



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**

**DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA**

**COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**DOCTORADO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA**



# **INOCULACIÓN DE UN CONSORCIO BACTERIANO EN EL CULTIVO DE LECHUGA Y TILAPIA BAJO SISTEMAS ACUAPÓNICOS**

**TESIS**

**Que como requisito parcial para  
obtener el grado de:**

**DOCTORA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA**

**Presenta:**

**HILDA ELIN PÉREZ PONCE**

**Bajo la supervisión del Dr. Joel Pineda Pineda.**



Chapingo, Estado de México, junio 2025

INOCULACIÓN DE UN CONSORCIO BACTERIANO EN EL CULTIVO DE  
LECHUGA Y TILAPIA BAJO SISTEMAS ACUAPÓNICOS.

Tesis realizada por **HILDA ELIN PÉREZ PONCE** bajo la supervisión del Comité  
Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para  
obtener el grado de:

**DOCTORA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA**

DIRECTOR:



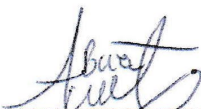
DR. JOEL PINEDA PINEDA

ASESOR:



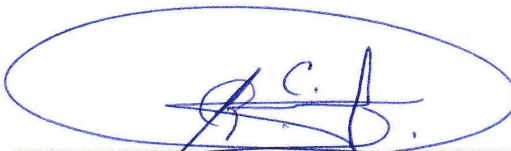
DR. JUAN ENRIQUE RODRÍGUEZ PÉREZ

ASESOR:



DR. ANTONINO BAEZ ROGELIO

ASESOR:



DR. ROGELIO CASTRO BRINDIS

LECTOR EXTERNO:



DRA. RAQUEL SALAZAR MORENO

**Chapingo, México, junio 2025**

## CONTENIDO

|                                                                                                                         |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| LISTA DE CUADROS .....                                                                                                  | vi   |
| LISTA DE FIGURAS .....                                                                                                  | viii |
| AGRADECIMIENTOS .....                                                                                                   | x    |
| DATOS BIOGRÁFICOS .....                                                                                                 | xii  |
| RESUMEN GENERAL .....                                                                                                   | 13   |
| GENERAL ABSTRACT .....                                                                                                  | 14   |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL .....                                                                                  | 15   |
| 1.1 LITERATURA CITADA .....                                                                                             | 19   |
| CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA .....                                                                                | 22   |
| 2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA LECHUGA .....                                                                       | 22   |
| 2.2 RIZOBACTERIAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO DE LAS<br>PLANTAS (PGPR) .....                                             | 23   |
| 2.2.1 MECANISMOS DE PROMOCIÓN DE CRECIMIENTO .....                                                                      | 24   |
| 2.3 INOCULANTES BACTERIANOS .....                                                                                       | 27   |
| 2.4 CULTIVO SIN SUELO .....                                                                                             | 29   |
| 2.5 ACUAPONIA .....                                                                                                     | 30   |
| 2.5.1 NUTRIMENTOS EN SOLUCIÓN ACUAPÓNICA .....                                                                          | 33   |
| 2.6 LITERATURA CITADA .....                                                                                             | 35   |
| CAPITULO 3. INOCULACIÓN DE SEMILLAS Y PLÁNTULAS DE LECHUGA<br>CON UN CONSORCIO BACTERIANO PROMOTOR DEL CRECIMIENTO .... | 44   |

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| RESUMEN.....                                                                                                                          | 44 |
| INTRODUCCIÓN .....                                                                                                                    | 45 |
| MATERIALES Y MÉTODOS .....                                                                                                            | 46 |
| UBICACIÓN.....                                                                                                                        | 46 |
| CONSORCIO BACTERIANO .....                                                                                                            | 47 |
| DISEÑO DE TRATAMIENTOS .....                                                                                                          | 47 |
| UNIDAD Y DISEÑO EXPERIMENTAL .....                                                                                                    | 48 |
| CARACTERES EVALUADOS .....                                                                                                            | 48 |
| ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....                                                                                                             | 50 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....                                                                                                           | 50 |
| EMERGENCIA.....                                                                                                                       | 50 |
| CRECIMIENTO DE PLÁNTULA .....                                                                                                         | 52 |
| CONCENTRACIÓN DE NUTRIMENTOS .....                                                                                                    | 55 |
| CONCLUSIÓN .....                                                                                                                      | 56 |
| LITERATURA CITADA.....                                                                                                                | 57 |
| CAPITULO 4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE SUBSISTEMAS HIDROPÓNICOS<br>PARA EL CULTIVO DE LECHUGA Y TILAPIA EN SISTEMAS ACUAPÓNICOS<br>..... | 63 |
| RESUMEN.....                                                                                                                          | 63 |
| MATERIALES Y MÉTODOS .....                                                                                                            | 65 |
| UBICACIÓN DEL EXPERIMENTO .....                                                                                                       | 65 |
| SISTEMAS ACUAPÓNICOS EVALUADOS .....                                                                                                  | 65 |
| DISEÑO DE TRATAMIENTOS .....                                                                                                          | 66 |

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| UNIDAD Y DISEÑO EXPERIMENTAL .....           | 68 |
| CARACTERES EVALUADOS .....                   | 68 |
| ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....                    | 71 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....                  | 71 |
| CONCLUSIONES.....                            | 81 |
| DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERESES ..... | 81 |
| REFERENCIAS.....                             | 82 |
| CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES GENERALES.....      | 87 |

## LISTA DE CUADROS

|                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Cuadro 1. Tratamientos de inoculación en semillas y plántulas de lechuga Lactuca sativa var. Ruby Sky.....                                                                                                                              | 48 |
| Cuadro 2. Comparaciones múltiples de rangos para el porcentaje de emergencia en semillas inoculadas y no inoculadas de lechuga Lactuca sativa var. Ruby Sky. ....                                                                       | 51 |
| Cuadro 3. Adhesión de bacterias a las semillas de lechuga Lactuca sativa var. Ruby Sky inoculadas con el consorcio bacteriano.....                                                                                                      | 52 |
| Cuadro 4. Cuadrados medios del análisis de varianza de los caracteres de crecimiento y desarrollo de plántulas inoculadas y no inoculadas de lechuga Lactuca sativa var. Ruby Sky a los 28 dds. ....                                    | 52 |
| Cuadro 5. Comparaciones de medias de tratamientos de los caracteres de crecimiento y desarrollo de plántulas de lechuga Lactuca sativa var. Ruby Sky inoculadas y no inoculadas a los 28 dds.....                                       | 54 |
| Cuadro 6. Tasas de crecimiento de los caracteres evaluados durante el crecimiento y desarrollo de lechugas inoculadas y no inoculadas con un consorcio bacteriano. ....                                                                 | 54 |
| Cuadro 7. Cuadrados medios del análisis de varianza de la concentración de nutrientes en tejido de hoja en plántulas de lechuga a los 28 dds. ....                                                                                      | 55 |
| Cuadro 8. Tratamientos utilizados para la siembra de lechuga cv. Ruby Sky. .                                                                                                                                                            | 66 |
| Cuadro 9. Comparación de medias de los parámetros de calidad de agua durante un ciclo de cultivo de lechuga Lactuca sativa cv. Ruby Sky y tilapia Oreochromis niloticus cultivadas en sistemas acuapónicos e hidropónico (28 ddt). .... | 72 |
| Cuadro 10. Cuadrados medios del análisis de varianza del rendimiento y crecimiento de tilapia Oreochromis niloticus cultivada en tres sistemas acuapónicos (28 ddt). ....                                                               | 73 |

|                                                                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Cuadro 11. Comparaciones de medias de la concentración de nutrimentos ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) en el efluente acuícola al final del ciclo de cultivo de lechuga ( <i>Lactuca sativa</i> ) (28 ddt). ..... | 75 |
| Cuadro 12. Comparación de medias de la concentración de nutrimentos en el tejido foliar al final del ciclo de cultivo de la lechuga (28 ddt).....                                                                  | 76 |
| Cuadro 13. Comparación de medias de los caracteres de crecimiento de la lechuga al final del ciclo de cultivo (28 ddt).....                                                                                        | 79 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. a) sistema acuapónico con subsistema hidropónico de cama de agregados (T1) y sistema hidropónico simple (T4), b) sistema acuapónico con subsistema hidropónico de balsa flotante (T2), c) sistema acuapónico con subsistema hidropónico NFT y d) sistemas acuapónicos y sistema hidropónico simple a los 7 ddt. .... | 68 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## *DEDICATORIA*

*A mis padres, hermanos y sobrinos*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por la beca otorgada para continuar con mi formación profesional y académica.

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Instituto de Horticultura por la formación académica obtenida a través del grupo de investigadores y docentes.

A los miembros de mi Comité Asesor: Dr. Joel Pineda Pineda, Dr. Juan Enrique Rodríguez Pérez, Dr. Antonino Báez Rogelio y Dr. Rogelio Castro Brindis por su apoyo, dirección y sus acertados comentarios y revisiones.

A todo el equipo del Dr. Antonino: el Dr. Jesús Muñoz y la Dra. Yolanda Morales del Laboratorio de Producción de biológicos 417 de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) por las facilidades otorgadas para la parte microbiológica del proyecto, por las pláticas y enseñanzas durante mi estancia.

Al personal técnico de la UACH: María Hayde Téllez Sánchez, Berenice Hernández Sánchez y Jorge Luis Sánchez Galicia por el gran apoyo y buena disposición para ayudar en todo lo requerido en el trabajo de campo y laboratorio.

A mis amigos Alma, Ana Paredes, Ana Sánchez, Claudia, Eduardo, Efrén, Eva, Francis, Gabo, Gore, Isis, Ismael, Jhusua, Juan, Miguel y Nancy por su gran apoyo en el laboratorio e invernadero, por las gratas convivencias y aventuras, por su invaluable amistad; a todos mis amigos y compañeros que formaron parte de esta experiencia y que de alguna manera siempre expresaron su apoyo.

Muy en especial a mis padres por apoyarme siempre de todas las maneras posibles en todo lo que he querido hacer, por creer en mí y alentarme a seguir adelante hasta alcanzar mis sueños sin importar cuán difícil sea el camino.

A mis hermanos por su apoyo y palabras de aliento.

A mis sobrinos por ser esa fuente de energía y motivación, por alegrar mis días con sus travesuras y ocurrencias.

A mi familia extendida y amigos que siempre mostraron interés y apoyo en lo que estaba haciendo.

