conditions of the Czech Republic	Web of Science
Papa	(Da Silva <i>et al.</i> , 2018)	Evaluation of “UFV aeroponic system” to produce basic potato seed minitubers.	Referencias
Papa	(García-Segura <i>et al.</i> , 2021)	Potato minituber production in aeroponics compared to soil and coir dust	Web of Science
Papa	(Kuncoro <i>et al.</i> , 2021)	Aeroponics Root Chamber Temperature Conditioning Design for Smart Mini-Tuber Potato Seed Cultivation	Web of Science
Papa	(Novella <i>et al.</i> , 2008)	Concentration of nutrient solution in the hydroponic production of potato minitubers	Referencias
Papa	(Oraby <i>et al.</i> , 2015)	A Low Nutrient Solution Temperature and the Application of Stress Treatments Increase Potato Mini-tubers Production in an Aeroponic System	Web of Science
Papa	(Rykaczewska, 2016)	The potato minituber production from microtubers in aeroponic culture	Web of Science
Papa	(Sharma <i>et al.</i> , 2023)	Effect of planting periods on production potential of potato (<i>Solanum tuberosum</i>) varieties under aeroponics	Web of Science
Papa	(Silva <i>et al.</i> , 2022)	Optimal Nutrient Solution and Dose for the Yield of Nuclear Seed Potatoes under Aeroponics	Web of Science

Cultivo	Autor/Año	Título	Fuente
Papa	(Sumarni <i>et al.</i> , 2019)	Effect of electrical conductivity (EC) in the nutrition solution on aeroponic potato seed production with root zone cooling application in tropical Lowland, Indonesia	Scopus
Papa	(Tengli <i>et al.</i> , 2022)	Shoot and root zone temperatures are critical in bidirectional regulation of tuberization in potato	ScienceDirect
Papa	(Tessema <i>et al.</i> , 2017)	Determination of nutrient solutions for potato (<i>Solanum tuberosum</i> L.) seed production under aeroponics production system	Scopus
Pimiento	(Amalfitano <i>et al.</i> , 2017)	Effects of cultural cycle and nutrient solution electrical conductivity on plant growth, yield and fruit quality of 'Friariello' pepper grown in hydroponics.	Referencias
Tomate	(Aini <i>et al.</i> , 2019)	The effect of nutrient concentration and inoculation of PGPR and AMF on the yield and fruit quality of hydroponic cherry tomatoes (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill. var. <i>cerasiforme</i>)	Scopus
Tomate	(Komosa <i>et al.</i> , 2020)	Yield and nutrient status of greenhouse tomato (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.) grown in new and re-used rockwool and polyurethane, NFT and aeroponics	Web of Science
Tomate	(Minjuan <i>et al.</i> , 2019)	Evaluation of the growth, photosynthetic characteristics, antioxidant capacity, biomass yield and quality of tomato using aeroponics, hydroponics and porous tube-vermiculite systems in bio-regenerative life support systems	Web of Science
Tomate	(Nabati <i>et al.</i> , 2021)	Lowering medium pH improves tolerance of tomato (<i>Lycopersicon esculentum</i>) plants to long-term salinity exposure	Scopus
Tomate	(Rajatha <i>et al.</i> , 2022)	Soilless system: An approach for hybrid seed production in tomato (<i>Solanum lycopersicum</i>)	Web of Science

Cultivo	Autor/Año	Título	Fuente
Tomate	(Signore <i>et al.</i> , 2016)	A targeted management of the nutrient solution in a soilless tomato crop according to plant needs.	Referencias

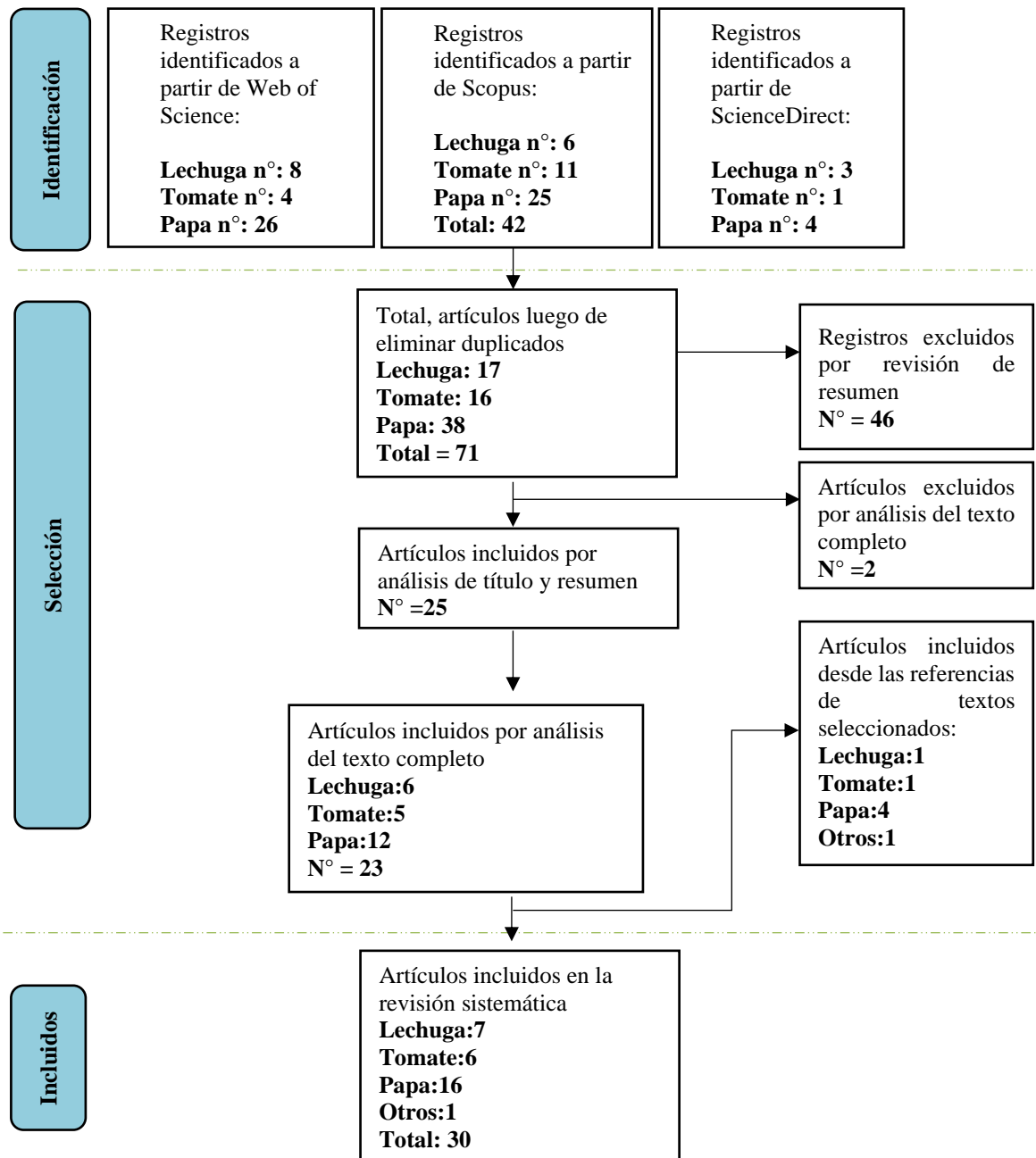


Figura 1. Diagrama de búsqueda y selección de artículos según protocolo PRISMA 2020.

Distribución temporal y geográfica de los artículos seleccionados

Siguiendo el protocolo propuesto por Yepes-Núñez *et al.* (2021), se seleccionó un total de 23 estudios desde las bases de datos (Web of Science, Scopus y Science Direct) entre los años 2015 y 2023 para llevar a cabo esta investigación. Además, se incluyeron 7 estudios adicionales a través de la revisión de la bibliografía de los estudios seleccionados. Esta metodología de selección garantizó una amplia gama de estudios relevantes y actualizados para respaldar los hallazgos y conclusiones de la investigación

Un total de 43,34% de los 30 artículos seleccionados fueron publicados solo en los últimos 3 años, por otra parte, los otros 6 años desde el 2015 hasta el 2020 conformaron un 46,63% del total como se aprecia en la Fig. 2.

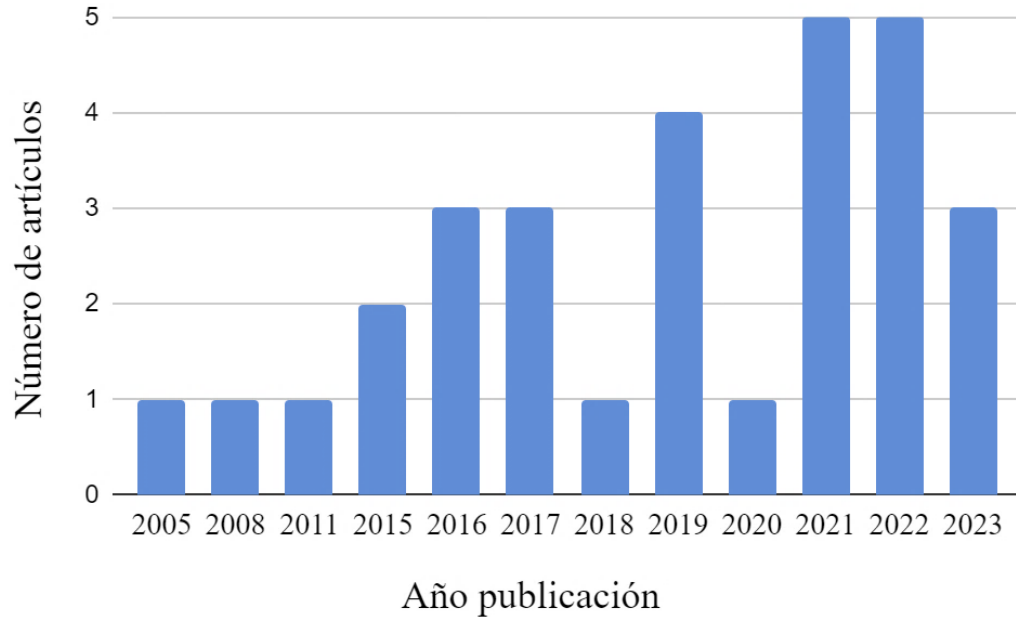


Figura 2. Distribución anual de las publicaciones de los artículos seleccionados para la revisión sistemática, los cuales fueron escogidos siguiendo el protocolo PRISMA 2020.

