

Artículo de divulgación

Agricultura vertical hidropónica: manejo de nutrientes y eficiencia de recursos en la producción de hortalizas en San Luis Potosí, México

Hydroponic Vertical Farming: Nutrient Management and Resource-Use Efficiency in Vegetable Production in San Luis Potosí, Mexico

María Fernanda Quintero Castellanos ^{1,*} , Heriberto Méndez Cortés ¹ 

¹ Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Km 14.5 Carretera San Luis Potosí-Matehuala, Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, C.P. 78321, México.

* Autor para correspondencia: maria.quintero@uaslp.mx

Recibido:

16/08/2026

Aceptado:

12/10/2026

Publicado:

13/10/2026

RESUMEN

La agricultura vertical hidropónica aprovecha el espacio en altura y permite controlar con precisión el suministro de agua y nutrientes. En la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí se implementó HORTIVERT-UASLP, Plataforma Universitaria de Horticultura Vertical, como un espacio para investigar, formar estudiantes, divulgar y transferir conocimiento sobre estos sistemas. En la plataforma se han cultivado col rizada (kale), lechuga, acelga, espinaca, fresa y albahaca, y se han realizado evaluaciones sobre el manejo de la solución nutritiva, la posición de las plantas y la eficiencia en el uso de recursos. En ensayos específicos, una renovación de 45 % de la solución nutritiva favoreció el desempeño de la lechuga, mientras que en acelga la concentración de nutrientes modificó la eficiencia de uso de agua y nutrientes. Estos resultados corresponden a condiciones experimentales concretas y no deben interpretarse como recomendaciones universales. La colaboración con la Universidad de Almería permite contrastar resultados entre ambientes mediterráneos y semiáridos. En conjunto, HORTIVERT-UASLP integra investigación, formación y transferencia tecnológica para avanzar hacia un manejo más eficiente y basado en evidencia de la horticultura vertical.

Palabras clave: fertirriego; solución nutritiva; recirculación; eficiencia hídrica; nutrición vegetal; transferencia tecnológica.

ABSTRACT

Hydroponic vertical farming makes use of vertical space and enables precise control of water and nutrient supply. At the Faculty of Agronomy and Veterinary Medicine of the Universidad Autónoma de San Luis Potosí, HORTIVERT-UASLP, the University Platform for Vertical Horticulture, was implemented as a space for research, student training, science communication, and technology transfer. Kale, lettuce, Swiss chard, spinach, strawberry, and basil have been grown on the platform, and studies have addressed nutrient-solution management, plant position, and resource-use efficiency. In specific trials, 45% nutrient-solution renewal favored lettuce performance, while nutrient

concentration modified water- and nutrient-use efficiency in Swiss chard. These findings correspond to specific experimental conditions and should not be interpreted as universal recommendations. Collaboration with the Almería University allows results to be contrasted between mediterranean and semi-arid environments. Overall, HORTIVERT-UASLP integrates research, training, and technology transfer to support more efficient, evidence-based management of vertical horticulture.

Keywords: fertigation; nutrient solution; recirculation; water-use efficiency; plant nutrition; technology transfer.

INTRODUCCIÓN

La horticultura protegida busca aumentar la productividad por unidad de superficie con un manejo preciso del ambiente, el agua y los fertilizantes. Los sistemas hidropónicos permiten suministrar una solución nutritiva controlada y, cuando operan con recirculación, recuperar parte del agua y los nutrientes no absorbidos. Su desempeño depende de la especie, el diseño hidráulico, la densidad de plantación, el microclima y la estrategia de fertirriego (Lakhiar *et al.*, 2025).

La agricultura vertical distribuye las plantas en distintos niveles de altura, con lo que aumenta los sitios de cultivo por unidad de superficie, pero también modifica la radiación, el microclima y el comportamiento hidráulico. En lechuga vertical, el consumo de agua y nutrientes puede modelarse a partir del microclima y la dinámica de la solución nutritiva, lo que favorece decisiones de manejo basadas en medición (López Mora *et al.*, 2024).

En las instituciones de educación superior, estas tecnologías también permiten vincular investigación y formación práctica. Preparar soluciones nutritivas, trasplantar, verificar el flujo, monitorear variables y registrar datos durante un ciclo de cultivo acerca al estudiante a problemas reales de la producción hortícola.