## DATOS BIOGRÁFICOS

### Datos personales

|                     |                           |
|---------------------|---------------------------|
| Nombre              | Hilda Elín Pérez Ponce    |
| Fecha de nacimiento | 21 de mayo 1983           |
| Lugar de nacimiento | Ciudad de México, México. |
| CURP                | PEPH830521MDFRNL          |
| Cédula profesional  | 6985193                   |



### Desarrollo académico

|              |                                                                  |
|--------------|------------------------------------------------------------------|
| Maestría     | Maestría en Ciencias en Manejo de Recursos Marinos. CICIMAR-IPN. |
| Licenciatura | Licenciada en Hidrobiología. UAM-Iztapalapa.                     |

## RESUMEN GENERAL

### INOCULACIÓN DE UN CONSORCIO BACTERIANO EN EL CULTIVO DE LECHUGA Y TILAPIA BAJO SISTEMAS ACUAPÓNICOS

La lechuga es la hortaliza de hoja más producida y consumida a nivel mundial. Para asegurar un buen rendimiento después del trasplante, es necesario contar con plántulas de calidad en los diferentes sistemas productivos, el sistema acuapónico no es la excepción. La acuaponía integra la hidroponía y acuicultura en un sistema cerrado de recirculación. Para mejorar el desarrollo de plántulas en invernadero, se han utilizado rizobacterias promotoras del crecimiento (PGPR) que, mediante mecanismos directos e indirectos favorecen el crecimiento. Los objetivos de este estudio fueron: 1) Evaluar el efecto de un consorcio bacteriano en semillas comerciales peletizadas y plántulas de lechuga sobre el porcentaje de emergencia, caracteres de crecimiento y concentración de nutrimentos en tejido foliar y 2) Evaluar y comparar el crecimiento y rendimiento de lechuga y tilapia en tres sistemas acuapónicos (cama de agregados, balsa flotante y técnica de película nutritiva (NFT) y un sistema hidropónico. En los sistemas acuapónicos, se evaluó el crecimiento y rendimiento de plantas y peces; en la solución nutritiva se midió pH, CE, oxígeno disuelto y nutrimentos; en tejido foliar se obtuvo el contenido de macro y micronutrimentos. Los resultados mostraron que el consorcio bacteriano (*Azospirillum brasilense*, *Bradyrhizobium* sp., *Burkholderia unamae*, *Gluconacetobacter diazotrophicus*, *Pseudomonas putida* y *Sphingomonas* sp.) disminuyó ( $P \leq 0.05$ ) el porcentaje de emergencia (24 %), la altura de planta (20.2 %) y la longitud de raíz (18.6 %) de la lechuga. La concentración de nutrimentos (N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Zn y Mn) en tejido foliar no fue afectada por el consorcio. La solución acuapónica presentó acumulación de Na y Ca. El tipo de sistema acuapónico influyó únicamente en el crecimiento y rendimiento de lechuga ( $P \leq 0.05$ ). El sistema acuapónico de cama en agregados fue el más apropiado para el cultivo de lechuga, con resultados comparables al sistema hidropónico.

**Palabras clave:** Rizobacterias promotoras del crecimiento (PGPR), plántulas, cama de agregados, balsa flotante, NFT.

---

Tesis de Doctorado en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Hilda Elín Pérez Ponce

Dirección: Dr. Joel Pineda Pineda

## GENERAL ABSTRACT

### INOCULATION OF A BACTERIAL CONSORTIUM IN LETTUCE AND TILAPIA CULTURE UNDER AQUAPONIC SYSTEMS

Lettuce is the most widely produced and consumed leafy vegetable worldwide. To ensure good yield after transplanting, quality seedlings are essential in different production systems, and aquaponics is no exception. Aquaponics integrates hydroponics and aquaculture in a closed, recirculating system. To improve seedling development in greenhouses, growth-promoting rhizobacteria (PGPR) have been used, which promote growth through direct and indirect mechanisms. The objectives of this study were: 1) To evaluate the effect of a bacterial consortium on pelleted commercial seeds and lettuce seedlings on emergence percentage, growth traits and nutrient concentration in leaf tissue and 2) To evaluate and compare the growth and yield of lettuce and tilapia in three aquaponic systems (gravel bed, floating raft and nutrient film technique (NFT) and a hydroponic system. In the aquaponic systems, plant and fish growth and yield were evaluated; pH, EC, dissolved oxygen and nutrients were measured in the nutrient solution; and macro and micronutrient content was obtained from leaf tissue. The results showed that the bacterial consortium (*Azospirillum brasilense*, *Bradyrhizobium* sp., *Burkholderia unamae*, *Gluconacetobacter diazotrophicus*, *Pseudomonas putida* and *Sphingomonas* sp.) decreased ( $P \leq 0.05$ ) the emergence percentage (24 %), plant height (20.2 %) and root length (18.6 %) of lettuce. The concentration of nutrients (N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Zn and Mn) in leaf tissue was not affected by the consortium. The aquaponic solution showed Na and Ca accumulation. The type of aquaponic system only influenced the growth and yield of lettuce ( $P \leq 0.05$ ). The gravel bed aquaponic system was the most appropriate for lettuce cultivation, with results comparable to the hydroponic system.

**Keywords:** Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR), gravel bed, floating raft, NFT.

---

Thesis of Doctor in Science in Horticulture, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Hilda Elín Pérez Ponce

Advisor: Dr. Joel Pineda Pineda

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL**

Actualmente, el 72% del agua extraída de acuíferos, corrientes fluviales y lagos se utiliza en la agricultura, por lo que es necesario desarrollar estrategias que incrementen la eficiencia del uso del agua y promuevan su reutilización en los sistemas de producción agrícola (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2021).

La lechuga, es la hortaliza de hoja más cultivada y consumida en el mundo debido a su valor nutritivo (Shatilove et al., 2019). Es cultivada en todos los continentes y China es el principal productor seguido de Estados Unidos e India (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2023). México es el noveno productor mundial, en 2023 la producción ascendió a 552,940 toneladas de lechuga al año 2023 (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2024).

La producción de lechuga se divide en dos fases: la fase de plántula, que abarca desde la siembra hasta el trasplante y se lleva a cabo bajo condiciones controladas de invernadero, y la fase de desarrollo productivo, desde el trasplante hasta la cosecha, realizada en campo abierto o invernadero (Vio et al., 2023). Este sistema de cultivo implica cierta exigencia de nutrimentos, lo que conlleva el uso de fertilizantes y agroquímicos para el manejo de plagas y enfermedades en ambas etapas del cultivo (Mitidieri & Corbino, 2012).

La disponibilidad de nutrientes durante la etapa de plántula influye en el crecimiento y calidad, lo que afecta su rendimiento tras el trasplante (Dufault, 1998). La fertilización mejora el crecimiento y el rendimiento, pero cuando nutrimentos como el nitrógeno son aplicados en exceso, se genera contaminación ambiental por la eutrofización, la acidificación y toxicidad directa (Vetrano et al., 2009).

Las rizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas (PGPR) pueden ser utilizadas para reducir el uso de fertilizantes (Sokolova et al., 2011). Las PGPR son un grupo de bacterias de vida libre (no dependen de un organismo hospedador para sobrevivir o

reproducirse), que colonizan la rizósfera o el interior de las raíces de las plantas y estimulan el crecimiento mediante mecanismos directos e indirectos (Glick, 2012).

Las PGPR ejercen efectos directos sobre las plantas al facilitar la disponibilidad de fitonutrientes, mediante la fijación de nitrógeno (la enzima nitrogenasa convierte  $N_2$  en  $NH_4^+$ ) y la solubilización de minerales esenciales, como fósforo (P), potasio (K), hierro (Fe) y zinc (Zn). Estas acciones contribuyen al desarrollo y vigor de las plantas. Asimismo, las PGPR intervienen en la regulación de fitohormonas, mediante la producción directa de auxinas, citoquininas, giberelinas, o bien, mediante la degradación o inactivación de fitohormonas de estrés como el etileno; es así como las PGPR pueden modular procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento radical y aéreo, la floración y la respuesta a condiciones de estrés (El-Tohamy et al., 2008). De manera indirecta, estas bacterias también protegen a las plantas mediante la inhibición de patógenos y microorganismos perjudiciales por medio de la producción de compuestos volátiles antimicrobianos, producción de enzimas líticas o sideróforos (Basu et al., 2021; Molina-Romero et al., 2015).

Géneros como *Bradyrhizobium*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Gluconacetobacter* y *Pseudomonas* se han caracterizado y utilizado como PGPR en todo el mundo (Glick, 2012). Algunas cepas de estos géneros se han empleado para formular inoculantes de segunda generación, es decir formulaciones que contienen en su composición más de una bacteria (consorcio) del mismo o diferente género (Baez-Rogelio et al., 2017). Estas formulaciones multi-especies permiten la activación de más de un mecanismo de promoción del crecimiento y pueden generar resultados aditivos (suma de los mecanismos de promoción del crecimiento) o sinérgicos (se potencian los efectos).

La aplicación de PGPR ha contribuido a obtener plántulas uniformes y de calidad, debido a su capacidad para mejorar la germinación, crecimiento, peso de los brotes y raíces, sanidad del cultivo, así como el posterior desarrollo y rendimiento de las plantas (Szczech et al., 2016). Una plántula de calidad se caracteriza por no presentar signos de enfermedades ni plagas, capacidad de adaptarse en condiciones adversas tras el

trasplante, sistema radical bien formado y desarrollo foliar sin daños como clorosis o necrosis (Balliu et al., 2017).

Existe una relación entre la calidad de las plántulas de hortalizas y el rendimiento que tendrán después del trasplante (Vetrano, et al., 2020), esto aplica para cualquier sistema productivo ya sea en suelo, hidroponía o acuaponía. La hidroponía, es una técnica de cultivo donde las plantas crecen en una solución de nutrientes con o sin medios artificiales de soporte (Hussain et al., 2014; Jones, 1997). En cambio, la acuaponía, es un sistema integrado que combina elementos de recirculación de la hidroponía y la acuicultura (Goddek et al., 2015), que tiene el potencial para contribuir al abastecimiento de alimentos y a la mitigación de problemáticas globales como la contaminación ambiental (Graber & Junger, 2009).

Los sistemas acuapónicos se basan en la interacción simbiótica de peces, bacterias y plantas, todos integrados en un sistema cerrado de recirculación de agua. El agua transporta los nutrimentos derivados de los desechos de los peces y las bacterias nitrificantes transforman el amonio en nitrito y luego en nitrato, forma asimilable para las plantas (Schmautz et al., 2016). Por lo tanto, un sistema acuapónico está conformado por un subsistema acuícola, un subsistema de filtración (filtración mecánica y biofiltro) y un subsistema hidropónico (Rakocy, 2012; Somerville et al., 2014). El subsistema acuícola contiene los organismos acuáticos principalmente peces, el subsistema de filtración consta de un sedimentador para la eliminación de residuos y un biofiltro donde se lleva a cabo la nitrificación mediante la oxidación microbiana, el subsistema hidropónico es el componente donde las plantas son cultivadas con o sin un medio o agregado (sustrato) para sostener las raíces (Lennard, 2017).

Los sistemas de producción acuapónica con base en el tipo de subsistema hidropónico utilizado para la producción vegetal se clasifican en: cama de agregados, balsa flotante y técnica de la película nutritiva (NFT) (Engle, 2015; Delaide et al., 2017; Kledal et al., 2019). La selección del subsistema hidropónico debe considerar la especie vegetal y los nutrimentos disponibles, los cuales están en función o dependen del organismo acuático

utilizado en el sistema (Palm et al., 2018). La eliminación de nutrimentos, rendimiento de cultivo, subsistema de filtración, variaciones ambientales y las técnicas de manejo son características que deben ser consideradas para definir que subsistema hidropónico es el más apropiado (Goda et al., 2015; Lenard & Leonard, 2006; Schmautz et al., 2016; Yep & Zheng, 2019).

Los objetivos de la presente investigación fueron: Evaluar el efecto de la inoculación de un consorcio bacteriano sobre semillas comerciales peletizadas y plántulas de lechuga *Lactuca sativa* cv. Ruby Sky, su influencia sobre la emergencia, el crecimiento y la concentración de nutrimentos en el tejido foliar. Así como evaluar y comparar el crecimiento y rendimiento de lechuga (*Lactuca sativa*) cv. Ruby Sky y tilapia (*Oreochromis niloticus*) en tres sistemas acuapónicos (cama de agregados, balsa flotante y NFT) y un sistema hidropónico.

