



ATN-RF-20632-RG Agricultura Vertical: Innovación para la horticultura en América Latina y el Caribe (ALC)

Producto 7.1. Nota técnica: Avance de artículos científicos que integren la comparación de sistemas de AV.

Equipo Ejecutor

2025



Códigos JEL: Q16

FONTAGRO (Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria) es un mecanismo único de cooperación técnica entre países de América Latina, el Caribe y España, que promueve la competitividad y la seguridad alimentaria. Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), FONTAGRO, de sus Directorios Ejecutivos ni de los países que representan.

El presente documento ha sido preparado por Javier Pitti Caballero, Stephanie Quirós-Campos, Madeleyne Parra Fuentes y Germán Darío Aguado

Copyright © 2025 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial- SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional. Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Esta publicación puede solicitarse a:

FONTAGRO

Correo electrónico: fontagro@fontagro.org

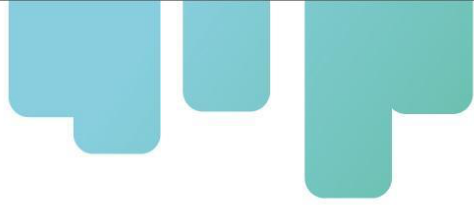
www.fontagro.org



Tabla de Contenidos



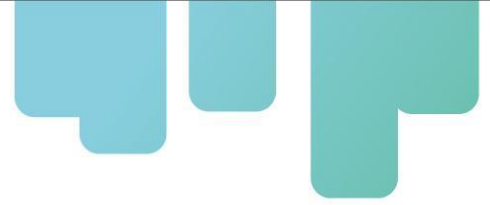
Abstract	5
Resumen ejecutivo	6
Resúmenes de Artículos Científicos (Avances – Año 1)	7
Instituciones participantes	10



ABSTRACT

Vertical Agriculture: Innovation for Horticulture in Latin America and the Caribbean (LAC) is a project funded by FONTAGRO and implemented by IDIAP (Panama), AGROSAVIA C.I. Caribia (Colombia), INTA Costa Rica, and INTA Mendoza (Argentina). Its objective is to comprehensively evaluate vertical farming systems as a sustainable alternative for intensive crop production, strengthening competitiveness, food security, and the adoption of this technology across the LAC Region. To report progress corresponding to Product 7 (Year 1 – 2025), this document presents summaries of scientific articles currently in the stages of data analysis and manuscript preparation for submission to peer-reviewed journals. These articles derive from experiments conducted in Costa Rica and Argentina, addressing the following topics: “Productive feasibility and water-use efficiency of a vertical tower hydroponic system for lettuce production in a greenhouse” and “Vertical farming systems versus conventional hydroponics and soil beds: Comparative assessment of yield and water use in lettuce cultivation”. This technical note corresponds to Product 7 (Year 1 – 2025) within Activity 1.2, “Technical–agronomic evaluation of vertical farming prototypes,” and is linked to the forthcoming scientific publication of project results.

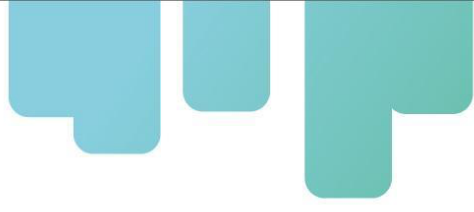
Keywords: Vertical farming; Crop yield; Water use efficiency.