En este contexto, la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí cuenta con HORTIVERT-UASLP, Plataforma Universitaria de Horticultura Vertical, como espacio para investigación aplicada, formación, divulgación y transferencia tecnológica. El objetivo de este artículo es describir la infraestructura, el funcionamiento y los principales resultados de HORTIVERT-UASLP, así como discutir sus perspectivas en investigación, formación y transferencia tecnológica.

UNA INFRAESTRUCTURA PARA LA FORMACIÓN Y LA INVESTIGACIÓN

HORTIVERT-UASLP se ubica en el Centro de Capacitación en Agricultura Protegida de la Facultad de Agronomía y Veterinaria. Su infraestructura incluye un invernadero tipo túnel de 8 m × 16 m (128 m²), piso de concreto, drenaje, suministro eléctrico y las instalaciones necesarias para operar sistemas hidropónicos verticales cerrados.

La infraestructura se desarrolló con recursos federales del Programa Presupuestario U079 “Programa de Expansión de la Educación Media Superior y Superior”, Tipo Superior, ejercicio fiscal 2023 de la Secretaría de Educación Pública (Secretaría de Educación Pública, 2023), complementados con recursos propios de la Facultad de Agronomía y Veterinaria. La inversión fortaleció el Programa Educativo de Ingeniería Agronómica en Producción en Invernaderos mediante infraestructura para formación práctica, experimentación y evaluación tecnológica.

La plataforma articula docencia, investigación aplicada y desarrollo tecnológico. En ella se establecen cultivos, se operan y comparan sistemas hidropónicos, se desarrollan ensayos y se documenta la respuesta de las plantas bajo diferentes condiciones de manejo.

Su función no se limita a producir hortalizas: también respalda prácticas académicas, servicio social, residencias profesionales, trabajos de titulación, proyectos de investigación y actividades de divulgación y transferencia tecnológica. Esta continuidad de uso permite aprovechar la inversión institucional en diferentes etapas de formación e investigación sin separar la enseñanza de la experimentación.



DOS TECNOLOGÍAS VERTICALES EN UN MISMO INVERNADERO

La plataforma integra dos configuraciones verticales (Figura 1). Cuatro unidades GrowPipes® tienen capacidad nominal de 300 plantas por unidad y una densidad de 50 plantas m^{-2} ; 15 torres TIRUSS® disponen de 45 sitios por torre y una densidad de 25 plantas m^{-2} . En conjunto ofrecen hasta 1,875 sitios nominales.

La capacidad instalada no implica que todos los sitios se ocupen simultáneamente: la densidad y el número de unidades utilizadas dependen de la especie y del objetivo experimental.

Ambos sistemas utilizan solución nutritiva en recirculación. Parte de la solución retorna al depósito y se reutiliza después de verificar y, cuando corresponde, ajustar pH, concentración de sales, y composición nutrimental. La recirculación puede reducir pérdidas de agua y fertilizantes, pero exige seguimiento sistemático.

Contar con dos diseños bajo un mismo invernadero permite comparar densidades, posiciones verticales, comportamiento hidráulico y respuesta de los cultivos bajo un microclima común. También evidencia que la agricultura vertical no es una tecnología única: la arquitectura del sistema y el circuito de fertirriego condicionan su desempeño. La comparación bajo condiciones ambientales compartidas ayuda a atribuir las diferencias observadas al diseño o al manejo y no únicamente al clima del invernadero.



Figura 1. Sistemas verticales de HORTIVERT-UASLP: a) GrowPipes® y unidad de fertirriego; b) torre TIRUSS® con hortalizas de hoja. Fuente: archivo HORTIVERT-UASLP.

EVIDENCIA GENERADA

Desde su puesta en operación se han establecido colrizada (kale), lechuga, acelga, espinaca, fresa y albahaca. Las primeras investigaciones se enfocaron en preguntas

de manejo de sistemas cerrados: cuánto renovar de la solución nutritiva, cómo influye la posición de la planta y qué concentración de nutrientes sostiene el crecimiento con uso eficiente de insumos. Estas líneas ya han generado trabajos de titulación y productos científicos. Cada ciclo aporta datos que pueden utilizarse para formular nuevas preguntas y ajustar los ensayos posteriores.