En cuanto a la distribución geográfica de los países de publicación de los artículos, se observó que el 66,7% de los estudios fueron publicados desde países ubicados en los continentes asiático y europeo, con un 46,7% y un 20% respectivamente (Fig. 3). Además, se encontró que los países que presentaron mayor número de publicaciones tendían a concentrarse en regiones cercanas a la línea del ecuador (Brasil (5), Indonesia (4) e India (3)), esto informaría

sobre las características climáticas del lugar donde se desarrollaron los estudios con implementación de sistemas de cultivo sin suelo (Fig. 4).

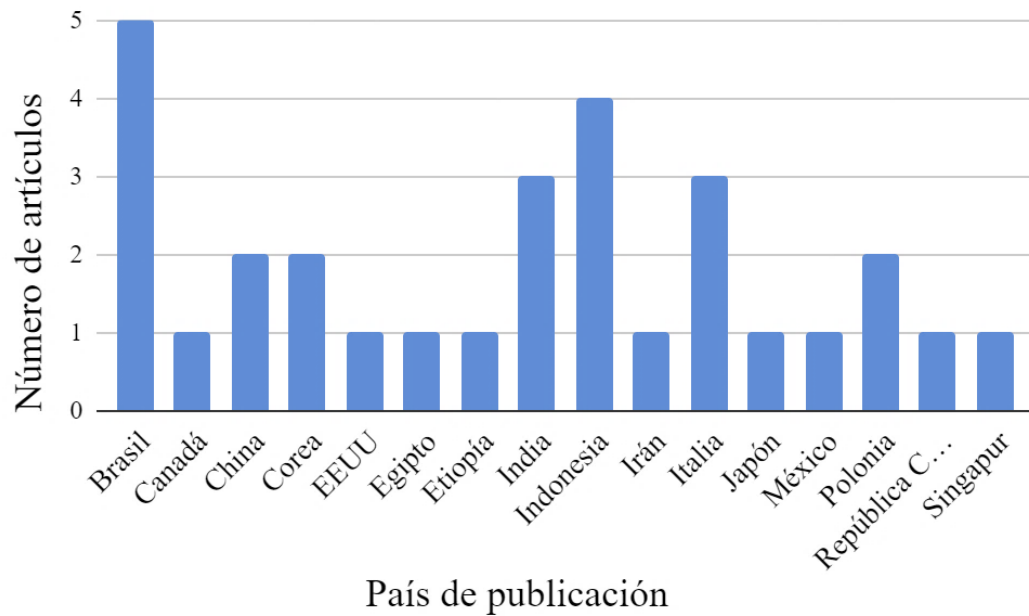


Figura 3. Distribución de artículos seleccionados para la revisión sistemática sobre estudios de CE para los tipos de hortalizas escogidas, clasificados por país de publicación durante el período 2015-2023.

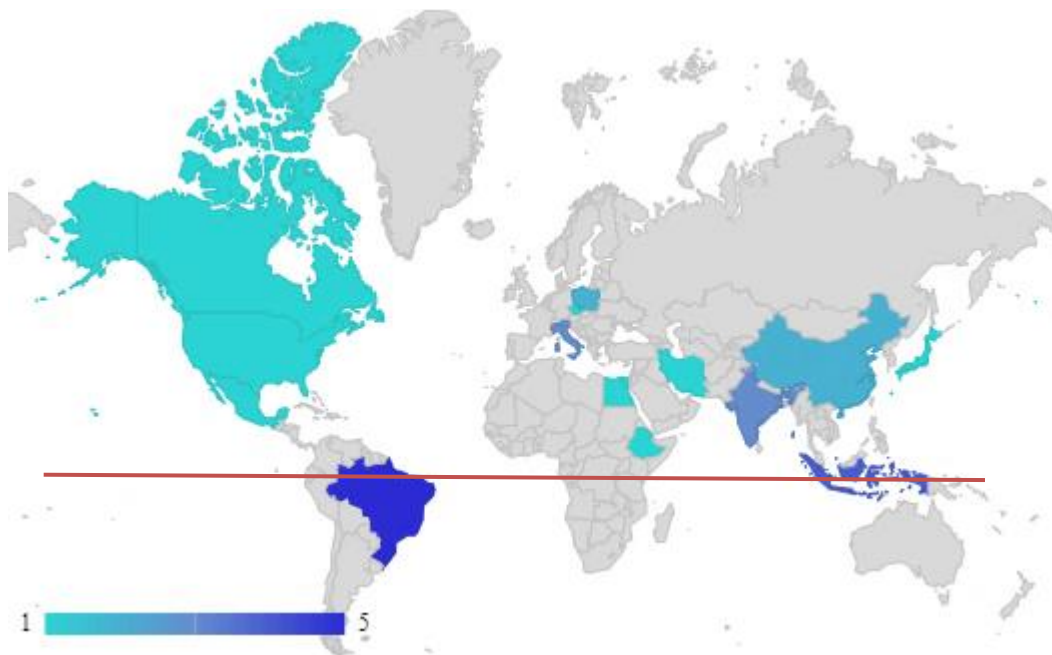


Figura 4. Distribución geográfica de los artículos publicados que se seleccionaron en la revisión sistemática. Línea roja corresponde a una representación de la línea del ecuador (paralelo 0°).

Información general de los artículos seleccionados

Los 30 artículos seleccionados consideran 16 artículos de papa (53,3%), 7 artículos de lechuga (23,3%), y 6 artículos de tomate (20%), además, se incluyó el pimiento ‘Friariello’ (3,3%) en el análisis, ya que se consideró como un estudio importante durante la revisión de las referencias, en este, se estudió el efecto de cuatro niveles de CE en el crecimiento, rendimiento y calidad del pimiento durante dos temporadas en un sistema de cultivo sin suelo. En el caso de la lechuga, los autores trabajaron con variedades como: ‘Ifram’ (Egipto), ‘Greenspan’ (Japón) y ‘Salinas’ (Singapur), también cultivares como: ‘Nenglv naiyou’ y ‘Dasusheng’ en Estados Unidos e Italia. En el caso de papa, las variedades utilizadas fueron: ‘Mystere’ y ‘Chieftain’ (Canadá), ‘Adéla’, ‘Zuza’ y ‘Ornella’ (República Checa), ‘Macaca’ (Brasil), ‘Granola’ (Indonesia), ‘Kufri Mohan’, ‘Kufri Himalini’, ‘Kufri Lauvkar’ y ‘Kufri Jyoti’ (India), ‘Agata’ (Brasil), ‘Ametyst’, ‘Taifun’ y ‘Nagore’ (Polonia), los cultivares que fueron utilizados son: ‘Superior’, ‘Jasim’ y ‘Atlantic’ (Corea). En el caso del tomate, las variedades utilizadas entre los investigadores fueron: Naomi (Italia), ‘Dwarf’ (China), ‘Mobil’ (Irán), ‘Golden Gem’ (Indonesia) y ‘Tomimaru’ (Polonia). Para el cultivo de pimiento la variedad utilizada en el estudio fue ‘Friariello’. Es de señalar que el 23,3% de los estudios recogidos no indicaron la variedad o cultivar de la hortaliza estudiada, este dato según se señala más tarde, es importante al momento de estudiar su respuesta ante un cambio en la CE.

Solución nutritiva

En la Figura 5 se muestra el tipo de solución nutritiva que se utilizó en los sistemas de cultivo sin suelo, la solución propuesta por Hoagland and Arnon (1938), tanto su versión original como su versión modificada alcanzan el 20% de las soluciones nutritivas utilizadas. Por otra parte, cabe destacar la cantidad de artículos que no presentan información respecto a la solución nutritiva utilizada para el desarrollo del experimento (36,7%), esto deja un vacío de información respecto a la forma iónica y proporciones de sales que componen la solución nutritiva utilizada, debido a esto, se dificulta la tarea de conocer si los resultados obtenidos por los estudios se deben en gran parte a la composición nutricional que se utilizó para la producción hortofrutícola. Para más detalle sobre la composición química de cada una de las soluciones nutritivas citadas en este trabajo, se recomienda consultar el Anexo A.

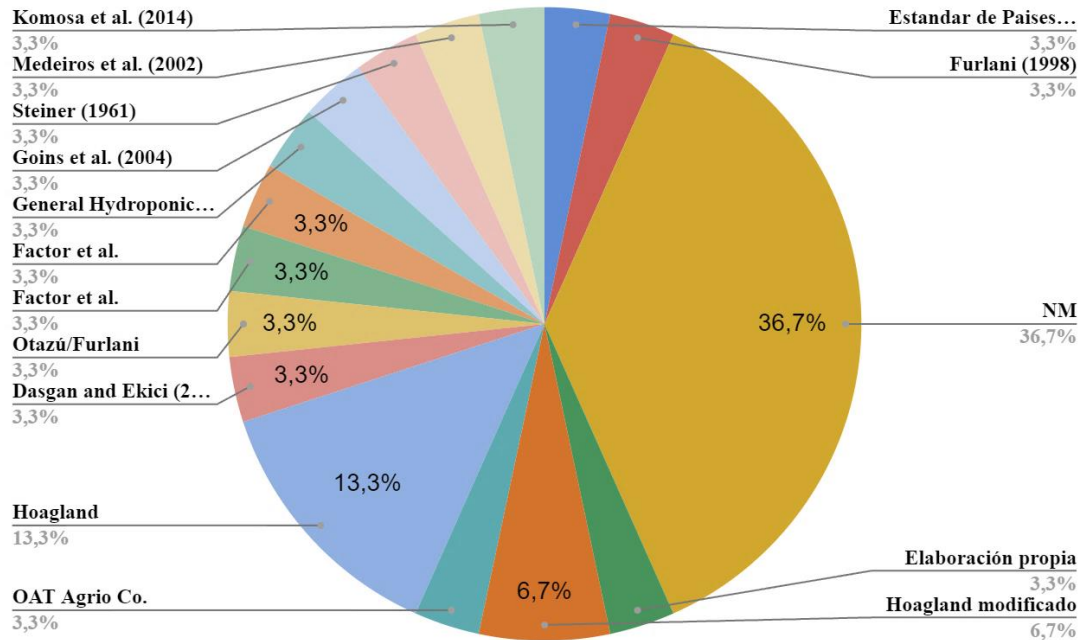


Figura 5. Distribución porcentual de las soluciones nutritivas utilizadas en los experimentos de los artículos seleccionados para la revisión sistemática (NM: no medido o no informado).