## 1.1 LITERATURA CITADA

- Baez-Rogelio, A., Morales-García, Y. E., Quintero-Hernández, V., & Muñoz-Rojas, J. (2017). Next Generation of Microbial Inoculants for Agriculture and Bioremediation. *Microbial Biotechnology*, 10(1), 19–21. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12448>
- Basu, A., Prasad, P., Das, S. N., Kalam, S., Sayyed, R. Z., Reddy, S., & El Enshasy, H. (2021). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) as green bioinoculants: Recent developments, constraints, and prospects. *Sustainability*, 13(3), Article 1140. <https://doi.org/10.3390/su13031140>
- Dufault, R. J. (1998). Vegetable transplant nutrition. *HortTechnology*, 8(4), 515-523. <https://doi.org/10.21273/HORTECH.8.4.515>
- El-Tohamy, W. A., El-Abagy, H. M., El-Greadly, N. H. M., & Gruda, N. (2008). Hormonal changes, growth and yield of tomato plants in response to chemical and bio-fertilization application in sandy soils. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 82(2), 179-182. <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2008.082.029>
- Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012, Article 963401. <https://doi.org/10.6064/2012/963401>
- Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K.V., Jijakli, H., & Thorarinsdottir, R. (2015). Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustainability* 7(4), 4199-4224. <https://doi.org/10.3390/su7044199>
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Dos-Santos, M. (2019). Aquaponics and Global Food Challenges. In S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, B. & G. M. Burnell (Eds.), *Aquaponics Food Production* (p.p. 3-17). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_1)
- Graber, A., & Junge, R. (2009). Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination*, 246(1-3), 147-156. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.048>
- Hussain, A., Iqbal, K., Aziem, S., Mahato, P., & Negi, A. K. (2014). A review on the science of growing crops without soil (soilless culture)-a novel alternative for growing crops. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 7(11), 833-842. <http://ijagcs.com/wp-content/uploads/2014/08/833-842.pdf>

- Jones, J.B., (1997). *Hydroponics: A practical guide for the soilless grower*. CRC Press.
- Kledal, P. R., König, B., Matulić, D. (2019). Aquaponics: The ugly duckling in organic regulation. In S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, B., Burnell, GM (eds.) *Aquaponics Food Production Systems*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_19)
- Mitidieri, M. S., & Corbino, G. B. (2012). *Manual de Horticultura Periurbana* (1.<sup>a</sup> ed). Ediciones INTA. [https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual\\_de\\_horticultura\\_urbana\\_y\\_periurbana.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual_de_horticultura_urbana_y_periurbana.pdf)
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2021). *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. Sistemas al límite. Informe de síntesis 2021*. <https://doi.org/10.4060/cb7654es>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2023). *FAOSTAT: Cultivos y productos ganaderos*. <https://www.fao.org/statistics/es>
- Palm, H. W., Knaus, U., Appelbaum, S., Goddek, S., Strauch, S. M., Vermeulen, T., Jijakli, M. H. & Kotzen, B. (2018). Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. *Aquaculture international*, 26, 813-842. <https://doi.org/10.1007/s10499-018-0249-z>
- Schmautz, Z., Loeu, F., Liebisch, F., Graber, A., Mathis, A., Bulc, T. G., & Junge, R. (2016). Tomato productivity and quality in aquaponics: Comparison of three hydroponic methods. *Water*, 8, Article 533. <https://doi.org/10.3390/w8110533>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2023). Panorama Agroalimentario, México. [https://nube.siap.gob.mx/gobmx\\_publicaciones\\_siap/](https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/)
- Shatilov, M. V., Razin, A. F., & Ivanova, M. I. (2019). Analysis of the world lettuce market. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 395, Article 012053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/395/1/012053>
- Sokolova, M. G., Akimova, G. P., & Vaishlya, O. B. (2011). Effect of phytohormones synthesized by rhizosphere bacteria on plants. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 47(3), 274-278. <https://doi.org/10.1134/S0003683811030148>

- Szczech, M., Szafirowska, A., Kowalczyk, W., Szwejda-Grzybowska, J., Włodarek, A., & Maciorowski, R. (2016). The effect of plant growth promoting bacteria on transplants growth and lettuce yield in organic production. *Journal of Horticultural Research*, 24(2), 101–107. <https://doi.org/10.1515/johr-2016-0026>
- United Nations (2024). *World population prospects 2024: Summary of results (UN DESA/POP/2024/TR/NO. 9)*. Department of Economic and Social Affairs, Population Division United Nations. <https://desapublications.un.org/publications/world-population-prospects-2024-summary-results>
- Velázquez L., Ortiz I., Chávez J., Pámanes, G., Carrillo, A., & Pereda, M. (2022). Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional. *TIP. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 25, 1-13. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.482>
- Vetrano, F., Iapichino, G., Poma, M., Fascella, S., & Incalcaterra, G. (2009). Use of organic fertilizers for lettuce plug plant production. *Acta Horticulturae*, 607-612. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.807.90>
- Vetrano, F., Miceli, C., Angileri, V., Frangipane, B., Moncada, A., & Miceli, A. (2020). Effect of bacterial inoculum and fertigation management on nursery and field production of lettuce plants. *Agronomy*, 10(10), Article 1477. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101477>
- Vio, S. A., Galar, M. L., Gortari, M. C., Balatti, P., Garbi, M., Lodeiro, A. R., & Luna, M. F. (2023). Multispecies bacterial bio-input: tracking and plant-growth-promoting effect on lettuce var. sagess. *Plants*, 12(4), Article 736. <https://doi.org/10.3390/plants12040736>

## CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Características generales de la lechuga

La lechuga (*Lactuca sativa*) es el cultivo más importante de hortalizas de hoja en el mundo (Shatilov et al., 2019). China es el principal productor y su área cosechada alcanza el 51.4 % del total Mundial. México ocupa el noveno lugar de producción mundial, en 2023 alcanzó una producción de 552,940 toneladas de lechuga y un consumo per cápita de 2.2 kg. Los estados de Guanajuato, Zacatecas y Puebla son los principales productores de lechuga al aportar el 59.1 % de la producción nacional (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2023).

La lechuga es consumida cruda popularmente en ensaladas, su valor nutricional ha sido subestimado, contiene 95% de agua, es baja en calorías y sodio, y posee una buena fuente de fibra, folatos, vitamina A, B1, B2, C, E, minerales como Fe, P y K y acción antioxidante. Aporta compuestos bioactivos ( $\alpha$ -tocoferol,  $\beta$ -caroteno, antocianinas, compuestos fenólicos) con propiedades antiinflamatorias, reductoras de colesterol y antidiabéticas; sin embargo, la cantidad y tipo de nutrimentos y metabolitos bioactivos difieren dependiendo de la variedad de lechuga (Kim et al., 2016).

La lechuga, pertenece a la familia Asteraceae, es una planta herbácea, autógama y anual de ciclo corto, con sistema radical pivotante y ramificado que no sobrepasa los 25 cm de profundidad, tallo corto de forma cilíndrica, las hojas emergen alternadamente en forma de roseta o un cogollo, con borde de forma redondeada, lisas, rizadas o aserradas (Rincón, 2008).

La lechuga *Lactuca sativa* cv. Ruby Sky es de tipo batavia, hoja de roble, jaspeada roja, no forma cabeza o cogollo, resistente al espigado y se adaptada a diferentes condiciones climáticas (Carrasco-Silva & Sandoval-Briones, 2016).

## 2.2 Rizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas (PGPR)

Las plantas albergan una amplia variedad de bacterias en su microbiota, las cuales presentan propiedades que favorecen su crecimiento y desarrollo, tanto en condiciones favorables como bajo estrés (Santoyo et al., 2021). Las rizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas (PGPR) son bacterias que colonizan la superficie de la raíz y el suelo adherido a esta, pueden ser de vida libre o asociativas, y son capaces de promover el crecimiento en las plantas mediante diferentes mecanismos (Elnahal et al., 2022). Entre las PGPR más estudiadas se encuentran los géneros *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Merzoryhizobium*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Klebsiella*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Gluconacetobacter* (Glick, 2012). Las PGPR se han obtenido de distintos entornos naturales, incluyendo los nódulos de leguminosas, la rizósfera de plantas, la región endófitas de raíces, la región epífita de las plantas (Molina-Romero et al., 2016) y a partir de suelos (Onofre-Lemus et al., 2009).

No todas las bacterias que se aíslan a partir de las plantas o del suelo son promotoras del crecimiento, primero se evalúa su capacidad de adhesión y colonización, se realizan estudios sobre su capacidad de estimular el crecimiento después de inocular la planta en pruebas en cámara de crecimiento e invernadero (Morales-García et al., 2011). Posteriormente se exploran los mecanismos moleculares o las características fisiológicas involucradas en la promoción del crecimiento, las cuales deben estar respaldadas por estudios donde se obtienen mutantes incapaces de realizar la función estudiada (Vivanco-Calixto et al., 2016).

Las PGPR utilizan una combinación de estrategias para estimular el crecimiento y la salud de las plantas. Su acción benéfica depende de tres pasos: 1) atracción hacia la rizósfera mediada por quimiotaxis-específica; es decir que las bacterias son atraídas hacia exudados particulares que la planta libera (azúcares, aminoácidos y ácidos orgánicos) y que funcionan como fuente de carbono y moléculas de señalización (Albareda et al., 2006); 2) Adhesión y colonización de la raíz, las bacterias deben adherirse a las semillas

o raíces para su posterior colonización, este proceso competitivo depende del genotipo tanto de la bacteria como de la planta, y puede ser específico para ciertos sitios de las raíz (Bloembergen & Lugtenberg, 2001); y 3) Funcionalidad de la simbiosis asociativa, implica el establecimiento efectivo de la relación microorganismo-planta que permitirá modificar el balance hormonal de la planta produciendo fitohormonas o compuestos volátiles, mejorar la nutrición por fijación de nitrógeno o solubilización de fosfatos, y favorecer la salud de la planta mediante mecanismos de protección frente a patógenos (Van Loon, 2007).

### 2.2.1 Mecanismos de promoción de crecimiento

Los mecanismos de promoción de crecimiento de las plantas pueden ser directos o indirectos; sin embargo, el efecto promotor ocurre cuando dos o más mecanismos funcionan de manera combinada y provoca la estimulación en las plantas (Babalola, 2010).

Los mecanismos directos incluyen la fijación de nitrógeno, solubilización de fosfatos, y producción de fitohormonas (Vivanco-Calixto et al., 2016).

**Fijación de nitrógeno.** Es el proceso mediante el cual ciertas bacterias convierten el nitrógeno atmosférico ( $N_2$ ) en amonio ( $NH_4^+$ ), una forma que las plantas pueden absorber y utilizar (Annan et al., 2012). Este proceso lo realiza la enzima nitrogenasa y ocurre tanto en bacterias asociadas a plantas como en bacterias de vida libre. Las bacterias simbióticas como *Rhizobium*, *Bradyrhizobium* y *Frankia* forman nódulos en raíces de leguminosas, donde aportan nitrógeno a cambio de carbono de la planta (Fernández-Aunión et al., 2010). Otras bacterias endófitas como *Herbaspirillum* spp., *Azospirillum amazonense* y *Burkholderia tropica* también fijan nitrógeno, aunque su contribución al nitrógeno de la planta es mínima (Muñoz-Rojas & Caballero-Mellado, 2003). Algunas bacterias de vida libre (*Azotobacter* sp., *Pseudomonas fluorescens*, *Beijerinckia*, *Azospirillum brasilense*) también fijan nitrógeno, pero su aporte al crecimiento vegetal

suele deberse más a la producción de fitohormonas que a la fijación de nitrógeno (Molina-Romero et al., 2015).

**Solubilización de fosfatos.** El fósforo es un nutriente esencial para el metabolismo vegetal, aun cuando está presente en la fracción inorgánica e orgánica del suelo, solo está disponible para las plantas en sus formas monobásica ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) y dibásica ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ), las cuales se encuentran en bajas concentraciones (Khan et al., 2009). Algunas PGPR pueden solubilizar fosfatos inorgánicos y orgánicos mediante enzimas como fosfatasas, fitasas y C-P liasas, o bien liberar ácidos orgánicos como el ácido glucónico o 2-cetoglucónico que forman quelatos con el fósforo, haciéndolo biodisponible (Lugtenberg & Kamilova, 2009). Entre estas bacterias se encuentran *Pseudomonas putida*, *Bradyrhizobium japonicum*, *Enterobacter agglomerans* y *Rhizobium leguminosarum* (Rodríguez & Fraga, 2006).