En otoño de 2024, un ensayo con acelga comparó concentraciones al 75 %, 100 % y 125 % de la solución nutritiva de Steiner. Se evaluaron biomasa fresca, transpiración y eficiencia de uso de agua y nutrientes. Bajo esas condiciones, 75 % presentó el mejor desempeño y eficiencias superiores a las referencias de acelga producida en suelo usadas en el estudio (López-Mora *et al.*, 2025). El resultado no constituye una recomendación universal.

La tesis de Ramírez Cubos (2026) evaluó torres TIRUSS® de 45 plantas, distribuidas en estratos alto, medio y bajo, con renovaciones de 25 %, 45 % y 65 % de la solución nutritiva. La renovación de 45 % mostró la respuesta más estable, mayor peso total cosechado y más plantas con cogollo. En etapas avanzadas, la posición vertical también modificó el desempeño. Los resultados indican que renovar más solución no garantiza mayor productividad y que la posición dentro de la torre debe considerarse en el manejo y el diseño experimental.

Estos resultados sintetizan un principio de trabajo de HORTIVERT-UASLP: medir antes de transferir recomendaciones. La especie, la solución nutritiva, la configuración tecnológica, la posición de las plantas y el ambiente pueden modificar la respuesta. La plataforma permite distinguir resultados consistentes de aquellos dependientes de condiciones particulares. Este enfoque reduce extrapolaciones prematuras y orienta la generación de recomendaciones con mayor sustento técnico.

DOS GEOGRAFÍAS PARA CONTRASTAR HIPÓTESIS

HORTIVERT-UASLP forma parte de una colaboración científica entre la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y la Universidad de Almería, España, enfocada en producción hortícola protegida y uso eficiente de agua y nutrientes. En Almería se ha evaluado lechuga en cultivo vertical bajo condiciones mediterráneas y, de esta

colaboración, surgió un modelo predictivo para estimar el consumo de agua y nutrientes a partir del microclima y la dinámica de la solución nutritiva (López Mora *et al.*, 2024).

San Luis Potosí aporta un segundo escenario agroclimático. La comparación no busca reproducir invernaderos idénticos, sino contrastar hipótesis sobre fertirriego, posición vertical y eficiencia de recursos en condiciones distintas.

La armonización de variables y protocolos permitirá evaluar la consistencia de las respuestas e identificar cuánto dependen del ambiente, del diseño del sistema o del manejo. Esta estrategia fortalece los ensayos coordinados entre México y España y amplía la base experimental para la transferencia de conocimiento. Si una respuesta se mantiene entre ambientes aumenta la confianza en su reproducibilidad; si cambia, la diferencia ayuda a identificar factores dependientes del contexto.

La colaboración también favorece la formación de recursos humanos y el intercambio científico en horticultura vertical.

UN INVERNADERO QUE TAMBIÉN FUNCIONA COMO AULA

La formación de estudiantes es un componente sustantivo de HORTIVERT-UASLP (Figura 2). Estudiantes de licenciatura y posgrado participan en el establecimiento de cultivos, la preparación y seguimiento de soluciones nutritivas, el trasplante, la limpieza de circuitos, el registro de variables, el muestreo y el apoyo experimental.

Hasta el momento han participado 10 estudiantes de servicio social; además, se han desarrollado dos tesis de licenciatura, dos residencias profesionales y participa un estudiante de posgrado. Las tesis han abordado la concentración de la solución nutritiva en acelga vertical y la renovación de la solución y la posición vertical en lechuga, vinculando la formación con decisiones reales de manejo y análisis de resultados.

La continuidad entre ciclos permite que nuevos estudiantes retomen protocolos, datos y preguntas generados previamente. Así, una misma infraestructura respalda prácticas, servicio social, residencias, titulación e investigación, y su valor institucional reside tanto en la

capacidad de cultivo como en las experiencias académicas construidas alrededor de ella.



Figura 2. Formación práctica en HORTIVERT-UASLP: a) estudiantes en actividades experimentales; b) establecimiento de plántulas en sistema vertical. Fuente: archivo HORTIVERT-UASLP.