Conductividad eléctrica de la solución nutritiva (CE)

En relación con la conductividad eléctrica estudiada y utilizada en estos 30 artículos, se puede encontrar un amplio rango de CE utilizado para cada cultivo (Fig. 6), sin embargo, existen ciertos niveles donde se encuentran los rangos óptimos recomendados por los autores para el correcto desarrollo del cultivo sin algún tipo de estrés por exceso o falta de nutrientes, estos valores coinciden con la literatura, donde Carrasco *et al.* (2007) menciona un rango de 1,5 dS/m en el caso del cultivo de lechuga, en el caso de tomate, Herrera (1999) comenta que la CE utilizada debe ser mayor a 2,0 dS/m y menor a 6 dS/m, para el pimiento una CE de 2,0 dS/m es la óptima, por sobre esta CE, Pérez-Vazquez *et al.* (2020) menciona que el cultivo de pimiento disminuye su rendimiento, mientras que Calori *et al.* (2017) menciona un óptimo de CE 2,1-2,2 dS/m en el caso de papa. En los estudios seleccionados, los cultivos fueron sometidos a diferentes condiciones, para el caso de lechuga, los autores trabajaron con una media en torno a 1,99 dS/m, en el caso de la papa se trabajó con una media de 2,18 dS/m y para el tomate el valor medio de CE en las soluciones nutritivas estudiadas alcanza los 7,73 dS/m, este valor medio de CE se debe a valores extremos utilizados por Signore *et al.* (2016) y Nabati *et al.* (2021), en estos estudios se utilizaron concentraciones crecientes de nutrientes hasta llegar a una CE de 10 dS/m y 20 dS/m respectivamente, con esto el cultivo de tomate fue el que se sometió a mayores niveles de salinidad en los experimentos seleccionados para la revisión sistemática.

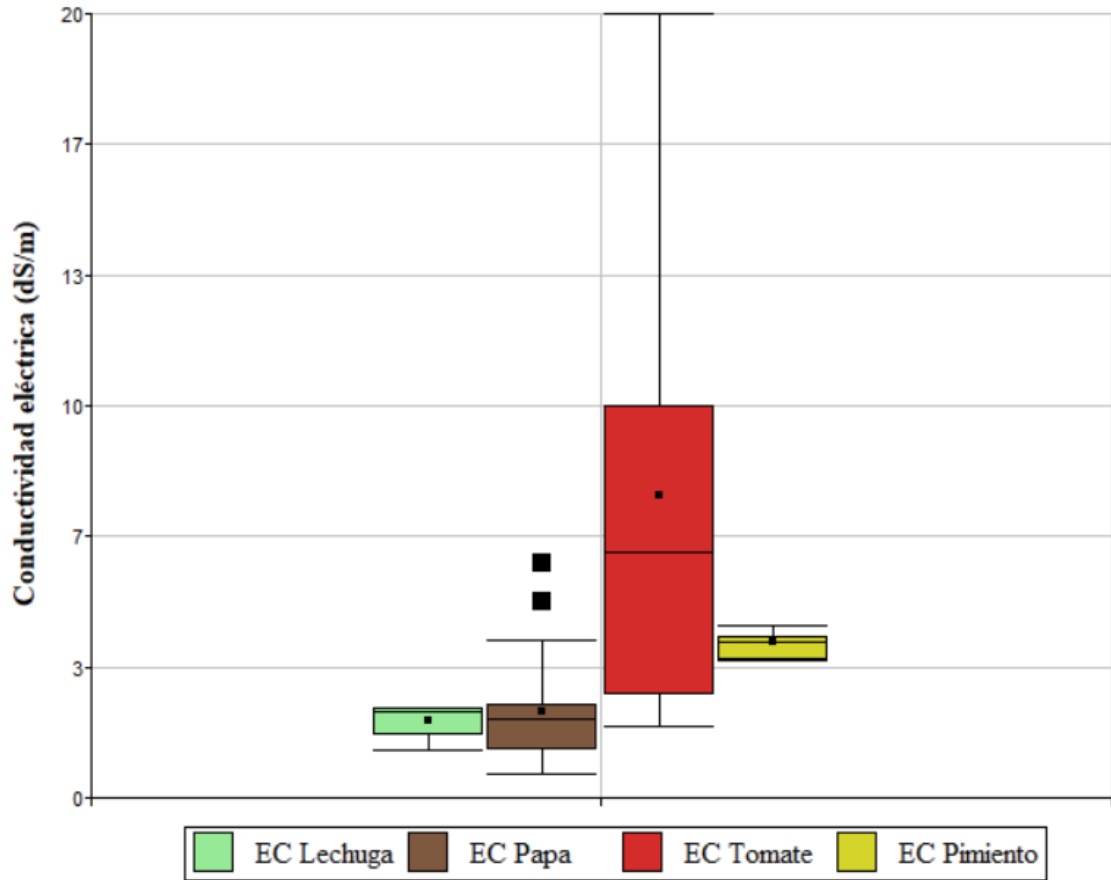


Figura 6. Gráfico box-plot con las conductividades eléctricas utilizadas en los ensayos de los estudios seleccionados para la revisión sistemática en cultivo de lechuga, papa, tomate y pimiento. Los valores corresponden a todas las conductividades eléctricas que se utilizaron para cada cultivo en los experimentos.

Cuadro 2. Cultivos estudiados en la revisión sistemática, detallando el hemisferio donde se realizó el experimento, la estación del año, la conductividad eléctrica de la solución nutritiva empleada y el cultivar correspondiente.

Especie	Hemisferio	Estación	CE	Cultivar	
Lechuga	Norte	Invierno	2,3 dS/m	Nenglv naiyou y Dasusheng	
		Otoño	1,6-2,2 dS/m	NM	
		Verano	2,1-2,3 dS/m	Ifram	
		NM	1,2 dS/m	Greenspan	
	Sur	NM		2,2 dS/m	Salinas
				NM	Nenglv naiyou y Dasusheng
			NM	NM	NM
			NM	NM	NM
Papa	Norte	Invierno	1,2 dS/m	Kufri Jyoti	
		Otoño	1,8 dS/m	NM	
			1,2 dS/m	Kufri Jyoti	
			NM	Kufri Mohan, Kufri Himalini y Kufri Lauvkar	
		Primavera	1,5 dS/m	NM	
			2,2 dS/m	Ametyst, Tajfun y Nagore	
	Sur	Invierno		2,3 dS/m	NM
				0,6-2,4 dS/m	Superior, Jasim y Atlantic
				0,9-2,0 dS/m	Adéla, Zuza y Ornella
			NM	Mystere y Chieftain	
			2,15 dS/m	NM	
			NM	Agata	
Norte	Otoño		NM	NM	
			2,2 dS/m	Agata	
			1,35-1,6 dS/m	Agata	
		4,0 dS/m	Granola		
		1,5-4,0 dS/m	Macaca		
Pimiento	Norte	Invierno	3,8-4,1 dS/m	Nocera	
		Verano	3,8-4,1 dS/m	Nocera	
Tomate	Norte	Primavera	2,3 dS/m	Tomimaru	
		NM	NM	Dwarf	
			NM	NM	
			4,0 dS/m	Mobil	
		5,0 dS/m	Naomi		

En el caso de la lechuga, se encontró que el 45,5% de los artículos recomienda CE en rangos entre 2,0-2,4 dS/m (Fig. 7), para el caso del cultivo de papa aeropónica, el 55,5% de los

artículos sugiere una CE entre 1,2-2,4 dS/m (Fig. 8) y en el caso del tomate, la distribución de las CE recomendadas por los artículos es pareja, sin embargo, los autores plantean que no existiría una mejoría en el costo-beneficio en la producción a partir del aumento de CE sobre 4 dS/m y además, promovería la contaminación de aguas profundas (Fig. 9). Esto indicaría que el rango de CE se encontraría entre 2,3-4 dS/m para el cultivo de tomate en un sistema de cultivo sin suelo. La CE fue estudiada a lo largo de estos artículos con la finalidad de conocer e investigar su importancia en el desarrollo de los cultivos y el beneficio que tendría el aumento del contenido de nutrientes en las soluciones nutritivas para la producción hortícola en sistema aeropónico.

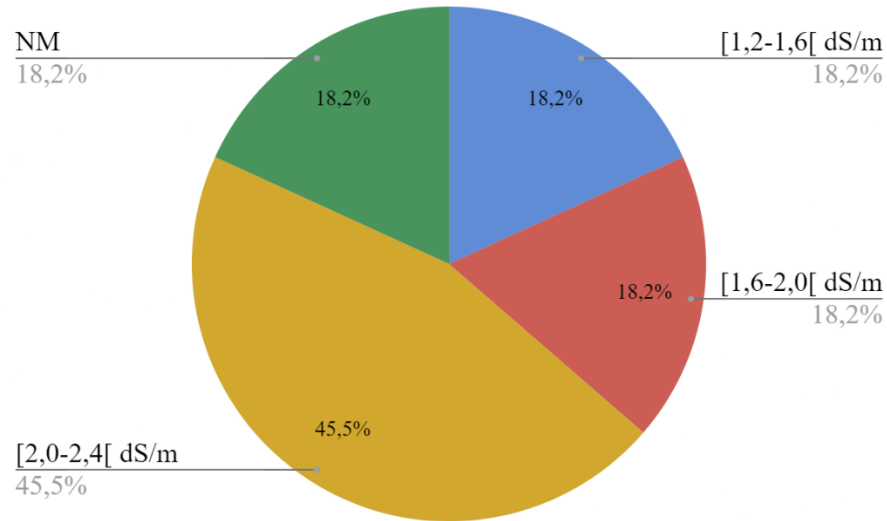


Figura 7. Distribución de los rangos de conductividad eléctrica recomendada por los autores para el cultivo de lechuga en un sistema de cultivo sin suelo en sus estudios (NM: no medido o no informado).

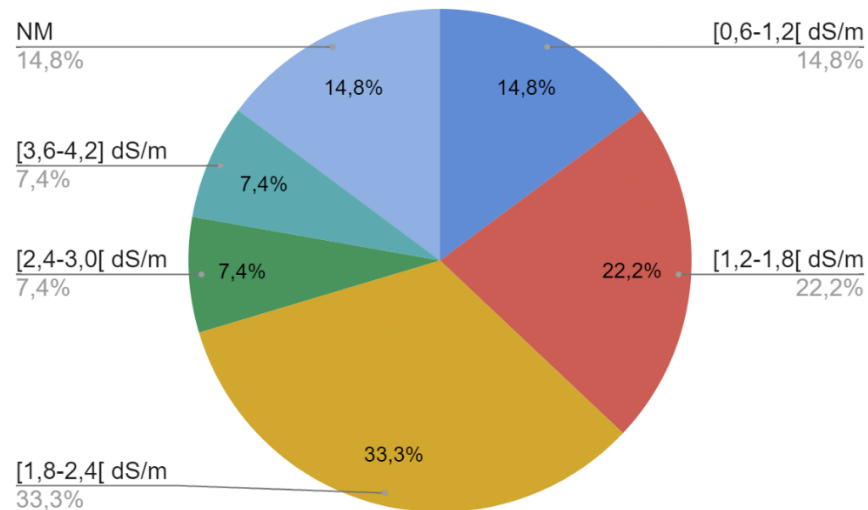


Figura 8. Distribución de los rangos de conductividad eléctrica recomendada por los autores para el cultivo de papa en un sistema de cultivo sin suelo en sus estudios (NM: no medido o no informado).