**Producción de fitohormonas.** Las fitohormonas son compuestos que, incluso en bajas concentraciones (<1 mM), influyen significativamente en el crecimiento, desarrollo y maduración de las plantas (Damam et al., 2016). Las PGPR actúan como fitoestimulantes, ya que pueden inducir a las plantas a producir sus propias fitohormonas o producirlas directamente junto con compuestos volátiles que estimulan el crecimiento vegetal, especialmente del sistema radical y el follaje (Antar et al., 2021). Por lo tanto, entre las fitohormonas que generan las PGPR se encuentran:

- Auxinas (como el AIA o ácido indol-3-acético): promueven el desarrollo radical, la división celular y mejoran la absorción de nutrimentos. Se sintetizan a partir del triptófano, aminoácido presente en los exudados de las raíces. Bacterias productoras: *Gluconacetobacter diazotrophicus*, *Azospirillum brasilense*, *Enterobacter cloacae*, *Rhizobium leguminosarum*, entre otras.
- Citocininas: estimulan la división y diferenciación celular, la formación de raíces adventicias y hojas. Bacterias productoras: *Arthrobacter giacomelloi*, *Azospirillum brasilense*, *Bradyrhizobium japonicum*, *Bacillus licheniformis*, *Pseudomonas fluorescens*, etc.
- Giberelinas: regulan procesos como germinación, elongación del tallo, raíces laterales, floración y desarrollo de frutos. Se conocen más de 130 tipos (AG1, AG3,

AG4, etc.). Bacterias productoras: *G. diazotrophicus*, *A. lipoferum*, *Bacillus pumilus*, *Herbaspirillum seropedicea*, entre otros.

- Etileno: acelera la germinación, maduración, síntesis hormonal, limita la elongación de raíces. Bacterias productoras: *Rhizobium trifoli*

Además de su papel en el desarrollo vegetal, las fitohormonas también participan en la formación de biopelículas y en la regulación del metabolismo bacteriano (Camelo et al., 2011; Hasan et al., 2024; Molina-Romero et al., 2015).

Los mecanismos indirectos que las PGPR utilizan para proteger a las plantas y reducir el impacto de los fitopatógenos, incluyen la producción de compuestos antimicrobianos, sideróforos, enzimas líticas, metabolitos antifúngicos, (Glick, 1995; Pérez-Hernández et al., 2019).

**Antagonistas microbianos.** Las PGPR pueden reemplazar a los pesticidas al actuar como antagonistas microbianos que combaten enfermedades de las plantas mediante la producción de antibióticos. Los antibióticos son compuestos orgánicos de bajo peso molecular que interfieren en los procesos metabólicos de ciertos microorganismos, inhibiendo su crecimiento. Estos compuestos son excretados localmente o cerca de la superficie de la planta, son biodegradables y efectivos en pequeñas cantidades (Bloemberg & Lugtenberg, 2011). Especies de *Pseudomonas* y *Bacillus* han sido ampliamente estudiadas por su capacidad de generar compuestos antimicrobianos. *Pseudomonas spp.* producen antibióticos como: oomicina A, pioluteorina, pirrolnitrina, 2,4-diacetilfloroglucinol, ramnolípidos, entre otros. *Bacillus spp.* sintetizan lipopeptídicos antimicóticos como surfactina y bacilomicina (Fouzia et al., 2015). El biocontrol basado en antibióticos implica la inhibición de la síntesis de la pared celular, desestabilización de membrana celular, inhibición de la traducción proteica en patógenos (Beneduzi et al., 2012).

**Sideróforos.** Los sideróforos son compuestos peptídicos de bajo peso molecular que presentan una alta afinidad por iones férricos ( $\text{Fe}^{3+}$ ), facilitando su solubilización y transporte en ambientes donde este micronutriente es escasamente disponible (Stearns et al., 2012). El mecanismo de acción de los sideróforos comienza con la formación del complejo sideróforo- $\text{Fe}^{3+}$ , que es reconocido y transportado activamente a través de

receptores de membrana bacterianos sensibles a la disponibilidad de hierro (Beneduzi et al., 2013). Una vez dentro de la célula, el  $\text{Fe}^{3+}$  es reducido a  $\text{Fe}^{2+}$ , forma en la que puede participar en procesos metabólicos esenciales (Ramamoorthy et al., 2001). Por lo tanto, las PGPR contribuyen al biocontrol de patógenos al reducir la disponibilidad de  $\text{Fe}^{3+}$  en el entorno. Algunas bacterias productoras de sideróforos son *Bacillus altitudinis*, *Burkholderia gladioli*, *Rhizobium meliloti*, *Burkholderia tropica* y *Pseudomonas aeruginosa* (Vyas & Gulati, 2009).

**Enzimas líticas.** Algunas PGPR producen enzimas protectoras que inhiben patógenos y promueven el crecimiento vegetal. Las quitinasas y  $\beta$ -glucanasas degradan la pared celular de hongos fitopatogénos; *Sinorhizobium fredii* KCC5 y *Pseudomonas fluorescens* LPK2 producen estas enzimas, para inhibir el desarrollo de *Fusarium udum* y prevenir la marchitez en plantas (Kumar et al., 2010).

**Resistencia sistémica inducida.** La interacción entre las PGPR y su planta hospedera disminuye la incidencia y severidad de infecciones causadas por bacterias, hongos, virus, nemátodos e insectos patógenos (Poupin et al., 2013). La resistencia sistémica inducida (ISR) se refiere a un estado en el que la planta incrementa su capacidad de defensa al ser estimulada o activada a través de las vías de señalización del ácido jasmónico y del etileno, compuestos endógenos que coordinan las respuestas defensivas de la planta y brindan protección contra patógenos (Bordiec et al., 2011). Algunos componentes bacterianos como los lipopolisacáridos, ácido salicílico, sideróforos, también activan la ISR. A diferencia de otros mecanismos de biocontrol, para desencadenar el mecanismo ISR no es necesario que la cepa colonice la raíces de la planta de forma extensiva. Algunas PGPR capaces de promover el ISR son *Bacillus altitudinis*, *B. cereus*, *B. subtilis*, *B. amyloliqueaciens*, *Burkholderia phytofirmans*, *Rhizobium leguminosarum*, *Pseudomonas putida*, entre otras (Bhattacharyya & Jha, 2012).

## 2.3 Inoculantes bacterianos

Un inoculante es una formulación que contiene un concentrado de una bacteria específica o un consorcio de bacterias benéficas dentro de un portador (sustancia base sobre la cual

se formulan y transportan las bacterias), la función del portador es mantener viables a las bacterias desde el sitio de elaboración al sitio de aplicación (Bashan, 1998). El inoculante tiene la capacidad para sustituir parcial o totalmente el uso de fertilizantes químicos (Bashan et al., 2014). Un consorcio, es una mezcla de varias cepas de bacterias que pueden trabajar de forma sinérgica. Algunas cepas de PGPR han sido utilizadas para formular inoculantes comerciales de una sola especie para promover el crecimiento y la producción de cultivos, así como para controlar enfermedades (Bashan et al., 2014). Sin embargo, las formulaciones multiespecie o con consorcios pueden tener efectos superiores en las plantas debido a que diferentes microorganismos pueden interactuar sinérgicamente para proporcionar nutrimentos, eliminar productos inhibidores y estimularse entre sí para mejorar funciones fisiológicas (Thomloudi et al., 2019).

Un aspecto determinante en la eficacia de los consorcios bacterianos es la interacción entre sus especies componentes para garantizar una coexistencia estable a largo plazo (Stephens & Rask, 2000). El diseño y formulación de inoculantes de consorcios bacterianos requiere la comprensión de los modos de interacción, la adhesión de semillas y colonización de raíces, que no existan relaciones antagónicas entre sus componentes y se utilicen de preferencia bacterias tolerantes a la desecación para que puedan permanecer más tiempo en el suelo o sustrato y en las formulaciones (Molina-Romero et al., 2017).

El inoculante EMMIM-1 utilizado en esta investigación está conformado por *Pseudomonas putida* KT2440, *Sphingomonas* sp. OF178, *Bradyrhizobium* sp. MS22, *Burkholderia unamae* MT16451T, *Gluconacetobacter diazotrophicus* PAI5T y *Azospirillum brasilense* Sp7. El consorcio fue proporcionado por el laboratorio Producción de Biológicos 417 del Centro de Investigaciones en Ciencias Microbiológicas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Las características de las bacterias que conforman el consorcio se describen a continuación:

- *Pseudomonas putida* KT2440 es una bacteria gram negativa, aeróbica, produce auxinas, citoquininas y giberelinas, produce sideróforos, antibióticos y el más estudiado es el 2-4 diacetilfloroglucinol que inhibe el crecimiento de hongos (Molina-Rivera et al., 2017; Someya et al., 2013).

- *Sphingomonas* sp. OF178 es una bacteria gram negativa, aeróbica, produce auxinas, ACC desaminasa y sideróforos (Molina-Romero et al., 2017).
- *Bradyrhizobium* sp. MS22 es una bacteria gram negativa, aerobia, mantiene una relación simbiótica con leguminosas y fija nitrógeno, produce exopolisacáridos como barrera de defensa y le permite sobrevivir en condiciones adversas y como fuente de carbono (York et al., 1997).
- *Burkholderia unamae* MTI641T es una bacteria gram negativa, produce sideróforos y fija nitrógeno, degrada compuestos tóxicos por lo que es útil para biorremediación, sintetiza compuestos antimicrobianos derivados de la quinacina (Caballero-Mellado et al., 2004).
- *Gluconacetobacter diazotrophicus* es una bacteria gram negativa, produce auxinas, sideróforos, compuestos antimicrobianos, solubiliza minerales, fija nitrógeno (Intorne et al., 2009).
- *Azospirillum brasilense* Sp7 es una bacteria gram negativa, fija nitrógeno, produce auxinas, giberelinas, citoquininas, etileno, ácido abscísico, poliamidas, sideróforos e induce a la resistencia sistémica (Glick et al., 1999; Molina-Romero, 2017).

## 2.4 Cultivo sin suelo

En la producción de cultivos hortícolas, el cultivo sin suelo incluye cualquier sistema que no emplea el suelo para su desarrollo, pudiéndose cultivar en una solución nutritiva, o sobre cualquier sustrato (lana de roca, turba, perlita, piedra pómez o fibra de coco) al que se adiciona solución nutritiva (Baixauli & Aguilar, 2002). Dentro de la agricultura sin suelo se encuentra la hidroponía, la acuaponía, la aeroponía y la agricultura en sustrato (Sharma et al., 2018). La hidroponía, es una técnica de cultivo donde las plantas crecen en una solución de nutrientes con o sin medios artificiales de soporte (Hussain et al., 2014; Jones, 1997). Los sistemas hidropónicos, se clasifican en dos tipos: sistemas abiertos, en los que la solución nutritiva sobrante no se reutiliza, y sistemas cerrados, donde el excedente que drena de las raíces se recolecta y vuelve a incorporarse al sistema (Maucieri et al., 2018).