RESUMEN EJECUTIVO

El proyecto Agricultura Vertical: Innovación para la horticultura en América Latina y el Caribe (ALC), financiado por Fontagro y ejecutado por el IDIAP de Panamá, AGROSAVIA C.I. Caribia en Colombia, INTA de Costa Rica e INTA en Argentina, tiene como meta evaluar integralmente a los sistemas de agricultura vertical como alternativa sostenible para la producción de cultivos intensivos, que favorezcan la competitividad, la seguridad alimentaria y su implementación en ALC. Con el fin de proporcionar los avances de resultados destinados a la cumplimentación del Producto 7 (año 1-2025) se presentan resúmenes de artículos científicos en proceso de análisis de datos y redacción para acceder a su presentación en revistas científicas. Los mismos pertenecen a ensayos realizados en Costa Rica y Argentina abordando las temáticas de: “Viabilidad productiva y eficiencia del uso de agua en un sistema hidropónico vertical de torre para la producción de lechuga en invernadero” y “Sistemas de agricultura vertical frente a hidroponía convencional y camas de cultivo. Evaluación comparativa del rendimiento y uso del agua en el cultivo de lechuga”. Esta nota técnica corresponde al producto 7 (avances para el año 1- año 2025) enmarcado en la actividad 1.2 “Evaluación técnica-agronómica de los prototipos de AV” relacionado con la presentación de artículo científico sobre los resultados del proyecto.

Palabras Clave: Agricultura Vertical, Rendimiento hortícola, Eficiencia de uso del agua



RESÚMENES DE ARTÍCULOS CIENTÍFICOS (AVANCES – AÑO 1)

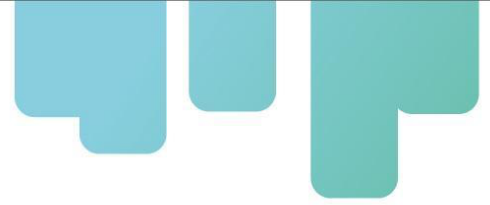
1- VIABILIDAD PRODUCTIVA Y EFICIENCIA DEL USO DE AGUA EN UN SISTEMA HIDROPÓNICO VERTICAL DE TORRE PARA LA PRODUCCIÓN DE LECHUGA EN INVERNADERO (COSTA RICA)

Autores: Stephanie Quirós-Campos; Gustavo Quesada-Roldán

Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), Unidad Agrícola, Centro de Innovación Agropecuaria. San José, Costa Rica. mquiros@inta.go.cr (corresponding author). Universidad de Costa Rica (UCR). Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno. Alajuela, Costa Rica. gustavo.quesada@ucr.ac.cr

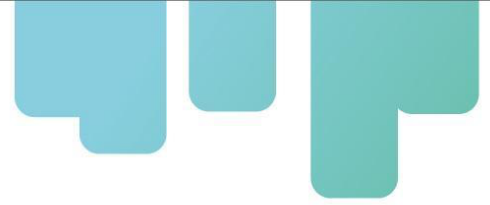
Resumen

La agricultura vertical representa una alternativa moderna para incrementar la producción de alimentos en espacios reducidos y fortalecer la seguridad alimentaria. El presente estudio evaluó la viabilidad productiva de un sistema de torres hidropónicas y su eficiencia en el uso del agua para la producción de lechuga en condiciones de invernadero. La investigación se desarrolló en la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno de la Universidad de Costa Rica (10,00612° N y -84,26682° O), ubicada en el distrito de La Garita, provincia de Alajuela, a una altitud de 843 m s. n. m. Se empleó un diseño de bloques completos al azar con arreglo de parcelas divididas, donde el tipo de sistema hidropónico (torre vertical y Nutrient Film Technique, NFT) correspondió a la parcela principal (factor A), y tres cultivares conformaron la subparcela (factor B), con tres repeticiones por sistema. Las variables analizadas incluyeron temperatura, humedad relativa, días a cosecha, peso fresco total, rendimiento por unidad de superficie (kg m^{-2}) y eficiencia en el uso del agua (EUA). La temperatura media diaria osciló entre 22,39 °C y 28,15 °C, con valores mínimos entre 18,10 °C y 21,10 °C, y máximos que alcanzaron hasta 43,30 °C en los días de mayor calentamiento. Se registraron varios días con temperaturas máximas superiores a 40 °C, lo cual indica la presencia recurrente de condiciones de estrés térmico potencial para el cultivo. A pesar de estas fluctuaciones, la temperatura media se mantuvo mayoritariamente en un rango relativamente estable entre 24,5 °C y 27,5 °C, característico de ambientes cálidos del sistema protegido de invernadero. Los cultivares BG y Sementel presentaron los mayores pesos frescos en NFT (132,22 g y 118,44 g, respectivamente), mientras que en las torres su rendimiento individual disminuyó significativamente. El cultivar Spectation registró los valores más bajos en ambos sistemas. El sistema de torres obtuvo los mayores rendimientos por superficie (5,5 kg m^{-2}), superando al sistema NFT (3,3 kg m^{-2}). En cuanto al uso de agua, el sistema NFT consumió en promedio 265 L para producir 50 plantas, mientras que las torres requirieron 298,33 L para 80 plantas. Aunque el consumo por planta fue menor en las torres durante el ciclo de 29 días, las plantas mostraron menor peso individual. La EUA fue superior en el sistema de torres (16,52 kg