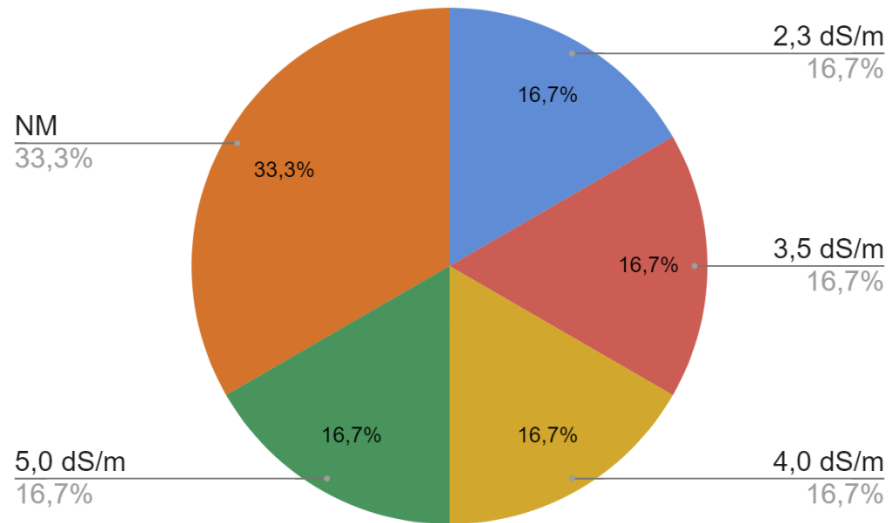


Figura 9. Distribución de los rangos de conductividad eléctrica recomendada por los autores para el cultivo de tomate en un sistema de cultivo sin suelo en sus estudios (NM: no medido o no informado).

Acidez de la solución nutritiva (pH)

En el estudio del pH de la solución nutritiva, se encontraron diferentes rangos que fueron utilizados para las soluciones nutritivas para cada tipo de cultivo (Fig. 10), estos corresponden a valores de pH que utilizaron los autores en los experimentos de sus artículos. Para la lechuga, se observó que el rango de pH utilizado por los autores de los estudios es de 5,6-7,3, con una media de 6,37 y el 55% de los datos de pH se concentraron en el rango de [5,6-6,45]. En el caso del cultivo de papa, se encontró un rango de pH 4,0-7,0, con una media de 5,78 y un 59% se concentró en el rango de [5,5-6,5]. Para el tomate, los rangos fueron de 4,5-9,0, con una media de 6,46 y el 59% se concentró en el rango de [5,25-6,75]. Estos hallazgos son relevantes para este trabajo, ya que se sabe que el pH de la solución nutritiva afecta directamente la disponibilidad de nutrientes para los cultivos. Un pH adecuado es fundamental para asegurar una nutrición óptima de las plantas. En el caso del artículo que estudia al pimiento, el pH se mantuvo en 5,8 y no se pudo comparar con otros estudios del mismo cultivo, ya que se trató como un estudio único para esa especie.

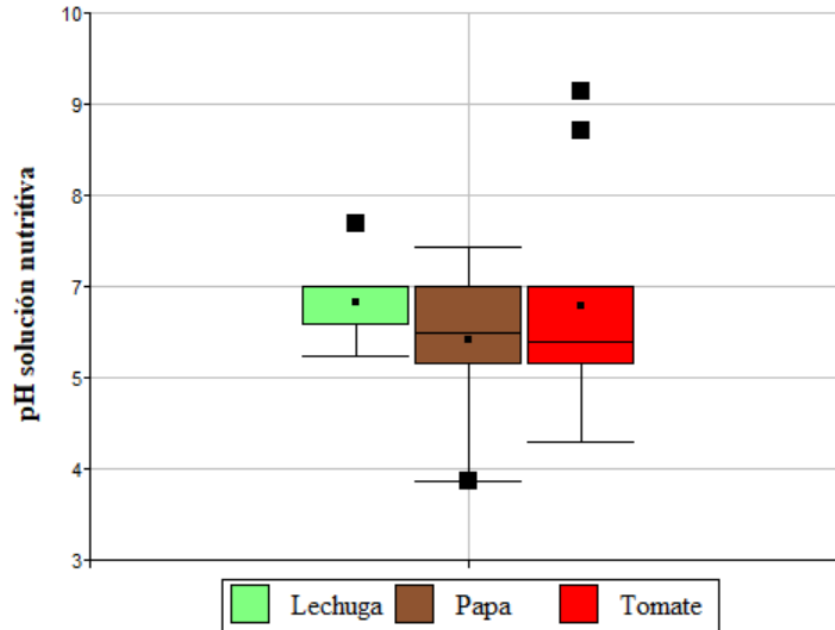


Figura 10. Gráfico box-plot con los rangos de pH utilizados por los autores de los artículos seleccionados para la revisión sistemática para el cultivo de lechuga, papa y tomate.

Invernadero

Los investigadores de los artículos seleccionados (Balena *et al.*, 2021; Calori *et al.*, 2017; Carotti *et al.*, 2023; Čížek & Komárková, 2022; García-Segura *et al.*, 2021; Gangopadhyay *et al.*, 2021; Hussain Tunio *et al.*, 2022; Komosa *et al.*, 2020; Mahrous Korany Mohamed *et al.*, 2022; Nabati *et al.*, 2021; Oraby *et al.*, 2015; Silva Filho *et al.*, 2022; Signore *et al.*, 2016; Sumarni *et al.*, 2019; Tessema *et al.*, 2017) informan el beneficio que puede significar la implementación de un sistema de cultivo cerrado en invernadero en un contexto de ambiente y clima cada vez más cambiante. La utilización de invernaderos junto con la incorporación de tecnologías de regulación como sensores, aportaría beneficios tales como el control de temperatura, mediciones más precisas, control de la evapotranspiración, manejo de la humedad relativa, control eficiente de plagas/enfermedades y la posibilidad de suplementar el cultivo con CO₂. Este enfoque buscaría mejorar el rendimiento y la calidad de los cultivos mediante el uso de tecnologías eficientes en energía y ahorro del recurso hídrico. Estos sistemas cerrados pueden ayudar a mitigar los efectos adversos del cambio climático y aumentar la eficiencia en el uso de agua.

En la Figura 11 se muestra el porcentaje de artículos que incorporan un sistema de invernaderos para el desarrollo de sus estudios.

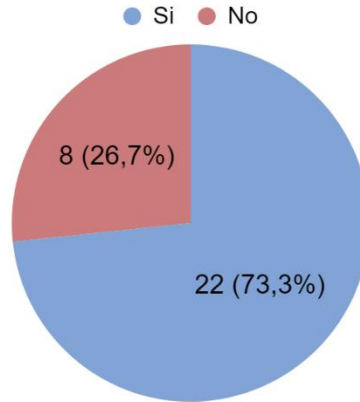


Figura 11. Estudios seleccionados para la revisión sistemática que incorporan la utilización de invernaderos en sus experimentos.

Sistema de cultivo aeropónico

Lechuga (*Lactuca sativa*)

Los autores que experimentaron con el cultivo de lechuga indicaron que el sistema de producción aeropónico en lechuga se destaca por producir una relación raíz/brote y crecimiento de las raíces significativamente mayor en comparación con otros sistemas de cultivo como la hidroponía y el cultivo en sustrato suelo (Li *et al.*, 2018). Esto dado que, en la aeroponía, la solución nutritiva se rocía en forma de microgotas a intervalos (Tunio *et al.*, 2022), esto promovería un aumento en el crecimiento de las raíces (Li *et al.*, 2018). El estudio realizado por Awalina *et al.* (2022), indica que el suministro continuo de riego por microaspersión presentó los mejores resultados, produciendo lechugas más altas y de desarrollo foliar más rápido, estos resultados coinciden con los obtenidos por Choong *et al.* (2016), donde el aumento en la frecuencia de nebulización y la disminución de la temperatura en la zona radical mostró obtener mejores resultados, sugiriendo que el control de estos parámetros podría ayudar a mejorar la producción en zonas tropicales. Además, se menciona que la buena aireación del entorno radical es la ventaja más importante del sistema aeropónico respecto del sistema hidropónico. Resultados obtenidos por Hikosaka *et al.* (2015) en sistemas aeropónicos de niebla seca (mezcla de agua y aire dentro de aspersor utilizando un volumen menor de agua) muestran que este sistema permite controlar fácilmente la tasa de flujo de la neblina seca a través de la rizosfera mediante el uso de un ventilador en el sistema, esto es importante ya que el crecimiento de las raíces y el desarrollo de las plantas se ven afectados por esta tasa de flujo, lo que a su vez afecta la cantidad de partículas de neblina seca que se adhieren a la superficie de las raíces. Las raíces crecen y se desarrollan de manera adaptativa a la rizosfera aeróbica con una buena ramificación, pelos radicales y alta actividad respiratoria. Estas raíces pueden aumentar la capacidad de absorción de agua y nutrientes, lo que lleva a satisfacer la demanda de evapotranspiración de manera suficiente y mejorar la tasa fotosintética y la conductancia estomática. Además, Hikosaka *et al.* (2015) sugieren que el sistema de cultivo de neblina seca inhibe la aparición de “tip

burn” (punta quemada) en la producción de lechuga con cantidades mínimas de solución de nutrientes y agua.

En los resultados de los estudios, se encontró que el uso del sistema aeropónico resultó en un aumento de la eficiencia en el uso del agua y la recuperación del agua transpirada por las plantas del sistema cuando se hacía uso de sistemas de invernadero (Carotti *et al.*, 2023). Además, Li *et al.* (2018) incluyen que la aeroponía es beneficiosa para producir cultivos de raíces verdaderas de alto valor, como por ejemplo plantas medicinales. Otros estudios como el de Mohamed *et al.* (2022) demostraron que la producción de lechuga a temperaturas del aire altas de hasta 41°C, siempre que se enfriara la zona de raíces a temperaturas entre 28,7°C-29,2°C. A nivel nutricional, Mohamed *et al.* (2022), demostraron que los sistemas ACRz (sistema automatizado de refrigeración de zona radical) y NCRz (sin refrigeración) tienen una diferencia significativa en el contenido de clorofila y carotenoides de las plantas de lechuga, lo que puede atribuirse a la disminución de absorción de nutrientes debido a una escasez de los sistemas radicales. También el estudio revela que el sistema automatizado de enfriamiento de la zona de la raíz (ACRz) de este estudio aumentó la absorbancia de la lechuga de nutrientes no orgánicos como N, P y K en un 45,5%, 66,6% y 45% respectivamente, también aumentó el peso fresco, la clorofila total, el ácido ascórbico, los carbohidratos y los aminoácidos totales aumentaron un 131%, 26,2%, 41,9%, 30,7% y 6,2% respectivamente, en comparación con el sistema aeropónico convencional sin refrigeración en zona radical.