## 2.5 Acuaponia

La acuaponía es un sistema de producción de organismos acuáticos y plantas, donde al menos el 50% de los nutrientes que sustentan el crecimiento óptimo de las plantas proviene de las heces de los organismos acuáticos (Lennard & Goddek, 2019). La acuaponía es una alternativa agrícola que permite reciclar nutrientes y desechos, por lo que puede ayudar a abordar los objetivos de desarrollo sostenible para regiones áridas o con suelos no cultivables (Goddek & Körner, 2019). También es útil para aprovechar tierras marginales urbanas, acercando la producción de alimentos a los centros de consumo. La acuaponía, originalmente, estaba limitada a escala doméstica, sin embargo, ha evolucionado hacia la producción industrial, gracias a mejoras técnicas que aumentan su eficiencia (Goddek et al., 2019).

**Diseño del sistema acuapónico.** El principio de acuaponía combina tres tipos de organismos: (1) especies acuáticas, (2) comunidades bacterianas y (3) plantas, los cuales coexisten y se benefician mutuamente dentro de un sistema cerrado de recirculación de agua (Schmautz et al., 2016). En este sistema, el agua actúa como vehículo para transportar nutrientes, principalmente derivados de los desechos excretados por los peces. Las bacterias presentes, como *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*, transforman el amonio en nitrito y posteriormente en nitrato, que es aprovechado por las plantas para su desarrollo (Schmautz et al., 2016).

El diseño del sistema acuapónico incluye uno o varios tanques para peces, una unidad de filtrado que incluye sedimentadores o clarificadores, biofiltros o medios adecuados para el desarrollo de bacterias benéficas, y un módulo hidropónico destinado al cultivo vegetal. Todos estos componentes se interconectan mediante tuberías, formando un circuito cerrado de recirculación de agua (Palm et al, 2023).

Los tanques de peces (tamaño, número y diseño) se seleccionan dependiendo de la especie de pez a cultivar y la escala de producción. Los tanques deben diseñarse de manera que los sólidos que se depositan en el fondo puedan eliminarse fácilmente (Rakocy et al., 2006).

La unidad de filtrado incluye los sedimentadores que son los dispositivos más frecuentemente usados para la eliminación de los residuos sólidos (Danaher et al., 2013). Los biofiltros son otro componente esencial que convierte el nitrógeno amoniacal en nitrato mediante la oxidación microbiana (nitrificación) (Knaus & Palm, 2017). La unidad hidropónica es la parte del sistema donde se cultivan las plantas. Los subsistemas hidropónicos más utilizados son la cama de agregados, balsa flotante y NFT. (Palm et al., 2018).

**Subsistemas hidropónicos.** Los sistemas acuapónicos se clasifican según la tecnología aplicada al cultivo vegetal (Goddek et al., 2015):

1. Cama de agregados: Las plantas crecen sobre sustrato como grava, tezontle, arena, lana de roca etc. Requieren mucha mano de obra y mantenimiento por obstrucciones con residuos, por lo que su escala es limitada (Lennard & Leonard, 2006).
2. Cultivo de balsa flotante: Las plantas crecen sobre balsas flotantes en tanques, lo que actúa como biofiltro y estabiliza el sistema. Necesita menos mantenimiento y es más adecuado para sistemas pequeños o semicomerciales, aunque su uso a gran escala sigue siendo ineficiente por el alto consumo de agua, energía y mano de obra (Pattillo, 2017).
3. Técnica de Película de Nutrientes (NFT): Las plantas crecen en tubos con una capa delgada de agua rica en nutrientes. Se considera el sistema más eficiente, ya que permite cultivar en grandes superficies con bajo requerimiento de mano de obra, buena eficiencia hídrica y energética (Goda et al., 2015; Lennard & Leonard, 2006).

Sin embargo, no todas las plantas crecen bien en NFT, por lo que es necesario ajustar la elección del cultivo según el perfil nutricional aportado por la especie de pez. Además, la carga de partículas puede causar obstrucciones, por lo que se requiere filtración mecánica eficiente para que el NFT funcione correctamente, sobre todo en sistemas grandes (Palm et al., 2018).

**Especies de peces y plantas.** La tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) es la especie más común y exitosa en sistemas acuapónicos, debido a su tolerancia a malas condiciones de agua, rápida tasa de crecimiento y bajo requerimiento de oxígeno (Love et al., 2014). Otros peces usados incluyen bagres, carpas, truchas, lobina negra y peces ornamentales. Las especies ideales deben soportar altas densidades, sólidos suspendidos y niveles elevados de nitrógeno y fósforo (Rakocy et al., 2006; Timmons & Ebling, 2010).

Las hortalizas de hoja verde son las más cultivadas debido a su corto ciclo de crecimiento, baja exigencia nutricional y alta demanda mundial (Bailey & Ferrarezi, 2017). En contraste, los cultivos con flores y frutos tienen mayor valor económico, pero son más difíciles de manejar por sus mayores requerimientos de nutrientes, susceptibilidad a plagas y sus ciclos de crecimiento más largos (Rakocy, 2003). En la práctica, los productores comerciales cultivan principalmente albahaca, lechugas, tomates, col rizada, acelga, pak choi, pimientos y pepinos (Love et al., 2015).

**Origen de los nutrientes.** En los sistemas acuapónicos, las principales fuentes de nutrientes son el alimento para peces y el agua añadida, que aporta minerales como Mg, Ca y S (Delaide et al., 2017). Existen dos tipos principales de alimento para peces: a base de harina de pescado y a base de plantas (Geay et al., 2011). Aunque la harina de pescado es tradicional, su sostenibilidad ha sido cuestionada, promoviendo el uso de dietas vegetales; sin embargo, estas pueden afectar el crecimiento de los peces debido a su menor digestibilidad y la presencia de factores anti-nutricionales, como los fitatos, que limitan la disponibilidad de fósforo en especies como el salmón y la trucha (Timmons & Ebeling, 2013).

El alimento para peces contiene entre 6 a 8 macroingredientes, con un 6 a 8 % de nitrógeno, 1.2 % de fósforo y 40 a 45 % de carbono orgánico (Timmons & Ebeling, 2013). Su contenido proteico varía según el tipo de pez: 25 % para herbívoros u omnívoros y 55 % para carnívoros (Timmons & Ebeling, 2013). Los lípidos pueden ser de origen vegetal o animal. Del alimento aportado, parte es consumido por los peces y el resto se

excreta o se descompone en el sistema, liberando nutrientes al agua que las plantas pueden absorber directamente (Boyd, 2015).

**Nitrificación.** La principal fuente de nitrógeno en acuaponía es el alimento para peces, del cual solo el 30 % del nitrógeno es aprovechado; el resto se excreta principalmente como amoníaco a través de las branquias ( $\text{NH}_3$ ) o como orina y heces en forma de nitrógeno orgánico (Ru et al., 2017). Este amoníaco es transformado por bacterias nitrificantes en un proceso de dos etapas: primero en nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y luego en nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), compuesto menos tóxico y aprovechable por las plantas. Las bacterias responsables de este proceso incluyen bacterias oxidantes de amoníaco (AOB, como *Nitrosomonas*) y bacterias oxidantes de nitrito (NOB, como *Nitrobacter* y *Nitrospira*), esta última capaz de realizar ambas etapas) (Wongkiew et al., 2017).

La nitrificación requiere oxígeno disuelto y ocurre mayormente en los biofiltros (Losordo et al., 1998). Este proceso es crucial para evitar toxicidad por amoníaco ( $<0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) y nitrito ( $<1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), que afectan gravemente la salud de los peces, mientras que los nitratos son tolerados en concentraciones más altas (Timmons & Ebeling, 2013). Para iniciar un sistema acuapónico, se recomienda establecer primero la población de bacterias nitrificantes, ya sea operando sin peces al principio o usando inoculantes bacterianos. En sistemas sin biofiltro, las bacterias nitrificantes se desarrollan en biopelículas sobre superficies disponibles (Somerville et al., 2014).

### 2.5.1 Nutrimientos en solución acuapónica

El funcionamiento de los sistemas acuapónicos depende del equilibrio dinámico de los ciclos de nutrientes, por lo que es esencial monitorear y ajustar las concentraciones de macro y micronutrientes según las necesidades de las plantas en cada etapa de crecimiento (Delaide et al., 2017). Aunque el alimento para peces es la principal fuente de nutrientes, suele no ser suficiente para satisfacer los requerimientos vegetales (Seawright et al., 1998). Por eso, a menudo es necesario complementar con nutrientes minerales, ya sea en el agua o mediante aplicaciones foliares (Roosta, 2014).

Aunque el rendimiento en acuaponía puede igualar el de hidroponía, suelen observarse deficiencias en nutrimentos como K, P, Fe, Cu, Zn, Mn y Mo, mientras que otros como N, Ca, B y Na tienden a acumularse (Rakocy et al., 2006). La absorción de nutrimentos por parte de las plantas está influenciada por factores como la intensidad de luz, temperatura del aire y raíz, disponibilidad de nutrientes, fase de desarrollo y velocidad de crecimiento (Buzby & Lin, 2014). Diferentes diseños hidropónicos (cama de agregados, balsa, NFT) también afectan la absorción de nutrientes (Maucieri et al., 2018).

Los micronutrimentos como hierro (Fe), manganeso (Mn) y zinc (Zn) provienen principalmente del alimento para peces, mientras que el boro (B) y el cobre (Cu) se obtienen del agua corriente (Delaide et al., 2017). Aunque estos nutrientes están presentes en el sistema, suelen encontrarse en concentraciones insuficientes, por lo que es común la necesidad de suplementación externa (Delaide et al., 2017). Las deficiencias de hierro son frecuentes, debido a la baja disponibilidad del ion férrico. Para corregirlas, se puede usar hierro quelado químicamente o aprovechar sideróforos producidos por bacterias como *Bacillus* y *Pseudomonas*, que facilitan la disponibilidad de hierro (Bartelme et al., 2018).

## 2.6 LITERATURA CITADA

- Albareda, M., Dardanelli, M. S., Sousa, C., Megías, M., Temprano, F., & Rodríguez-Navarro, D. (2006). Factors affecting the attachment of rhizospheric bacteria to bean and soybean roots. *FEMS Microbiology Letters*, 259(1), 67-73. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2006.00244.x>
- Antar, M., Gopal, P., Msimbira, L. A., Naamala, J., Nazari, M., Overbeek, W., Backer, R., & Smith, D. L. (2021). Inter-organismal signaling in the rhizosphere. In: V. V. S. R., Gupta, & A. K. Sharma (Eds.), *Rhizosphere biology: interactions between microbes and plants* (pp.255-293). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-6125-2\\_13](https://doi.org/10.1007/978-981-15-6125-2_13)
- Babaloba, O. O. (2010). Beneficial bacteria of agricultural importance. *Biotechnology Letters*, 32(11), 1559-1570. <https://doi.org/10.1007/s10529-010-0347-0>
- Bailey, D. S., & Ferrarezi, R. S. (2017). Valuation of vegetable crops produced in the UVI commercial aquaponic system. *Aquaculture Reports*, 7, 77-82. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2017.06.002>
- Baixauli, S. C., & Aguilar, O. J. M. (2002). *Cultivo sin suelo de hortalizas*. Aspectos prácticos y experiencias. Generalitat Valenciana. <https://iviva.gva.es/documents/161862582/161863558/Cultivo+sin+suelo+de+hortalizas>
- Bartelme, R. P., Oyserman, B. O., Blom, J. E., Sepulveda-Villet, O. J., Newton, R. J. (2018). Stripping away the soil: Plant growth promoting microbiology opportunities in aquaponics. *Frontiers in Microbiology*, 9(8). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00008>
- Bashan, Y., de-Bashan, L. E., Prabhu, S. R., & Hernandez, J. P. (2014). Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: Formulations and practical perspectives (1998–2013). *Plant and Soil*, 378, 1–33. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1956-x>
- Beneduzi, A., Ambrosini, A., & Passaglia, L. M. P. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Their potential as antagonists and biocontrol agents. *Genetics and Molecular Biology*, 35(4), 1044-1051. <https://doi.org/10.1590/s1415-47572012000600020>