DIVULGACIÓN Y VINCULACIÓN

HORTIVERT-UASLP también funciona como espacio de divulgación. En 2024, integrantes de la plataforma participaron en la 6.^a Semana Estatal de Ciencia y Tecnología de San Luis Potosí con la infografía “Hortalizas de Altura: Innovación con Cultivos Verticales”, dirigida a explicar a públicos no especializados el funcionamiento de estos sistemas y la necesidad de comprobar experimentalmente sus ventajas.

La producción científica ha fortalecido la colaboración interinstitucional. El estudio sobre eficiencia de recursos en acelga reunió participantes de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, la Universidad de Almería y la Universidad Nacional de Colombia, integrando capacidades en nutrición vegetal, fertirriego, análisis de datos y horticultura protegida (López-Mora *et al.*, 2025).

En 2026, la experiencia de HORTIVERT-UASLP se vinculó con la organización del “1er. Simposio Internacional sobre Sistemas de Cultivo Vertical, Nanofertilizantes y Calidad Nutricional de Hortalizas”, organizado por la UASLP con apoyo del Consejo Potosino de Ciencia y Tecnología (COPOCYT) mediante el Fideicomiso 23871. El encuentro, programado del 24 al 26 de septiembre de 2026, busca fortalecer el intercambio sobre agricultura vertical, fertirriego de precisión, nutrición vegetal y tecnologías emergentes.

Este artículo constituye uno de los productos de divulgación científica del proyecto del Simposio y documenta capacidades institucionales de la UASLP en horticultura vertical.

DE LA EVIDENCIA A LA TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

La transferencia tecnológica debe partir de resultados obtenidos bajo condiciones definidas. En lechuga, la renovación de 45 % mostró el mejor comportamiento dentro del ensayo de Ramírez Cubos (2026); en acelga, 75 % de la solución de Steiner presentó el mejor desempeño en las condiciones estudiadas por López-Mora *et al.* (2025). Estos resultados son experimentales y no deben interpretarse como una solución nutritiva universal ni como una receta aplicable a todos los cultivos o condiciones de producción.

Su valor consiste en demostrar que el manejo puede optimizarse mediante medición y comparación. Antes de adoptar una recomendación es necesario identificar qué prácticas mantienen un desempeño consistente y en qué condiciones.

Para productores y técnicos, la evaluación de un sistema vertical debería registrar pH, concentración de sales y temperatura de la solución; consumo de agua y nutrientes; desempeño de las plantas según su posición; y condiciones ambientales del ciclo.

Estos datos permiten determinar si un cambio de manejo mejora realmente la eficiencia y proporcionan una base técnica para una transferencia más informada de la tecnología. La transferencia, por tanto, se plantea como un proceso de validación progresiva y no como la difusión automática de una tecnología.

PERSPECTIVAS: MEDIR ANTES DE PROMETER

La capacidad instalada permite ampliar la agenda hacia calidad nutricional, biofortificación, nanofertilizantes e integración de datos de microclima, solución nutritiva y respuesta del cultivo. Estas líneas requieren evaluación controlada antes de atribuir beneficios.

La biofortificación depende de la dosis, la forma química del elemento y la fisiología de cada especie (Buturi *et al.*, 2021; Szerement *et al.*, 2022). De igual manera, el potencial de los nanofertilizantes debe demostrarse

experimentalmente en términos de nutrición, crecimiento y eficiencia de uso de insumos (Parra-Torrejón *et al.*, 2023).

Estas líneas se encuentran en diferentes etapas y no se presentan como resultados concluidos. Su desarrollo en HORTIVERT-UASLP ampliará las oportunidades de investigación, formación y colaboración científica.

El siguiente paso es armonizar variables, metodologías y protocolos entre San Luis Potosí y Almería para comparar respuestas entre ciclos, cultivos y ambientes, y determinar qué beneficios son consistentes y cuáles dependen del contexto.

Medir antes de prometer resume esta orientación: evaluar cada tecnología y estrategia de manejo antes de asumir sus ventajas o transferir recomendaciones. El criterio central es documentar la respuesta del cultivo y el uso de recursos antes de generalizar beneficios.

CONCLUSIONES

HORTIVERT-UASLP es una plataforma universitaria que integra investigación, formación y divulgación en sistemas hidropónicos verticales. Su principal fortaleza es convertir una infraestructura de cultivo en un espacio donde estudiantes e investigadores pueden medir, comparar y comprender el funcionamiento de estas tecnologías.