Finalmente, los autores reiteran que el sistema aeropónico destaca por su eficiencia en el uso del agua (Carotti *et al.*, 2023; Signore *et al.*, 2016), la mejora significativa en el crecimiento de las raíces, donde el estudio de Li *et al.* (2018) mencionan que la relación raíz/brote del sistema aeropónico es 3 veces mayor que en un sistema hidropónico, esto contribuye a la producción de raíces verdaderas de alto valor. Estos beneficios son relevantes en los cultivos que se producen en este sistema, tanto de lechugas como de otras hortalizas que se verán más adelante.

Papa (*Solanum tuberosum*)

Los estudios recopilados sobre el cultivo de papa resaltan los múltiples beneficios de la aeroponía en comparación con el cultivo tradicional en suelo. Por ejemplo, García-Segura *et al.* (2021) encontraron un aumento del 551% en la producción de mini-tubérculos de papa en el sistema aeropónico en comparación con el sistema de cultivo tradicional en suelo, datos que coinciden con los obtenidos por Balena *et al.* (2021) y Rykaczewska (2016) que observaron que el número de mini-tubérculos producidos por la planta y por metro cuadrado fue significativamente mayor en la producción aeropónica que en otros sistemas de cultivo más tradicionales. Estos resultados se atribuyeron a la mayor producción de mini-tubérculos por estolón y a un mayor número de estolones desarrollados, lo que también resultó en una mayor uniformidad en el tamaño y peso de los mini-tubérculos obtenidos. Por su parte, la variación en la solución nutritiva es el factor fundamental que puede traer cambios en la altura de la planta y el largo de la raíz (Tessema *et al.*, 2017), es por esto por lo que es esencial tener un buen conocimiento de los requerimientos minerales de las plantas para formular soluciones nutritivas óptimas para el cultivo y su etapa de desarrollo. Un ejemplo es el estudio realizado por Da Silva *et al.* (2022) en el cual se menciona que el nitrógeno es importante

para el cultivo de papa porque juega un papel fundamental en la diferenciación y el crecimiento de los tubérculos, el exceso de este puede retrasar la diferenciación y el crecimiento inicial de los tubérculos, estimulando el crecimiento de los brotes. Si se proporciona un alto suministro de nitrógeno antes de la tuberización, puede resultar en elongación del estolón y retrasar el inicio de la tuberización. Esto demuestra la importancia de controlar los requerimientos del cultivo en sus diferentes etapas del ciclo. Además, se menciona que la aeroponía, combinada con el uso de invernaderos, permite un mayor control sobre las variables ambientales, como la temperatura, la humedad y el control de plagas/enfermedades, lo que puede mejorar aún más la calidad y rendimiento de los mini-tubérculos.

En el estudio de Da Silva *et al.* (2018) indicaron que el tipo de boquilla de nebulización y el revestimiento interno del recipiente aeropónico tipo UFV (sistema que utiliza un cubo de polietileno que contiene a la solución nutritiva) tuvieron un efecto significativo en el rendimiento de los mini-tubérculos. Otro parámetro de importancia es el estudiado por Kuncoro *et al.* (2021) y Tengli *et al.* (2022), donde los resultados de los experimentos revelaron que el nivel óptimo del tratamiento con temperatura en la cámara de la raíz aumentó el rendimiento del tubérculo semilla de patata mini-tubérculo (hasta 77%) en sistema aeropónico. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Oraby *et al.* (2015) donde observaron que un enfriamiento de la temperatura de la solución de nutrientes a 18°C y la retirada de nitrógeno en la tuberización pueden aumentar significativamente las variables de crecimiento y el rendimiento de los tubérculos, El aumento de la temperatura en la zona radical da como resultado una partición reducida de carbono para sumidero o tubérculo, y se ha encontrado que inhibe la formación de tubérculos y altera la asignación de asimilados (Tengli *et al.*, 2022). Además, demostraron que es posible aumentar el rendimiento de mini-tubérculos en sistemas aeropónicos mediante un protocolo optimizado de gestión de nitrógeno para la producción de tubérculos de semilla de papa, incluso en temperaturas altas de verano mediante el enfriamiento de la solución de nutrientes a 18°C. Sharma *et al.* (2023) mencionan que otro factor a considerar es el periodo de siembra, este factor es crucial para la producción de mini-tubérculos de papa durante la temporada de otoño en las colinas altas de Shimla. Un retraso en la siembra de 10 días da como resultado una reducción significativa no solo en el vigor de las plantas bajo aeroponía, sino también en el número y peso de las plantas.

Respecto a la CE de la solución nutritiva, se encontró que esta variable afecta la absorción de nutrientes de la etapa de crecimiento de la planta, la productividad y la calidad de los tubérculos. Chang (2005) y Chang *et al.* (2011), reportaron que las variedades de papa “Superior” y “Jayoung” son capaces de crecer en una gran amplitud de niveles de CE en la solución, mientras que la nueva variedad “Haryeong” (Chang *et al.*, 2011), necesitó un manejo óptimo de la CE en la solución nutritiva para obtener una alta producción de tubérculos en un sistema de cultivo aeropónico. En uno de los estudios recopilados se encontró que el aumento de la CE de la solución nutritiva en el cultivo de papa puede tener efectos tanto positivos como negativos en el desarrollo de la planta y la producción de tubérculos. Por un lado, se observó que la tasa de fotosíntesis de la hoja aumentó en un 15,4% y un 14,1% cuando la CE aumentó de 2,5 a 4 dS/m para las plantas en el invernadero (Sumarni *et al.*, 2019). Sin embargo, por otro lado, Sumarni *et al.*, (2019) encontraron que el

crecimiento de la altura de la planta, el número de hojas y la densidad estomática disminuyen con el aumento de la CE por sobre los 2 dS/m.

Finalmente, los autores reiteran que la CE de la solución nutritiva debe ser monitoreada y ajustada cuidadosamente para evitar niveles excesivos que puedan afectar negativamente el crecimiento y la producción de tubérculos. Además, se destaca que la respuesta óptima de la CE puede variar entre diferentes variedades de papa y que se requiere seguir investigando para determinar los niveles ideales de CE para cada variedad y etapa de crecimiento de la planta.

Tomate (*Solanum lycopersicum*)

Para el cultivo de tomate, los autores encontraron que el sistema de cultivo aeropónico produce un rendimiento comercializable y total más alto que en los cultivos en losas nuevas de lana de roca en un sistema hidropónico NFT (Komosa *et al.*, 2020). La aeroponía e hidroponía registraron una floración más temprana, un peso de fruto significativamente mayor, un mayor número total de frutos por planta y peso específico respecto a un sistema de producción tradicional (Rajatha *et al.*, 2022). El sistema aeropónico proporciona un equilibrio sumidero/fuente más favorable que mejora el crecimiento de la raíz en comparación con las complejidades de la mineralización, la movilización y la absorción por parte de las plantas en el sistema convencional y, además, la relación costo-beneficio fue más alta en aeroponía que en sistemas como el hidropónico y tradicional (Rajatha *et al.*, 2022). Para el correcto funcionamiento del sistema aeropónico, es importante controlar la nutrición, el pH, la aireación de la zona de la raíz y la temperatura tanto ambiental como de la zona radical. También, los autores indican que se debe tener en cuenta la absorción selectiva de nutrientes por parte de las plantas y el aumento de los contenidos de nutrientes y sodio en el entorno de la raíz, lo que conduce a un aumento de la CE de la solución nutritiva (Komosa *et al.*, 2020).

En cuanto a la conductividad eléctrica, se ha encontrado que un aumento de los contenidos de nutrientes y sodio en el entorno de la raíz conduce a un aumento de la CE de la solución nutritiva (Komosa *et al.*, 2020). Esto según indican los autores, puede tener un efecto tanto beneficioso como perjudicial en el desarrollo del cultivo. Por un lado, una mayor CE puede aumentar la absorción de nutrientes por parte de las plantas, lo que puede mejorar el crecimiento y el rendimiento. Por otro lado, una CE demasiado alta puede ser perjudicial para las plantas, ya que puede causar estrés hídrico y la toxicidad de los nutrientes (Nabati *et al.*, 2021). Cuando las plantas están expuestas a condiciones estresantes, la disipación térmica aumenta debido a un mayor diferencial de pH; esto se debe a una disminución en el transporte de electrones a CO₂ debido a la reducción de la conductancia estomática (gs) (Nabati *et al.*, 2021). Por lo tanto, es importante controlar la CE de la solución nutritiva para asegurar un ambiente óptimo para el crecimiento de las plantas.

Es importante tener en cuenta que un aumento de la CE también puede afectar la calidad de la fruta (Aini *et al.*, 2019). Se ha encontrado que el diámetro de la fruta experimenta un aumento debido al contenido total de nutrientes en la solución nutritiva (Aini *et al.*, 2019). Sin embargo, es importante controlar la concentración de nutrientes en la solución nutritiva para evitar una CE demasiado alta por sobre el umbral de 3 dS/m (Rosadi *et al.*, 2014), lo

que puede afectar negativamente la calidad de la fruta y reducir el rendimiento del cultivo. Finalmente, los autores indican que es muy importante encontrar un equilibrio adecuado entre la concentración de nutrientes y la CE de la solución nutritiva para asegurar un ambiente óptimo para el crecimiento y la calidad del cultivo de tomate.

Pimiento (*Capsicum annuum*)

El estudio realizado por Amalfitano *et al.* (2017) en Italia, encontró que la especie de pimiento 'Friariello' (*Capsicum annuum* L.) cultivada en un sistema hidropónico utilizando la técnica de película de nutrientes (NFT) tuvo un mejor crecimiento y rendimiento cuando se utilizó una solución nutritiva con una CE de 3,8 dS/m en comparación con las soluciones con CE de 3,5; 4,1 y 4,4 dS/m. Además, se encontró que el ciclo de invierno-verano produjo un mayor rendimiento que el ciclo de primavera-otoño. Esto debido a que el ciclo de invierno-verano permitió que las plantas desarrollaran un área foliar más grande y una biomasa más alta en comparación con el ciclo de primavera-otoño. Además, el ciclo de invierno-verano se benefició del aumento de la temperatura y la duración del día durante la fase de fructificación. Por otro lado, el ciclo de primavera-otoño tuvo la temperatura más alta en agosto y la más baja en noviembre, mientras que el ciclo de invierno-verano tuvo la temperatura más baja en febrero y la más alta en julio. El aumento de CE en la solución nutritiva se asoció con un mayor consumo de agua por parte de las plantas de pimiento 'Friariello'. Sin embargo, también se encontró que la solución nutritiva con una CE de 3,8 dS/m produjo el mejor crecimiento y rendimiento de las plantas, mientras que la solución con una CE de 4,4 dS/ resultó en una reducción del 25% en el consumo de agua. Por lo tanto, aunque un incremento de la CE puede aumentar el consumo de agua, no necesariamente se traduce en un mejor crecimiento y rendimiento de las plantas.