m^{-3}) respecto al NFT ($9,84 \text{ kg m}^{-3}$), lo cual generó una mayor producción de biomasa por metro cuadrado. La productividad por metro cuadrado fue superior en el sistema de torres hidropónicas, el cual también mostró una eficiencia en el uso del agua significativamente mayor en comparación con el sistema NFT. Sin embargo, esta mayor densidad de producción se asoció con la formación de plantas con menor peso fresco individual, lo que sugiere que, aunque las torres optimizan el rendimiento por superficie y el aprovechamiento hídrico, pueden generar una competencia interna más intensa que limita el desarrollo individual de las plantas.

Palabras clave: productividad, hidroponía, agricultura vertical, eficiencia hídrica



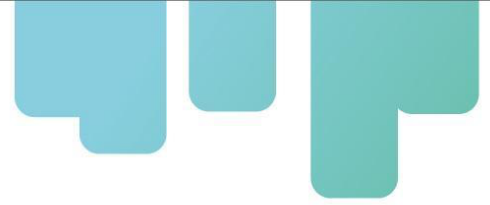
2- SISTEMAS DE AGRICULTURA VERTICAL FRENTE A HIDROPONÍA CONVENCIONAL Y CAMAS DE CULTIVO. EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL RENDIMIENTO Y USO DEL AGUA EN EL CULTIVO DE LECHUGA (ARGENTINA)

Autores: Aguado, Germán Darío; Pisi, Gabriel Enrique y Uliarte, Ernesto Martin

Estación Experimental Mendoza, Centro Regional Mendoza- San Juan. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA – Argentina).