- Bhattacharyya, P., & Jha, D. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28, 1327-350. <https://doi.org/10.1007/s11274-011-0979-9>
- Bloemberg, G. V., & Lugtenberg, B. J. (2001). Molecular basis of plant growth promotion and biocontrol by rhizobacteria. *Current Opinion in Plant Biology*, 4(1), 343-350.
- Bordiec, S., Paquis, S., Lacroix, H., Dhondt, S., Ait Barka, E., Kauffmann, S., Jeandet, P., Mazeyrat-Gourbeyre, F., Clément, C., Baillieul, F., & Dorey, S. (2011). Comparative analysis of defence responses induced by the endophytic plant growth-promoting rhizobacterium *Burkholderia phytofirmans* strain PsJN and the non-host bacterium *Pseudomonas syringae* pv. *lisi* in grapevine cell suspensions. *Journal of Experimental Botany*, 62(2), 595–603. <https://doi.org/doi:10.1093/jxb/erq291>
- Boyd, C. E. (2015). Overview of aquaculture feeds: global impacts of ingredient use. *Feed and Feeding Practices in Aquaculture*, 3-25. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100506-4.00001-5>
- Buzby, K. M., Lin, L. S. (2014). Scaling aquaponic systems: Balancing plant uptake with fish output. *Aquacultural Engineering*, 63, 39-44. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.09.002>
- Caballero-Mellado, J., Martínez-Aguilar, L., Paredes-Valdez, G., & Estrada-de los Santos, P. (2004). *Burkholderia unamae* sp. nov., an N<sub>2</sub>-fixing rhizospheric and endophytic species. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 54(4), 1165–1172. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.02951-0>
- Camelo, R. M., Vera, M. S. P., & Bonilla, B. R. R. (2011). Mecanismos de acción de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 12(2), 159-166. <https://www.redalyc.org/pdf/4499/449945031010.pdf>
- Carrasco-Silva, G., & Sandoval-Briones, C. (2016). *Manual práctico del cultivo de la lechuga*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Damam, M., Kaloori, K., Gaddam, B., & Kausar, R. (2016). Plant growth promoting substances (phytohormones) produced by rhizobacterial strains isolated from the rhizosphere of medicinal plants. *International Journal of Pharmaceutical Sciences*

- Danaher, J. J., Shultz, R. C., Rakocy, J. E., & Bailey, D. S. (2013). Alternative solids removal for warm water recirculating raft aquaponic systems. *Journal of the World Aquaculture Society*, 44(3), 374-383. <https://doi.org/10.1111/jwas.12040>
- Delaide, B., Delhaye, G., Dermience, M., Gott, J., Soyeurt, H., & Jijakli, M. H. (2017). Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF Box, a small-scale aquaponic system. *Aquacultural Engineering*, 78, Part B, 130-139. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.06.002>
- Elnahal, A. S. M., El-Saadony, M. T., Saad, A. M., Desoky, E. M., El-Tahan, A. M., Rady, M. M., AbuQamar, S. F., & El-Tarabily, K. A. (2022). Correction: the use of microbial inoculants for biological control, plant growth promotion, and sustainable agriculture: A review. *European Journal of Plant Pathology*, 162, 1007. <https://doi.org/10.1007/s10658-022-02472-3>
- Fernandez-Aunion, C., Hamouda, T. B., Iglesias-Guerra, F., Argandona, M., Reina-Bueno, M., Nieto, J. J., Aouani, M. E., Vargas, C. (2010). Biosynthesis of compatible solutes in rhizobial strains isolated from *Phaseolus vulgaris* nodules in Tunisian fields. *BMC Microbiology*, 10, 192. <https://doi.org/10.1186/1471-2180-10-192>
- Fouzia, A., Allaoua, S., Hafsa, C., & Mostefa, G. (2015). Plant growth promoting and antagonistic traits of indigenous fluorescent *Pseudomonas* spp. isolated from wheat rhizosphere and *A. halimus* endosphere. *European Scientific Journal*, 11(24), 129–148. <https://eujournal.org/index.php/esj/article/view/6104>
- Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012, Article 963401. <https://doi.org/10.6064/2012/963401>
- Glick, B. R. (2015). *Beneficial plant-bacterial interactions*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-13921-0>
- Goda, A. M. A., Essa, M. A., Hassaan, M. S., & Sharawy, Z. (2015). Bio-economic features for aquaponic systems in Egypt. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 15, 525-532. <https://doi.org/10.4194/1303-2712-v15>

- Goddek, S., & Körner, O. (2019). A fully integrated simulation model of multi-loop aquaponics: a case study for system sizing in different environments. *Agricultural Systems*, 171, 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.01.010>
- Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K.V., Jijakli, H., & Thorarinsdottir, R. (2015). Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustainability*, 7(4), 4199–4224. <https://doi.org/10.3390/su7044199>
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., Dos-Santos, M. (2019). Aquaponics and Global Food Challenges. In: S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, G. M. Burnell. (Eds.) *Aquaponics Food Production Systems*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_1)
- Hasan, A., Tabassum, B., Hashim, M., & Khan, N. (2024). Role of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) as a plant growth enhancer for sustainable agriculture: a Review. *Bacteria*, 3(2), 59–75. <https://doi.org/10.3390/bacteria3020005>
- Holguin, G., Patten, C. L., & Glick, B. R. (1999). Genetics and molecular biology of *Azospirillum*. *Biofertilizers and Fertility of Soils*, 29, 10–23. <https://doi.org/10.1007/s003740050519>
- Hussain, A., Iqbal, K., Aziem, S., Mahato, P., & Negi, A. K. (2014). A review on the science of growing crops without soil (soilless culture)-a novel alternative for growing crops. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 7(11), 833–842. <http://ijagcs.com/wp-content/uploads/2014/08/833-842.pdf>
- Intorne, A. C., De Oliveira, M. V. V., Lima, M. L., Da Silva, J. F., Olivares, F. L., & De Souza Filho, G. A. (2009). Identification and characterization of *Gluconacetobacter diazotrophicus* mutants defective in the solubilization of phosphorus and zinc. *Archives of Microbiology*, 191, 477–483. <https://doi.org/10.1007/s00203-009-0472-0>
- Jones, J.B., (1997). *Hydroponics: A practical guide for the soilless grower*. CRC Press.
- Khan, A. A., Jilani, G., Akhtar, M. S., Naqvi, S. M. S., & Rasheed, M. (2009). Phosphorus solubilizing bacteria: occurrence, mechanisms and their role in crop production. *Journal of Agricultural and Biological Science*, 1, 48–58.
- Kim, M. J., Moon, Y., Tou, J. C., Mou, B., & Waterland, N. L. (2016). Nutritional value, bioactive compounds and health benefits of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of*

- Food Composition and Analysis*, 49, 19-34.  
<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2016.03.004>
- Knaus, U., & Palm, H. W. (2017). Effects of fish biology on ebb and flow aquaponical cultured herbs in northern Germany (Mecklenburg Western Pomerania). *Aquaculture*, 466, 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.09.025>
- Kumar, H., Bajpai, V. K., & Dubey, R. C., Maheshwari, D. K. & Kang, S. C. (2010). Wilt disease management and enhancement of growth and yield of *Cajanus cajan* (L.) var. Manak by bacterial combinations amended with chemical fertilizer. *Crop Protection*, 29(6), 591–598. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.01.002>
- Lennard, W. A., & Leonard, B. V. (2006). A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an aquaponic test system. *Aquaculture International*, 14, 539-550. <https://doi.org/10.1007/s10499-006-9053-2>
- Lennard, W., & Goddek, S. (2019). Aquaponics: The basics. In S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, & G. M. Burnell (Eds.), *Aquaponics food production systems* (pp. 113-143). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_5)
- Losordo, T. M., Masser, M. P., & Rakocy, J. (1998). Recirculating aquaculture tank production systems: an overview of critical considerations. *Southern Regional Aquaculture Center*, 451, 18-31. [https://shellfish.ifas.ufl.edu/wp-content/uploads/Handout-1\\_SRAC\\_0451\\_Overview-of-critical-considerations\\_Recirculating-Aquaculture-Systems.pdf](https://shellfish.ifas.ufl.edu/wp-content/uploads/Handout-1_SRAC_0451_Overview-of-critical-considerations_Recirculating-Aquaculture-Systems.pdf)
- Love, D. C., Fry, J. P., Li, X., Hill, E. S., Genello, L., Semmens, K., & Thompson, R. E. (2015). Commercial aquaponics production and profitability: findings from an international survey. *Aquaculture*, 435, 67-74. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.09.023>
- Love, D. C., Fry, J. P., Genello, L., Hill, E. S., Frederick, J. A., Li, X., & Semmens. K. (2014). An international survey of aquaponics practitioners. *PLoS One*, 9, 1-10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102662>
- Lugtenberg, B., & Kamilova, F. (2009). Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annual Review of Microbiology*, 63, 541-556. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.62.081307.162918>

- Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmautz, Z., Sambo, P., & Borin, M. (2018). Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy*, 13(1012), 1-11. <https://doi.org/10.4081/ija.2017.1012>
- Molina-Romero, D., Báez, A., Quintero-Hernández, V., Castañeda-Lucio, M., Fuentes-Ramírez, L. E., Bustillos-Cristales, M. R., Rodríguez-Andrade, O., Morales-García, Y. E., Munive, A., & Muñoz-Rojas, J. (2017). Compatible bacterial mixture, tolerant to desiccation, improves maize plant growth. *PLoS ONE*, 12(11), Article e0187913. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187913>
- Molina-Romero, D., Bustillos-Cristales, M. R., Rodríguez-Andrade, O., Morales-García, Y. E., Santiago-Saenz, Y., Castañeda-Lucio, M., & Muñoz-Rojas, J. (2015). Mecanismos de fitoestimulación por rizobacterias, aislamientos en América y potencial biotecnológico. *Biológicas*, 17(2), 24–34. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0187913>
- Muñoz-Rojas, J., & Caballero-Mellado, J. (2003). Population dynamics of *Gluconacetobacter diazotrophicus* in sugarcane cultivars and its effect on plant growth. *Microbial Ecology*, 46, 454-464. <https://doi.org/10.1007/s00248-003-0110-3>
- Onofre-Lemus, J., Hernández-Lucas, I., Girard, L., & Caballero-Mellado, J. (2009). ACC (1-aminocyclopropane-1-carboxylate) deaminase activity, a widespread trait in Burkholderia species, and its growth-promoting effect on tomato plants. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(20), 6581-6590. <https://doi.org/10.1128/AEM.01240-09>
- Palm, H. W., Knaus, U., & Kotzen, B. (2023). Aquaponics nomenclature matters: It is about principles and technologies and not as much about coupling. *Reviews in Aquaculture*, 16(1), 473-490. <https://doi.org/10.1111/raq.12847>
- Palm, H. W., Knaus, U., Appelbaum, S., Goddek, S., Strauch, S. M., Vermeulen, T., Jijakli, M. H., & Kotzen, B. (2018). Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. *Aquaculture international*, 26, 813-842. <https://doi.org/10.1007/s10499-018-0249-z>