DISCUSIÓN

En el ámbito de los cultivos estudiados, se observaron mejoras significativas en el crecimiento de órganos como hojas y raíces al emplear sistemas de cultivo sin suelo, como el hidropónico y aeropónico. Este último, se destaca por promover una óptima oxigenación de las raíces y mostrar claras ventajas en la relación raíz/brote en comparación con otros sistemas sin suelo, como es el caso del hidropónico. A nivel de cultivo, Lei & Engeseth (2021) encontraron que no existía una diferencia evidente en las características morfológicas de las plantas de lechuga cultivadas de forma hidropónica y en el tradicional en sustrato suelo, a pesar de que el cultivo hidropónico promovió significativamente el crecimiento de las raíces. Estos resultados presentan una oposición respecto a lo obtenido por Li *et al.* (2018) que reveló que las lechugas cultivadas en hidroponía tenían partes aéreas más grandes, mientras que las cultivadas aeropónicamente tenían mayor peso seco de raíz y relación raíz/brote, mientras que las plantas cultivadas en suelo tenían el tamaño más pequeño. Resultados de Lei & Engeseth (2021) exponen que se encontró que la lechuga cultivada hidropónicamente tenía hojas más suaves y nervaduras más firmes que las cultivadas en sustrato suelo, lo que podría estar relacionado con un mayor contenido de lignina en las paredes celulares de la planta. En cuanto a la calidad nutricional de estas lechugas, no se encontraron diferencias significativas en los niveles de ácido ascórbico, clorofila, β -carotenos y fenoles totales entre la lechuga hidropónica y la cultivada en suelo, no obstante, la capacidad antioxidante de la lechuga cultivada en suelo fue significativamente mayor tanto en base seca como húmeda. En el caso del cultivo aeropónico, Li *et al.*, (2018) menciona que en ambos cultivares Dasushen y Nenglv naiyou, la relación raíz/brote de la lechuga aeropónica fue casi tres veces la de la lechuga hidropónica, y también fue significativamente mayor que la del cultivo en sustrato. El resultado más significativo de este estudio fue la importante mejora en el crecimiento de las raíces de lechuga en el sistema aeropónico. Sin embargo, el gran sistema de raíces de la aeroponía no conducía a una mayor biomasa aérea de brotes (rendimiento) que la hidroponía, esto es un punto fundamental para tener en cuenta.

Uno de los mayores problemas del sistema de cultivo aeropónico es el uso de intervalos de riego. Recordando que en aeroponía, la solución nutritiva se rocía en forma de gotas finas a intervalos, se ha estudiado que el tamaño de la gota y el intervalo de nebulización tienen un gran efecto sobre el crecimiento de las plantas en cultivo aeropónico (Li *et al.*, 2018), esto implicaría una limitación en el crecimiento de los brotes y desarrollo de las raíces, en el estudio de Awalina *et al.* (2022) se menciona que el flujo constante de solución nutritiva en el sistema aeropónico resulta en mejores resultados con plantas de lechuga más altas, el suministro “non-stop” acelera la tasa de crecimiento de las hojas debido a que un suministro de nutrientes adecuados juega un papel importante en la fase vegetativa. Si bien el estudio de Awalina *et al.* (2022) demuestra que un suministro de nutrientes con distinta frecuencia de tiempo en el sistema aeropónico produjo diferentes efectos sobre la altura promedio de la planta, el número de hojas, el diámetro del tallo, el área foliar y el peso fresco de las plantaciones de lechuga, no se menciona su implicancia en la respuesta de la planta en términos de crecimiento radical, esto es importante dado que se sabe que las plantas tienden a tener una respuesta adaptativa al déficit relativo de agua y nutrientes durante los intervalos de riego, es por lo que, se necesitan otros estudios para aclarar si el aumento de la proporción

de raíces en el sistema se debe netamente a estos intervalos como una respuesta adaptativa de la planta o a otros parámetros como la mayor disponibilidad de oxígeno o arquitectura propia del sistema aeropónico. Li *et al.* (2018) indican que el suministrar la solución nutritiva mediante microgotas y a frecuencias de riego promovería el aumento de la zona radical, sin embargo, el genotipo también tendría un rol importante en este estudio pues la respuesta variaba entre variedades de lechuga utilizadas en este experimento.

La concentración de nutrientes en la solución nutritiva para cada cultivo es de gran importancia para el crecimiento y desarrollo el cultivo (Smith *et al.*, 1983; Calori *et al.*, 2017). Además, Čížek y Komárková (2022) exponen que el estrés por salinidad depende tanto del cultivo como del cultivar con el que se esté trabajando. Los valores de CE de las soluciones nutritivas de los estudios seleccionados coinciden con los rangos recomendados para el cultivo de cada especie en un sistema de cultivo sin suelo, tal como se encuentra documentado en la literatura existente. El estudio de Novella *et al.* (2008) que utiliza el cultivo de papa, encontró que el aumento de la CE respecto a su umbral recomendado redujo la masa seca total y la de los mini-tubérculos en plantas micropropagadas, así como el crecimiento y la productividad de mini-tubérculos en plantas derivadas de mini-tubérculos. Además, observó que el incremento en la concentración de la solución nutritiva hasta una CE de 5,8 dS/m no afecta el número de mini-tubérculos, pero sí disminuye el peso fresco y medio de los mini-tubérculos, lo que a su vez reduce la productividad. También encontró que concentraciones bajas de solución nutritiva, alrededor de 1,0 dS/m, pueden ser utilizadas en la producción de mini-tubérculos de papa a partir de plántulas micropropagadas y mini-tubérculos. Por su parte, algunos autores advierten el posible beneficio de aumentar la CE en el cultivo, un ejemplo es el estudio de Sumarni *et al.* (2019) que muestra la respuesta del cultivo de papa sometido a diferentes concentraciones crecientes de CE, el estudio señala que la tasa de fotosíntesis de la hoja aumentó entre un 15,4% y un 14,1% cuando la CE aumentó de 2,5 a 4 dS/m bajo un sistema aeropónico en invernadero. Sin embargo, un aumento de la CE a 5,5 dS/m resultó en una tasa fotosintética 10% más baja que la CE de 4 dS/m. Esto demuestra la importancia de conocer la concentración óptima para el cultivo y cultivar en cuestión. Si bien el estudio de Novella *et al.* (2008), sugiere que existe la posibilidad de producir hortalizas en este sistema con una menor cantidad de fertilizantes químicos (menor concentración de solución nutritiva), es importante recordar que la disminución de la concentración de nutrientes supondría otras limitaciones en el crecimiento y desarrollo del cultivo.

Algunos autores como Amalfitano *et al.*, 2017 y Signore *et al.*, 2016 indican que, aunque el cultivo puede soportar un aumento en la salinidad de la solución, esto no se traduce en un aumento de rendimiento o ventaja en comparación con mantener concentraciones más bajas de conductividad eléctrica. Por el contrario, existe un aumento en los costos asociados tanto a producción como costo ambiental por el hecho de requerir una mayor cantidad de fertilizantes químicos para aumentar CE, asimismo, las plantas al ser sometidas a un exceso de sales tienden a tener problemas al captar nutrientes, esto provoca una mayor presencia de estos en las aguas residuales, lo que a su vez promueve la contaminación de aguas profundas por el recambio de esta.

Durante este estudio se ha visto que la calidad de los frutos, tubérculos y el rendimiento de las hortalizas en general dependen de una CE y un pH óptimo en la solución nutritiva, su

importancia radica en la capacidad de mantener los nutrientes en forma disponible para las plantas. En el caso del sistema aeropónico, los cultivos también dependieron de parámetros como la densidad de plantas por metro cuadrado (Carotti *et al.*, 2023), los intervalos de riego (Tunio *et al.*, 2022), el tamaño de gota (Li *et al.*, 2018), la temperatura de la solución nutritiva (Oraby *et al.*, 2015), la fecha de trasplante (Chang *et al.*, 2005), la variedad utilizada (Čížek y Komárková, 2022), la utilización de invernadero (Carotti *et al.*, 2023) y la forma iónica (sales) en que se aportan los nutrientes al cultivo (Rosadi *et al.*, 2014). Con frecuencia se encontró que la falta de información disponible respecto a estos parámetros limita la comparación de resultados con otros estudios, esto marcó un problema en el desarrollo del trabajo y dificulta el avance científico en el sistema de cultivo sin suelo.

Se plantea que existe la necesidad de seguir investigando la concentración de nutrientes ideal para cada una de las hortalizas cultivadas en los sistemas de cultivo sin suelo, ya que tanto su respuesta ante esta concentración y el umbral de sensibilidad a la salinidad pueden variar para cada variedad y cultivar, así también como la época del año donde se cultiva (Amalfitano *et al.*, 2017). También se recomienda continuar investigando y desarrollando sistemas tecnológicos automatizados capaces de regular estos parámetros involucrados en el desarrollo de los cultivos en los sistemas sin suelo, como son la temperatura ambiental, humedad relativa, pH, CE y temperatura de la zona radical con el objetivo de maximizar el rendimiento y eficiencia en la producción hortícola.

En el contexto actual, es importante promover e impulsar la optimización del sistema productivo como un objetivo central para disminuir la huella que produce la agricultura en el mundo. Esta optimización busca no solo reducir de manera significativa el consumo de recursos, sino también lograr un aumento considerable en el rendimiento productivo, en búsqueda de mitigar la alta demanda de alimentos mediante una producción sostenible y amigable con el medio ambiente. Este enfoque integral se centra en la búsqueda de una utilización más eficiente de los recursos disponibles, abarcando tanto aspectos materiales como energéticos. Al hacerlo, no solo se promueve la sostenibilidad ambiental, sino también disminuiría los costos que involucra utilizar un sistema de cultivo sin suelo.

Estos estudios tienen un rol importante en el desarrollo del sistema de producción aeropónico, pues sientan las bases para continuar mejorando la optimización de recursos utilizados en el sistema productivo en beneficio de potenciar la producción alimenticia.