Resumen

El aumento de la población mundial, la intensificación de la urbanización y la creciente escasez de recursos, han impulsado la demanda de sistemas agrícolas capaces de producir alimentos frescos con alta eficiencia en el uso de recursos. Bajo este escenario, la horticultura protegida y en los últimos años la agricultura vertical, surgen como alternativas tecnológicas para enfrentar la escasez de agua, reducir la dependencia de suelo cultivable y mejorar la productividad por unidad de superficie. La lechuga (*Lactuca sativa* L.) debido a su ciclo corto y alta sensibilidad a las condiciones microambientales, constituye un modelo adecuado para evaluar el desempeño comparativo de diferentes sistemas agrícolas de producción. En este estudio se evaluó comparativamente el desempeño productivo y la eficiencia del uso del agua de cuatro sistemas de cultivo: agricultura vertical indoor (IV), agricultura vertical en ambiente protegido (PV), hidroponía convencional en invernadero (PH) y cultivo en suelo (SF). El ensayo se llevó a cabo en una cámara indoor de ambiente controlado y en un invernadero de techo cóncavo y coberturas de polietileno con control pasivo de temperatura, en la EEA Mendoza del INTA - Argentina. El sistema IV se estableció en estanterías verticales con iluminación LED de espectro controlado, mientras que los sistemas PV, PH y SF se ubicaron en el invernadero, con PV incorporando iluminación LED suplementaria. IV, PV y PH operaron con sistemas hidropónicos de solución nutritiva recirculante tipo NFT, bajo un esquema de riego automatizado, mientras que SF recibió riego por goteo presurizado y fertirriego convencional. El análisis de datos se realizó mediante un diseño experimental, donde cada sistema contó con tres unidades físicas independientes (módulos o camas de cultivo) que se no pudieron aleatorizar. Así, el sistema de producción se consideró un efecto fijo y la unidad experimental un efecto aleatorio dentro de un modelo lineal mixto. Este enfoque permitió capturar la variabilidad real de cada sistema sin asumir independencia absoluta entre repeticiones. Las comparaciones entre tratamientos se realizaron mediante comparación de medias con un nivel de significancia de $p < 0,05$ (LSD Fischer). Los resultados mostraron diferencias significativas en el rendimiento y la generación de biomasa. Los sistemas de agricultura vertical fueron los más productivos: IV alcanzó $14,47 \text{ kg m}^{-2}$ y PV $13,50 \text{ kg m}^{-2}$, superando ampliamente a PH ($3,23 \text{ kg m}^{-2}$) y al cultivo en suelo ($4,55 \text{ kg m}^{-2}$). Estos valores coinciden con estudios previos que reportan un incremento sustancial en la productividad cuando el microclima se controla de manera precisa y se optimiza el uso del espacio en sistemas verticales, favoreciendo una mayor eficiencia fotosintética y una mayor estabilidad del crecimiento. En cuanto al peso fresco de planta, SF registró el valor más alto ($255,78 \text{ g planta}^{-1}$), probablemente asociado con un mayor



volumen de suelo disponible para la expansión radicular y al mayor tiempo de cultivo. Sin embargo, a pesar de esta ventaja en biomasa individual, SF mostró la eficiencia hídrica más baja, con un requerimiento de $32,3 \pm 5,9 \text{ cm}^3$ por gramo producido y el ciclo de cultivo más largo (42 días). En contraste, IV presentó la mayor eficiencia hídrica ($15,2 \pm 1,0 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$), junto con el menor consumo total por planta y el ciclo más corto (28 días). Los sistemas protegidos PV y PH se ubicaron en valores intermedios con ciclos de cultivo de 35 días. En conjunto, estos resultados evidencian que la mejora en el control ambiental y la reducción de pérdidas hídricas son determinantes para incrementar la eficiencia global del sistema. La agricultura vertical indoor se posiciona como la alternativa más eficiente tanto en rendimiento como en uso del agua, mientras que PV y PH representan opciones equilibradas que combinan buena productividad con un consumo hídrico moderado. Por el contrario, el cultivo en suelo, aunque capaz de producir plantas de mayor tamaño, resulta menos competitivo debido a su alta demanda hídrica y mayor variabilidad ambiental. Complementariamente se está estudiando la eficiencia energética para cada uno de los sistemas, como así también las características nutricionales y nutraceuticas generadas. Este estudio aporta evidencia cuantitativa sobre el desempeño comparativo de sistemas productivos emergentes aplicados a lechuga, reforzando la relevancia de la agricultura vertical y protegida para contextos urbanos y periurbanos donde el agua es un recurso limitante y la intensificación sostenible constituye una prioridad.

Palabras clave

Agricultura vertical, Hidroponía, Eficiencia hídrica, Sistemas protegidos, Lactuca sativa

INSTITUCIONES PARTICIPANTES



INSTITUTO NACIONAL DE
INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA
EN TECNOLOGÍA AGROPECUARIA

GOBIERNO
DE COSTA RICA



Instituto Nacional de
Tecnología Agropecuaria
Argentina



Secretaría Técnica Administrativa



Con el apoyo de:



www.fontagro.org

Correo electrónico: fontagro@fontagro.org