- Pattillo, D. A. (2017). An overview of aquaponic systems: Hydroponic components. *NRAC Technical Bulletin Series*, 19, 1-10. [https://www.ncrac.org/files/inline-files/hyroponic\\_components.pdf](https://www.ncrac.org/files/inline-files/hyroponic_components.pdf)
- Poupin, M. J., Timmermann, T., Vega, A., Zuñiga, A., & González, B. (2013). Effects of the plant growth-promoting bacterium *Burkholderia phytofirmans* PsJN throughout the life cycle of *Arabidopsis thaliana*. *PLoS ONE*, 8(7), Article e69435. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0069435>
- Rakocy, J. E. (2003). Aquaponics-Integrating fish and plant culture. In J. H. Tidwell (Ed.), *Aquaculture production systems* (pp. 343-386). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781118250105.ch14>
- Rakocy, J. E., Masser, M. P., & Losordo, T. M. (2006). *Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics-Integrating fish and plant culture* (Revision). SRAC Publication No. 454. <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/recirculating-aquaculture-tank-production-systems-aquaponics-integrating-fish-and-plant-culture.html>
- Ramamoorthy, V., Visawanathan, R., Raguchander, T., Prakasam, V., & Samiyappan, R. (2001). Induction of systemic resistance by plant growth promoting rhizobacteria in crop plants against pests and diseases. *Crop Protection*, 20(1), 1-11. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(00\)00056-9](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(00)00056-9)
- Rincón, S. L. F. (2008). *La fertirrigación de la lechuga*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Rodríguez, H., Fraga, R., Gonzalez, T., & Bashan, Y. (2006). Genetics of phosphate solubilization and its potential applications for improving plant growth-promoting bacteria. *Plant Soil* 287, 15–21. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9056-9>
- Roosta, H.R. (2014). Effects of foliar spray of K on mint, radish, parsley and coriander plants in aquaponic system. *Journal of Plant Nutrition*, 37, 2236-2254. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.920385>
- Ru, D., Liu, J., Hu, Z., Zou, Y., Jiang, L., Cheng, X., & Lv, Z. (2017). Improvement of aquaponic performance through micro- and macro-nutrient addition. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(19), 16328-16335. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9273-1>

- Santoyo, G., Urtis-Flores, C. A., Loeza-Lara, P. D., Orozco-Mosqueda, M. C., & Glick, B. R. (2021). Rhizosphere colonization determinants by plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR). *Biology*, 10(6), Article 475. <https://doi.org/10.3390/biology10060475>
- Schmautz, Z., Loeu, F., Liebisch, F., Graber, A., Mathis, A., Bulc, T. G., & Junge, R. (2016). Tomato productivity and quality in aquaponics: Comparison of three hydroponic methods. *Water*, 8, Article 533. <https://doi.org/10.3390/w8110533>
- Seawright, D., Stickney, R. R., & Walker, R. B. (1998). Nutrient dynamics in integrated aquaculture-hydroponics systems. *Aquaculture*, 160(3-4), 215-237. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(97\)00168-3](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00168-3)
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2024). Panorama Agroalimentario, México. [https://nube.siap.gob.mx/gobmx\\_publicaciones\\_siap/](https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/)
- Sharma, N., Acharya, S., Kumar, K., Singh, N., & Chaurasia, O. P. (2018). Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. *Journal of Soil and Water Conservation*, 17(4), 364-371. <https://doi.org/10.5958/2455-7145.2018.00056.5>
- Shatilov, M. V., Razin, A. F., & Ivanova, M. I. (2019). Analysis of the world lettuce market. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 395, Article 012053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/395/1/012053>
- Somerville, C., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). *Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i4021e>
- Someya, N., Ikeda, S., & Tsuchiya, K. (2013). *Pseudomonas* inoculants as agents for plant disease management. In D. Maheshwari (Ed.), *Bacteria in Agrobiolgy: Disease Management* (pp. 185-204). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-33639-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-33639-3_8)
- Stearns, J. C., Woody, O. Z., McConkey, B. J., Glick, B. R. (2012). Effects of bacterial ACC deaminase on *Brassica napus* gene expression. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 25(5), 668-676. <https://doi.org/10.1094/MPMI-08-11-0213>

- Stephens, J. H. G., & Rask, H. M. (2000). Inoculant production and formulation. *Field Crops Research*, 65(2–3), 249-258. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00090-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00090-8)
- Thomloui, E. E., Tsalgaidou, P. C., Douka, D., Spantidos, T. N., Dimou, M., Venieraki, A., & Katinakis, P. (2019). Multistrain versus single-strain plant growth-promoting microbial inoculants-The compatibility issue. *Hellenic Plant Protection Journal*, 12, 61-77. <https://doi.org/10.2478/hppj-2019-0007>
- Timmons, M. B., & Ebeling, J. M. (2013). *Recirculating aquaculture*. Ithaca Publishing.
- Timmons, M. B., & Ebeling, J. M. (2010). *Recirculating Aquaculture* (2nd ed.). Ithaca Publishing.
- Van Loon, L. C. (2007). Plant responses to plant growth-promoting rhizobacteria. *European Journal of Plant Pathology*, 119, 243-254. <https://doi.org/10.1007/s10658-007-9165-1>
- Van Loon, L. C., Bakker, P. A. H. M., & Pieterse, C. M. J. (1998). Systemic resistance induced by rhizosphere bacteria. *Annual Review of Phytopathology*, 36, 453–483. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.36.1.453>
- Vivanco-Calixto, R., Molina-Romero, D., Morales-García, Y. E., Quintero-Hernández, V., Munive-Hernández, A., Báez-Rogelio, A., y Muñoz-Rojas, J. (2016). Reto agrobiotecnológico: inoculantes bacterianos de segunda generación. *Alianzas y Tendencias BUAP*, 1(1): 9-19. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5069043>
- Vyas, P., & Gulati, A. (2009). Organic acid production in vitro and plant growth promotion in maize under controlled environment by phosphate-solubilizing fluorescent *Pseudomonas*. *BMC Microbiology*, 9, 174. <https://doi.org/10.1186/1471-2180-9-174>
- Wongkiew, S., Hu, Z., Chandran, K., Lee, J. W., & Khanal, S. K. (2017). Nitrogen transformations in aquaponic systems: a review. *Aquacultural Engineering*, 76, 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.01.004>
- York, H. P., Cheng, H. P., Pellock, B., Lecour, L., Campbell, G., & Walker, G. (1997). Role of exopolysaccharides in nodule invasion by *Rhizobium meliloti*. In C. Elmerich, A. Kondorosi & W. E. Newton (Eds.), *Biological Nitrogen Fixation for the 21st Century* (pp. 193-198). Springer.

### CAPITULO 3. INOCULACIÓN DE SEMILLAS Y PLÁNTULAS DE LECHUGA CON UN CONSORCIO BACTERIANO PROMOTOR DEL CRECIMIENTO

Hilda Elín Pérez-Ponce<sup>1</sup>, Joel Pineda-Pineda<sup>2\*</sup>, Juan Enrique Rodríguez-Pérez<sup>1</sup>,  
Antonino Báez-Rogelio<sup>3</sup>, Rogelio Castro-Brindis<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Departamento de Fitotecnia, Instituto de Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO.

<sup>2</sup>Departamento de Suelos, Instituto de Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO.

<sup>3</sup>Instituto de Ciencias. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Estado de Puebla, C. P. 72570, MÉXICO.

#### RESUMEN

El uso de rizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas (PGPR) incrementa significativamente el crecimiento y rendimiento en diferentes cultivos agrícolas. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la inoculación de un consorcio bacteriano sobre semillas comerciales peletizadas y plántulas de lechuga *Lactuca sativa* cv. Ruby Sky, para determinar su influencia sobre el porcentaje de emergencia, crecimiento y concentración de nutrimentos en tejido foliar. El consorcio bacteriano estuvo conformado por *Azospirillum brasilense* Sp7, *Bradyrhizobium* sp MS22, *Burkholderia unamae* MT1641T, *Gluconacetobacter diazotrophicus* PA15T, *Pseudomonas putida* KT2440 y *Sphingomonas* sp. OF178. Se evaluaron cinco tratamientos con cinco repeticiones, que incluyeron inoculación a semilla, plántula o a ambos, además de un testigo (sin inocular semilla y plántula); los tiempos de inoculación de la plántula fueron a los 7 y/o 15 días después de la siembra (dds). Las semillas fueron sembradas en charolas de plástico y acomodadas en un diseño de bloques completamente al azar. Los caracteres de crecimiento evaluados fueron: diámetro de tallo, altura de planta, longitud de raíz, área foliar, peso fresco y seco de parte aérea y raíz. Se encontraron diferencias significativas en la emergencia y caracteres de crecimiento: la inoculación a la semilla disminuyó significativamente el porcentaje de emergencia (24 %), la altura de planta (20.2 %) y la longitud de raíz (18.6%). La concentración de nutrimentos en hoja (N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Zn y Mn) no presentó diferencias significativas. Las bacterias del consorcio influyeron negativamente en la emergencia y crecimiento de plántulas.

**Palabras clave:** PGPR, semillas peletizadas, plántula, emergencia, nutrimentos.

## INTRODUCCIÓN

Las rizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas (PGPR) son bacterias benéficas capaces de habitar en la rizósfera, mejoran la tasa de crecimiento, la absorción y utilización de los nutrientes minerales, al tiempo que establecen asociaciones simbióticas con las raíces de las plantas. Estas bacterias pertenecen a diversos géneros como *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Streptomyces*, *Burkholderia*, *Azospirillum*, *Rhizobium*, *Acetobacter*, *Enterobacter*, *Clostridium*, *Azotobacter*, entre otros (Bashan, Puente, de-Bashan y Hernández, 2008; Glick, 2012).

Los mecanismos que promueven el crecimiento pueden ser directos o indirectos. Los mecanismos directos son aquellos donde la bacteria influye positivamente estimulando la fijación de nitrógeno atmosférico, solubilización de fósforo, producción de sideróforos, así como la síntesis y excreción de fitohormonas, lo que promueve un aumento en el rendimiento y calidad de las plantas; también influyen en la disponibilidad y absorción de nutrientes en la zona de rizósfera (Das et al., 2022; Tahir y Sarwar, 2013).

Los mecanismos indirectos mejoran la salud de las plantas al sintetizar antibióticos e inhibir organismos fitopatógenos, alivian el estrés abiótico, cambian la microbiota de la rizósfera, disminuyen las enfermedades y el estrés de las plantas por lo que aumenta su resiliencia a las condiciones ambientales (Das et al., 2022; Kong y Liu, 2022).

Debido a estas propiedades, las PGPR han sido utilizadas para formular inoculantes comerciales de una sola especie para promover el crecimiento y la producción de los cultivos, y para controlar enfermedades (Bashan, 1998; Bashan, de-Bashan, Prabhu y Hernández, 2014; Supratim, Rabara y Negi, 2017). Sin embargo, se han desarrollado formulaciones complejas que contienen múltiples cepas que poseen diferentes capacidades y más de una función, lo que puede mejorar la capacidad de una comunidad bacteriana para promover el crecimiento de las plantas (Thomloudi et al., 2019). Estos consorcios bacterianos ofrecen al agricultor un aumento en el rendimiento de sus cultivos,

lo que podría implicar ventajas económicas, debido a que estos microorganismos pueden sustituir y/o complementar el uso de agroquímicos, particularmente fertilizantes minerales y pesticidas, lo que conduce a prácticas agrícolas sustentables (Vivanco-Calixto et al., 2016; Nagrale et al., 2023).

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es una hortaliza cultivada y consumida en todo el mundo (Kim, Moon, Tou, Mou y Waterland, 2016). México ocupa el noveno lugar a nivel mundial con una producción de 552,940 toneladas de lechuga al año (SIAP, 2023). Esta hortaliza es apreciada por su sabor, alto contenido de agua y valor nutricional; además de ser considerada un organismo modelo en la investigación debido a su ciclo corto (Guo et al., 2003, Pineda-Pineda et al., 2018). El uso de PGPR en hortalizas como la lechuga han mostrado incremento significativo en longitud y peso de la raíz, área foliar, altura y peso seco de la parte aérea en plántulas de lechuga var. Vera (Menezes, Kusdra y Moreno, 2024), var. Sagess (Vio et al., 2023), var. Capitata (Iparraguirre et al., 2020), var. Meraviglia d'inverno (Vetrano et al., 2020) y tipo Salinas (Mangmang, Deaker y Rogers, 2015).