CONCLUSIONES

Estudios realizados en cultivos de lechuga, papa, tomate y pimiento, demuestran que la CE de la solución nutritiva es un factor crucial en el desarrollo y rendimiento de estos cultivos. La CE afecta la absorción de nutrientes, y puede afectar la productividad y la calidad de los cultivos, así mismo, su respuesta óptima puede diferir entre cultivares.

La provisión adecuada y continua de nutrición, así como la temperatura y la densidad de plantación, son factores que influyen en la conductividad eléctrica y, por lo tanto, también son factores que modifican el crecimiento y la calidad de los cultivos.

Para lechuga, el umbral de CE es de 2-2,4 dS/m. La nutrición continua (“non-stop”) produce una planta de más alta y acelera la tasa de crecimiento de las hojas. Además, el sistema automatizado de enfriamiento de la zona de la raíz mejora la absorbancia de nutrientes y otros componentes importantes para el cultivo de lechuga incluso cuando la temperatura ambiental es desfavorable de hasta 41°C.

En papa, la CE de la solución nutritiva tiene un efecto significativo en el crecimiento y la productividad de mini-tubérculos. Si bien el aumento de la CE de 2,5 a 4 dS/m produce un incremento en la tasa de fotosíntesis de la hoja en un sistema aeropónico, rápidamente disminuye al superar el umbral de 4 dS/m. Un aumento de la CE por sobre el umbral, no afecta el número de mini-tubérculos, sin embargo, disminuye el peso fresco y medio de los mini-tubérculos, lo que a su vez reduce la productividad.

En tomate, la CE es clave en el desarrollo y rendimiento de las plantas en invernadero, al aumentar la CE de la solución nutritiva por sobre el umbral de 3-5 dS/m, el rendimiento total, el peso promedio de la fruta y el índice de área foliar disminuyen, mientras que el porcentaje de materia seca de la fruta tiende a aumentar.

Finalmente, no existe evidencia de una mejora sustancial en el rendimiento de los cultivos cuando la CE se incrementa por encima del umbral recomendado. Este hallazgo subraya la importancia de seguir investigando y refinando los umbrales específicos para cada cultivar. Además, es fundamental destacar la necesidad de incluir en cada investigación una amplia gama de parámetros que cumplen un rol fundamental en el sistema aeropónico como es la humedad relativa, la temperatura de la zona radical, la densidad de plantación, la época de plantación, entre otras, con el objetivo de mejorar la comparabilidad y la replicabilidad de los experimentos.

BIBLIOGRAFÍA

- Abitew, W. N., Kakuhenzire, R., & Enyew, M. 2023. Determination of optimum planting density of very small potato minitubers and appropriate pot size for maximizing seed tuber production in screenhouse conditions. *Crop Science*. 00:1-8.
- Aini, N., Yamika, W. S. D., & Pahlevi, R. W. 2019. The effect of nutrient concentration and inoculation of PGPR and AMF on the yield and fruit quality of hydroponic cherry tomatoes (*Lycopersicon esculentum* mill. Var. cerasiforme). *Journal of Applied Horticulture*, 21(02):116-122.
- Amalfitano, C., Del Vacchio, L., Somma, S., Cuciniello, A., & Caruso, G. 2017. Effects of cultural cycle and nutrient solution electrical conductivity on plant growth, yield, and fruit quality of «Friariello» pepper grown in hydroponics. *Horticultural Science*, 44(2):91-98.
- Awalina, R., Erona, M., & Rusnam. 2022. Lettuce (*Lactuca sativa* L) growth in aeroponic systems with differences in nutritional time. *IOP conference series*, 1059(1):12014.
- Balena, L., Malanchuk, J. P., Tamanini Junior, C., Ribas, E. L., Eschemback, V., & Kawakami, J. (2021). Growth, yield and dormancy of aeroponically produced potato minitubers as a function of planting density and harvesting date. *Horticultura Brasileira*, 39(2):161-168.
- Benitez-Altuna, F., Trienekens, J., Materia, V. C., & Bijman, J. 2021. Factors affecting the adoption of ecological intensification practices: A case study in vegetable production in Chile. *Agricultural Systems*, 194: 103283.
- Calori, A. H., Factor, T. L., Feltran, J. C., Watanabe, E. Y., Moraes, C. C. D., & Purquerio, L. F. V. 2017. Electrical conductivity of the nutrient solution and plant density in aeroponic production of seed potato under tropical conditions (winter/spring). *Bragantia*, 76(1):23-32.
- Carotti, L., Pistillo, A., Zauli, I., Meneghello, D., Martin, M., Pennisi, G., Gianquinto, G., & Orsini, F. 2023. Improving water use efficiency in vertical farming: Effects of growing systems, far-red radiation and planting density on lettuce cultivation. *Agricultural Water Management*, 285:108365.
- Carrasco, G., P. Ramírez, & H. Vogel. 2007. Efecto de la conductividad eléctrica de la solución nutritiva sobre el rendimiento y contenido de aceite esencial en albahaca cultivada en NFT. *Idesia*, 25(2), 59-62.
- Chang, D. C., Cho, I. C., Suh, J.-T., Kim, S. J., & Lee, Y. B. 2011. Growth and Yield Response of Three Aeroponically Grown Potato Cultivars (*Solanum tuberosum* L.) to Different Electrical Conductivities of Nutrient Solution. *American Journal of Potato Research*, 88(6):450-458.
- Chang, D. C., Park, C. S., Lee, J. G., Lee, J. H., Son, J. M., & Lee, Y.-B. 2005. Optimizing Electrical Conductivity and pH of Nutrient Solution for Hydroponic Culture of Seed Potatoes

(*Solanum tuberosum*). HORTICULTURE ENVIRONMENT and BIOTECHNOLOGY, 46(1):26-32.

Choong, T.-W., He, J., Lee, S. K., & Dodd, I. C. 2016. Growing Different *Lactuca* Genotypes Aeroponically within a Tropical Greenhouse—Cool Rootzone Temperatures Decreased Rootzone Ethylene Concentrations and Increased Shoot Growth. *Frontiers in Physiology*, 7:405.

Čížek, M., & Komárková, Z. 2022. Comparison of aeroponics and conventional system of production of potato mini tubers in the conditions of the Czech Republic. *Plant Soil and Environment*, 68(8):366-374.

Da Silva Filho, J. B., Fontes, P. C. R., Cecon, P. R., & McGiffen, M. E. 2018. Evaluation of “UFV Aeroponic System” to Produce Basic Potato Seed Minitubers. *American Journal of Potato Research*, 95(5):443-450.

Da Silva Filho, J. B., Fontes, P. C. R., Ferreira, J., Cecon, P. R., & Crutchfield, E. 2022. Optimal nutrient solution and dose for the yield of nuclear seed potatoes under aeroponics. *Agronomy*, 12(11):2820.

Dasgan, H. Y., & Ekici, B. 2005. Comparison of open and recycling systems for ion accumulation of substrate, nutrient uptake and water use of tomato plants. *Acta Hort.*, 399-408.

Douglas, J. S. 1985. *Advanced guide to hydroponics*. London, England.

Factor, T. L., Kawakami, F. P. C., & Iunck, V. 2007. Produção de minitubérculos básicos de batata em três sistemas hidropônicos. *Horticultura Brasileira*, 25(1), 82-87.

Furlani, P. R. 1998. Instruções para o cultivo de hortaliças de folhas pela técnica de hidroponia NFT (Technical Bulletin No. 168). Campinas, Brazil.

Gangopadhyay, M., Das, A. K., Sahu, R., Saha, A., Dey, S., Bandyopadhyay, S., & Mitra, A. 2021. Evaluation of growth response for mass production and accumulation of 2-hydroxy-4-methoxybenzaldehyde in endangered *hemidesmus indicus* by an aeroponic system. *Industrial Crops and Products*, 172:114072.

García-Segura, D. R., Valdez-Aguilar, L. A., Ramírez-Rodríguez, H., Zermeño-González, A., & Cadena-Zapata, M. 2021. Producción de mini tubérculos de papa en aeroponía en comparación con suelo y polvo de coco. *Terra Latinoamericana*, 39:1-10.

Gilsanz, J. 2012. Hidroponía. Serie actividades de difusión n° 692. Instituto nacional investigaciones Agropecuarias. Las Brujas, Uruguay.

Goins, G.D., N.C. Yorio, and R.M. Wheeler. 2004. Influence of nitrogen nutrition management on biomass partitioning and nitrogen use efficiency indices in hydroponically grown potato. *Journal of the American Society of Horticultural Science* 129: 134–140.

Gopinath, P., Vethamoni, P. I., & Gomathi, M. 2017. Aeroponics Soilless Cultivation System for Vegetable Crops. *Chemical Science Review and Letters*. 6(22): 838-849.

Herrera, A. L. 1999. Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía. *Terra Latinoamericana*, 17(3):221-229.

- Hikosaka, Y., Kanechi, M., Sato, M., & Uno, Y. 2015. Dry-fog Aeroponics Affects the Root Growth of Leaf Lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Greenspan) by Changing the Flow Rate of Spray Fertigation. *Environment Control in Biology*, 53(4):181-187.
- Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1950). The water-culture method for growing plants without soil (2nd ed., Circular 347). Berkeley, CA: California Agricultural Experiment Station.
- Hoagland, D.R. and D.I. Arnon. 1938. The water-culture method for growing plants without soil. University of California, College of Agriculture, Agricultural Experiment Station. Berkeley, California, EE. UU.
- INE. 2021. VIII Censo Agropecuario y Forestal, año agrícola 2020 – 2021. Instituto Nacional de Estadística. Ministerio de Economía, Gobierno de Chile. Santiago, Chile. Disponible en <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca/censos-agropecuarios> (Consultado en marzo 2024)
- INIA. 2020. Diversificación de hortalizas asiáticas de hoja en Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Santiago, Chile. Disponible en <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/38984/NR42202.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Consultado en octubre de 2021)
- Komosa, A., KleiBer, T., & Markiewicz, B. 2014. The effect of nutrient solutions on yield and macronutrient status of greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) grown in aeroponic and rockwool culture with or without nutrient solution. *Acta Scientiarum Polonorum. Hortorum Cultus*, 13(2), 163-177.
- Komosa, A., Kleiber, T., Markiewicz, B., Mieloszyk, E., & Mieloch, M. 2020. Yield and nutrient status of greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* mill.) grown in new and re-used rockwool and polyurethane, NFT and aeroponics. *Journal of Elementology*, 25(2):523-536.
- Kuncoro, C. B. D., Sutandi, T., Adristi, C., & Kuan, Y.-D. 2021. Aeroponics Root Chamber Temperature Conditioning Design for Smart Mini-Tuber Potato Seed Cultivation. *Sustainability*, 13(9):5140.
- Lei, C., & Engeseth, N. J. 2021. Comparison of growth characteristics, functional qualities, and texture of hydroponically grown and soil-grown lettuce. *LWT*, 150:111931.
- Li, Q., Li, X., Tang, B., & Gu, M. 2018. Growth Responses and Root Characteristics of Lettuce Grown in Aeroponics, Hydroponics, and Substrate Culture. *Horticulturae*, 4(4):35.
- Medeiros, C. A. B., Ziemer, A. H., Daniels, J., & Pereira, A. S. 2002. Produção de sementes pré-básicas de batata em sistemas hidropônicos. *Horticultura Brasileira*, 20, 110-114.
- Mohamed, T. M. K., Gao, J., & Tunio, M. H. 2022. Development and experiment of the intelligent Control system for rhizosphere temperature of aeroponic lettuce via the Internet of Things. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 15(3):225-233.
- Nabati, J., Ahmadi-Lahijani, M. J., Goldani, M., Nezami, A., Oskoueian, A., Hosinaiyan, M., & Mohammadi, M. 2021. Lowering medium pH improves tolerance of tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants to long-term salinity exposure. *Journal of Plant Nutrition*, 44(13),1853-1868.