Los ensayos realizados con lechuga y acelga muestran que el manejo de la solución nutritiva y la posición de las plantas pueden modificar el desempeño del cultivo. Son resultados obtenidos bajo condiciones específicas y, por ello, su valor está en orientar nuevas evaluaciones antes de formular recomendaciones generales.

La colaboración con la Universidad de Almería amplía esta capacidad al permitir contrastar hipótesis entre ambientes semiáridos y mediterráneos. Esta combinación de evidencia experimental, formación y cooperación internacional fortalece el potencial de HORTIVERT-UASLP para apoyar una horticultura vertical más eficiente y sustentada en evidencia.

Agradecimientos

HORTIVERT-UASLP fue desarrollada con recursos federales del Programa Presupuestario U079 “Programa de Expansión de la Educación Media Superior y Superior”, Tipo Superior, ejercicio fiscal 2023 de la Secretaría de Educación Pública, complementados con



recursos propios de la Facultad de Agronomía y Veterinaria.

Este artículo es producto del proyecto “1er. Simposio Internacional sobre Sistemas de Cultivo Vertical, Nanofertilizantes y Calidad Nutricional de Hortalizas”, desarrollado por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí con apoyo del Consejo Potosino de Ciencia y Tecnología (COPOCYT).

“Proyecto apoyado con fondos del Fideicomiso 23871, de multas electorales”.

Literatura citada

- Buturi, C.V.; Mauro, R.P.; Fogliano, V.; Leonardi, C.; Giuffrida, F. (2021). Mineral biofortification of vegetables as a tool to improve human diet. *Foods* 10(2):223. <https://doi.org/10.3390/foods10020223>
- Lakhiar, I.A.; Gao, J.; Syed, T.N.; Chandio, F.A.; Buttar, N.A. (2025). Soilless agricultural systems: Opportunities, challenges, and perspectives. *Horticulturae* 11(6):568. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11060568>
- López Mora, M.F.; Quintero Castellanos, M.F.; González Murillo, C.A.; Borgovan, C.; Salas Sanjuán, M.C.; Guzmán, M. (2024). Predictive model to evaluate water and nutrient uptake in vertically grown lettuce under Mediterranean greenhouse conditions. *Horticulturae* 10(2):117. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10020117>
- López-Mora, M.F.; Borgovan, C.; González-Murillo, C.A.; Solano-Betancourt, M.; Quintero-Castellanos, M.F.; Guzmán, M. (2025). Resource efficiency of Swiss chard crop in vertical hydroponic towers under greenhouse conditions. *Biology and Life Sciences Forum* 47(1):5. <https://doi.org/10.3390/blsf2025047005>
- Parra-Torrejón, B.; Cáceres, A.; Sánchez, M.; Sainz, L.; Guzmán, M.; Bermúdez-Pérez, F.J.; Ramírez-Rodríguez, G.B.; Delgado-López, J.M. (2023). Multifunctional nanomaterials for biofortification and protection of tomato plants. *Environmental Science & Technology* 57(40):14950–14960. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c02559>
- Ramírez Cubos, M.F. (2026). *Efecto del porcentaje de renovación de la solución nutritiva y de la posición vertical sobre la productividad y el crecimiento de lechuga (Lactuca sativa L.) en un sistema de agricultura vertical*. Tesis profesional, Ingeniería Agronómica en Producción en Invernaderos, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México.

Secretaría de Educación Pública. (2023). *Programa de Expansión de la Educación Media Superior y Superior U079, Tipo Superior*. Secretaría de Educación Pública, México.

<https://educacionsuperior.sep.gob.mx/programas/programa-de-expansion-de-la-educacion-media-superior-y-superior-u079>

Szerement, J.; Szatanik-Kloc, A.; Jarosz, R.; Bajda, T.; Mierzwa-Hersztek, M. (2022). Agronomic biofortification with Se, Zn, and Fe: An effective strategy to alleviate hidden hunger. *Journal of Plant Growth Regulation* 41:2585–2609. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10444-7>

Aviso legal/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son exclusivamente de los autores y colaboradores, y no de Agraria ni de sus editores. Agraria y sus editores no se responsabilizan de ningún daño a personas o bienes que resulte de las ideas, métodos, instrucciones o productos mencionados en el contenido.