- Novella, M. B., Andriolo, J. L., Bisognin, D. A., Cogo, C. M., & Bandinelli, M. G. 2008. Concentration of nutrient solution in the hydroponic production of potato minitubers. *Ciencia Rural*, 38(6):1529-1533.
- OAT Agrio Co., Ltd. 2024. Fertirrigation Solutions for Soilless Cultivation. Tokio, Japón. Disponible en <https://www.oat-agrio.co.jp/en/> (Consultado en octubre de 2024)
- ODEPA. 2017. Agricultura chilena: Reflexiones y desafíos al 2030. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Santiago, Chile. Disponible en https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/01/ReflexDesaf_2030-1.pdf (Consultado en octubre de 2021).
- Oraby, H., Lachance, A., & Desjardins, Y. 2015. A Low Nutrient Solution Temperature and the Application of Stress Treatments Increase Potato Mini-tubers Production in an Aeroponic System. *American Journal of Potato Research*, 92(3):387-397.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2017. El futuro de la alimentación y la agricultura: Tendencias y desafíos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma, Italia. Disponible en <https://www.fao.org/family-farming/detail/es/c/473033/> (Consultado en octubre de 2021)
- Otazú, V. 2010. Manual on quality seed potato production using aeroponics. International Potato Center (CIP). Lima, Perú.
- Pérez-Vazquez, E. L., Gaucín-Delgado, J. M., Ramírez-Rodríguez, S. C., Sariñana-Aldaco, M. D. L. Á., Zapata Sifuentes, G., & Zuñiga-Valenzuela, E. 2020. Conductividad eléctrica de la solución nutritiva efecto en el rendimiento y la calidad nutraceutica de pimiento morrón. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(7), 1669-1675.
- Preciado P. 2006. Manual de preparación de soluciones nutritivas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Torreón, Coahuila, México.
- Rajatha, K., Prasad, S. R., Gobhinath, P., Nethra, N., & Thimmegowda, M. N. 2022. Soilless system: An approach for hybrid seed production in tomato (*Solanum lycopersicum*). *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 92(9):1107–1112.
- Ritter, E., Angulo, B., Riga, P., Herrán, C., Relloso, J., & San Jose, M. 2001. Comparison of hydroponic and aeroponic cultivation systems for the production of potato minitubers. *Potato Research*, 44(2):127-135.
- Rolot J.H., Seutin H., Michelante D. 2002. Production de minitubercules de pomme de terre par hydroponie: Évaluation d'un système combinant les techniques "NFT" et "Gravel Culture" pour deux types de solutions nutritives. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environment*, 6: 155–161.
- Rosadi, R. B., Senge, M., Suhandy, D., & Tusi, A. 2014. The effect of EC levels of nutrient solution on the growth, yield, and quality of tomatoes (*Solanum lycopersicum*) under the hydroponic system. *Journal of agricultural engineering and biotechnology*, 2(1):7-12.
- Rykaczewska, K. 2016. The potato minituber production from microtubers in aeroponic culture. *Plant Soil and Environment*, 62(5):210-214.

- Sharma, A. K., Buckseth, T., & Singh, R. K. 2023. Effect of planting periods on production potential of potato (*Solanum tuberosum*) varieties under aeroponics. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 93(3):274–278.
- Signore, A., Serio, F., & Santamaria, P. 2016. A Targeted Management of the Nutrient Solution in a Soilless Tomato Crop According to Plant Needs. *Frontiers in Plant Science*, 7:391.
- Smith, G. S., Johnston, C. M., & Cornforth, I. S. 1983. Comparison of nutrient solutions for growth of plants in sand culture. *New Phytologist*, 94(4):537-548.
- Steiner, A. A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil*, 15: 134-154.
- Sumarni, E., Farid, N., Darjanto, D., Ardiansyah, A., & Soesanto, L. 2019. Effect of electrical conductivity (EC) in the nutrition solution on aeroponic potato seed production with root zone cooling application in tropical lowland. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 21:70-77.
- Tengli, S., Narasimhamurthy, S. T., Koppad, A., Govind, G., & Raju, B. M. 2022. Shoot and root zone temperatures are critical in bidirectional regulation of tuberization in potato. *Environmental and Experimental Botany*, 201:104936.
- Tessema, L., & Dagne, Z. 2018. Aeroponics and Sand Hydroponics: Alternative Technologies for Pre-Basic Seed Potato Production in Ethiopia. *Open Agriculture*, 3(1):444-450.
- Tessema, L., Chindi, A., Gebremedhin, W. G., Solomon, A., Shunka, E., & Seid, E. 2017. Determination of Nutrient Solutions for Potato (*Solanum tuberosum* L.) Seed Production under Aeroponics Production System. *Open Agriculture*, 2(1):155-159.
- Tunio, M. H., Gao, J., Qureshi, W., Sheikh, S., Chen, J., Chandio, F. A., Lakhiar, I. A., & Solangi, K. A. 2022. Effects of droplet size and spray interval on root-to-shoot ratio, photosynthesis efficiency, and nutritional quality of aeroponically grown butterhead lettuce. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 15(1):79-88.
- Yepes-Núñez, J. J., Urrútia, G., Romero-García, M., & Fernández, S. A. 2021. Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9):790-799.

ANEXOS

Anexo A. Composición química de las principales soluciones nutritivas mencionadas por los investigadores en sus estudios y los cultivos en los que se emplearon.

Solución nutritiva	Cultivo	Composición (ppm)
Dasgan and Ekici (2005)	Tomate	NO₃ : 225 ; NH₄ : 25 ; P : 50 ; K : 321 ; Ca : 180 ; Mg : 75 ; S : 115 ; Fe : 5 ; Mn : 1 ; Cu : 0.4 ; Zn : 0.4 ; B : 0.4 ; Mo : 0.1
Factor et al. (2007)	Papa	NO₃ : 145 ; NH₄⁺ : 29 ; P : 40 ; K : 295 ; Ca : 162 ; Mg : 40 ; S : 64 ; Fe : 2.0 ; Zn : 0.3 ; Mn : 1.0 ; B : 0.3 ; Cu : 0.05 ; Mo : 0.05
Furlani (1998)	Papa	N : 198 (7:1 NO₃ : NH₄); P : 39 ; K : 183 ; Ca : 142 ; Mg : 38 ; S : 52 ; Fe : 2;0 ; Mn : 0;40 ; Cu : 0;02 ; Zn : 0;06 ; B : 0;30 ; Mo : 0;06
Goins et al. (2004)	Papa	Ca(NO₃)₂·4H₂O : 1180.75 ; KNO₃ : 252.75 ; KH₂PO₄ : 68.05 ; MgSO₄·7H₂O : 246.48 ; H₃BO₃ : 0.717 ; FeCl₃·4H₂O : 4.84 ; MnCl₂·4H₂O : 3.6 ; ZnSO₄·7H₂O : 2.13 ; CuSO₄·5H₂O : 0.24 ; (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O : 0.012
Hoagland and Arnon (1938)	Lechuga	N : 210 ; K : 235 ; Ca : 200 ; P : 31 ; S : 64 ; Mg : 48 ; B : 0.5 ; Fe : 1 a 5 ; Mn : 0.5 ; Zn : 0.05 ; Cu : 0.02 ; Mo : 0.01
Komosa et al. (2014)	Tomate	N-NH₄ : <14 ; N-NO₃ : 150 ; P-PO₄ : 40 ; K : 250 ; Ca : 160 ; Mg : 70 ; S-SO₄ : 90 ; Cl : 42 ; Fe : 0.9 ; Mn : 0.4 ; Zn : 0.6 ; B : 0.38 ; Cu : 0.025 ; Mo : 0.025

Laura Carotti et al. 2023 (elaboración propia)	Lechuga	N-NO₃ : 868 ; N-NH₄ : 79.2 ; P : 31 ; K : 195 ; S : 64 ; Ca : 208 ; Mg : 28.8 ; Fe : 0.001 ; Cu : 0.127 ; Zn : 0.247 ; B : 0.125 ; Mn : 0.334 ; Mo : 0.048
Medeiros et al. (2002)	Papa	N : 360 (8:1 NO₃:NH₄); P : 12 ; K : 298 ; Ca : 302 ; Mg : 37;8 ; S : 58;5 ; Fe : 2;76 ; Mn : 0;97 ; Cu : 0;07 ; Zn : 0;30 ; B : 0;53 ; Mo : 0;15
Netherlands Standard Nutrient Solution	Lechuga	K₃PO₄ : 136 ; Ca(NO₃)₂ : 1062 ; MgSO₄ : 492 ; KNO₃ : 293 ; K₂SO₄ : 252 ; KOH : 22.4
OAT Agrico Co	Lechuga	N : 130 ; P : 60 ; K : 200 ; Ca : 115 ; Mg : 30 ; Fe : 1.4 ; Mn : 0.8 ; Zn : 0.05 ; Cu : 0.02 ; B : 0.75 ; Mo : 0.02
Otazú (2010)	Papa	N : 160 ; P : 150 ; K : 270 ; Ca : 150 ; Mg : 100 ; S : 190 ; Fe : 9
Rolot et al. (2002) modificado	Papa	N : 180 ; P : 40 ; K : 300 ; Ca : 200 ; Mg : 50 ; Fe : 3 ; Zn : 0.1 ; Cu : 0.1 ; Mo : 0.05 ; Mn : 0.3 ; B : 0.3
Steiner (1961)	Papa	NO₃- : 744.12 ; H₂PO₄- : 96.99 ; SO₄-2 : 336.21 ; K+ : 273.7 ; Ca²⁺ : 180.36 ; Mg²⁺ : 48.64
General Hydroponics	Papa	No encontrado