El objetivo de esta investigación fue evaluar la inoculación de un consorcio bacteriano sobre semillas comerciales peletizadas y plántulas de lechuga *Lactuca sativa* var. Ruby Sky, para determinar su influencia sobre la emergencia, el crecimiento y la concentración de nutrimentos en el tejido foliar.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **UBICACIÓN**

El experimento se llevó a cabo de mayo a junio del año 2023 en un invernadero ubicado en el campo experimental del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco de Mora, Estado de México (19°29'23" N, 98°52'26" W y 2,265 msnm). La temperatura promedio máxima y mínima dentro del invernadero fue 42.2 °C y 8.6 °C, respectivamente.

## CONSORCIO BACTERIANO

Se evaluó el efecto de un consorcio bacteriano (EMMIM-1, Patente MX340596B-2016) conformado por *Pseudomonas putida* KT2440, *Sphingomonas* sp. OF178, *Bradyrhizobium* sp. MS22, *Burkholderia unamae* MT16451T, *Gluconacetobacter diazotrophicus* PAI5T y *Azospirillum brasilense* Sp7. El consorcio fue proporcionado por el laboratorio Producción de Biológicos 417 del Centro de Investigaciones en Ciencias Microbiológicas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. La concentración de bacterias en el consorcio fue de  $1 \times 10^8$  UFC·mL<sup>-1</sup>.

## DISEÑO DE TRATAMIENTOS

El consorcio bacteriano se evaluó en semillas comerciales peletizadas (Itsco-agro®) y plántulas de lechuga *Lactuca sativa* cv. Ruby Sky (Cuadro 1). tipo batavia, jaspeada roja, resistente al espigado y adaptada a diferentes condiciones climáticas.

Las semillas fueron inoculadas mediante inmersión durante 10 minutos en el inoculante sin diluir, mientras que las semillas no inoculadas fueron remojadas en agua destilada y posteriormente colocadas en charolas de plástico de 128 cavidades con vermiculita como sustrato.

La inoculación de las plántulas se llevó a cabo a los 7 y 15 días después de la siembra (dds) según el tratamiento (Cuadro 1). La inoculación se realizó por inmersión de la charola durante 10 minutos en una tina de plástico de dimensiones de 57 cm x 36.5 cm y 7 cm de altura que contenía 60 mL de inoculante en 6 L de agua. Esta solución fue renovada para cada tratamiento. Las plántulas fueron irrigadas con la solución nutritiva propuesta por Steiner (1961) al 25% dos veces al día.

Cuadro 1. Tratamientos de inoculación en semillas y plántulas de lechuga *Lactuca sativa* cv. Ruby Sky.

| Tratamiento | Inoculación de semilla | Inoculación a plántula (dds) |
|-------------|------------------------|------------------------------|
| 1           | No (testigo)           | No                           |
| 2           | No                     | 15                           |
| 3           | No                     | 7 y 15                       |
| 4           | Si                     | No                           |
| 5           | Si                     | 15                           |

dds: días después de la siembra.

## UNIDAD Y DISEÑO EXPERIMENTAL

La unidad experimental (UE) consistió en 128 semillas sembradas en una charola de plástico establecidas en el invernadero en un diseño de bloques completamente al azar con cinco repeticiones.

## CARACTERES EVALUADOS

Se determinó el porcentaje de emergencia (%) a los 10 dds. A los 14, 21 y 28 dds se colectaron 4 plántulas de cada UE para evaluar los siguientes caracteres de crecimiento: diámetro de tallo (DT, cm), altura de planta (AP, cm), peso fresco de parte aérea (PFPA, g), longitud de raíz (LR, cm), peso fresco de raíz (PFR, g), peso seco de parte aérea (PSPA, g) y peso seco de raíz (PSR, g). La parte aérea y la raíz fueron secados a 65 °C durante 72 h en un horno de secado por convección marca Binder 108 modelo ED400. El área foliar (AF, cm<sup>2</sup>) fue determinada a los 28 dds mediante el uso de un integrador de área foliar LI-3000A (LI-COR, Inc. Lincoln, NE). El contenido de clorofila fue estimado usando un medidor portátil (SPAD-502, Konica Minolta Sensing, INC. Japan) a los 28 dds.

La concentración de nutrimentos (N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Zn y Mn) en tejido foliar se determinó al final del experimento (28 dds). Se colectó la parte aérea de 4 plántulas de cada UE. Cada plántula fue colocada en una bolsa de papel y secada en un horno de secado por convección a 65 °C durante 72 h. Posteriormente las muestras se trituraron en un molino de acero inoxidable marca Thomas Wiley Mill modelo ED-5. El material

pulverizado fue sometido a digestión húmeda en medio ácido (relación ácido sulfúrico: perclórico 4:1) para determinar el contenido de N, P, K, Ca, Mg y Na expresados en porcentaje y Fe, Cu, Zn y Mn, expresados en  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . El N se determinó por el método micro-Kjeldahl de destilación simple (Jones, Wolf & Mills, 1991), el P mediante el método de desarrollo de color vanadato-molibdato (Jackson, 1964) a una absorbancia de 420 nm en un espectrofotómetro marca Thermo Scientific modelo Genesys 10uv. El K, Ca y Na se cuantificaron en un flamómetro marca Sherwood modelo 410. El Mg, Fe, Cu, Zn y Mn fueron determinados con un espectrofotómetro de absorción atómica marca GBC modelo Avanta.

La adhesión de las bacterias del consorcio a la semilla peletizada se determinó 24 horas después de la siembra, 3 semillas de cada tratamiento fueron extraídas de la vermiculita y cada una se colocó en 1 mL de agua destilada estéril dentro de un tubo eppendorf de 1.5 mL. Cada tubo fue agitado vigorosamente con un vortex, con la suspensión resultante se realizaron diluciones seriadas (1:10) para la cuantificación de bacterias mediante el método de goteo en placa (drop plate) (Herigstad et al., 2001). Se utilizaron medios de selección para cada bacteria (Muñoz-Rojas et al., 2019) y las placas fueron incubadas a 30 °C, hasta que las cepas alcanzaron su crecimiento máximo, durante 48 h para *A. brasilense* y *G. diazotrophicus* y durante 24 h para *P. putida*, *Sphingomonas sp*, *B. unamae* y *Bradyrhizobium sp*. Posteriormente, se cuantificó el número de unidades formadoras de colonias (UFC) presentes.

La colonización de bacterias en raíz se evaluó al momento del trasplante (28 dds). Se tomaron 3 plántulas de cada uno de los 5 tratamientos de inoculación, se removió la vermiculita y cada raíz fue colocada en un tubo cónico con 20 mL de agua destilada estéril. La cuantificación de bacterias se realizó con el mismo método con el que se cuantificó la adhesión de bacterias.

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos obtenidos fueron analizados con el programa SAS® OnDemand for Academics. Se realizó la prueba de Kruskal-Wallis ( $P \leq 0.05$ ) y la comparación múltiple de rangos para el porcentaje de emergencia. Los caracteres de crecimiento y la concentración de nutrimentos fueron sometidos a un análisis de varianza y comparación de medias mediante la prueba Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Para los caracteres de crecimiento DT, PFPA, AP, PFR, LR, MSPA y MSR (a los 14, 21 y 28 dds) se realizó un análisis de regresión no lineal con el modelo exponencial para cada tratamiento:

$$E(CC) = Be^{-Cx}$$

Donde:  $CC$  = caracter de crecimiento;  $x$  = días después del trasplante;  $B$  = Parámetro asociado a la ordenada al origen;  $C$  = Parámetro relacionado con la velocidad de crecimiento del caracter;  $e$  = Base de logaritmo natural ( $e = 2.718281828$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### EMERGENCIA

El análisis de Kruskal-Wallis para el porcentaje de emergencia indicó diferencias ( $P \leq 0.01$ ) entre tratamientos. La comparación múltiple de rangos (Cuadro 2) mostró que el mayor porcentaje de emergencia ocurrió en los tratamientos con semilla no inoculada, mientras que la inoculación de la semilla redujo ( $P \leq 0.05$ ) el porcentaje de emergencia 25 %. Debido a que el porcentaje de germinación se correlaciona positivamente con el porcentaje de emergencia (Rashi y Kaushik, 2024; Ishiaku et al., 2020), es posible que el consorcio bacteriano haya tenido un efecto negativo sobre la germinación en el cultivar de lechuga evaluado

Semillas de lechuga var. Longifolia inoculadas con *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas cepacia* y *Enterobacter cloacae* redujeron el porcentaje de germinación 28.5 %, 7 % y 14.2 %, respectivamente; mientras que *Azospirillum brasilense* lo incrementó hasta 50.2 % (Díaz-Vargas, Ferrera-Cerrato, Almaraz-Suarez y Alcántar-González, 2001). Se ha demostrado que la inoculación de semillas puede mejorar la

germinación, la supervivencia y la tasa de crecimiento (Murty y Ladha, 1988), debido a que las PGPR liberan fitohormonas y optimizan la movilización de nutrientes desde la semilla. Un consorcio compuesto por *P. putida*, *Sphingomonas*, *A. brasilense* y *Acinetobacter sp.* fue probado en variedades criollas de maíz, donde se observó aumento en el porcentaje de germinación (Morales-García et al., 2019); en contraste, cuando un consorcio conformado por *P. putida*, *Sphingomonas*, *A. brasilense*, *Bradyrhizobium*, *B. unamae* y *G. diazotrophicus* fue evaluado en cacahuate criollo no se obtuvo un efecto positivo y la germinación disminuyó 21% (de Jesús-Ramos, Baez, Molina-Romero, Muñoz-Rojas y Morales-García, 2020), resultado similar al observado en esta investigación.

Cuadro 2. Comparaciones múltiples de rangos para el porcentaje de emergencia en semillas inoculadas y no inoculadas de lechuga *Lactuca sativa* cv. Ruby Sky.

| Tratamiento | Inoculación de semilla | Inoculación a plántula (dds) | Emergencia (%)<br>10 dds |
|-------------|------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 2           | No                     | 15                           | 97.7 a                   |
| 3           | No                     | 7 y 15                       | 96.1 a                   |
| 1           | No                     | No                           | 95.9 a                   |
| 4           | Si                     | No                           | 72.3 b                   |
| 5           | Si                     | 15                           | 66.4 b                   |
| DMS         |                        |                              | 5.11                     |

DMS: Diferencia mínima significativa. Los valores en columna corresponden a la media del porcentaje de emergencia. Medias con letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Kruskal-Wallis,  $P \leq 0.05$ ).

En el presente estudio se comprobó que los microorganismos que integran el consorcio fueron capaces de adherirse a las semillas peletizadas, con concentraciones del orden  $10^3$  UFC·semilla<sup>-1</sup> para *Bradyrhizobium sp* y del orden  $10^4$  para el resto de las bacterias (Cuadro 3). Sin embargo, los efectos de la inoculación dependen también de la variedad y genotipo de la planta, de las PGPR empleadas, así como de las condiciones ambientales y del medio de cultivo (Muñoz-Rojas & Caballero-Mellado, 2001). En este caso, las semillas comerciales utilizadas estaban peletizadas y contenían antifúngicos y bactericidas, condición que pudo influir en los resultados, ya que se ha demostrado que los peletizados con estas sustancias pueden actuar como agentes antagonistas e

impactar negativamente la diversidad y actividad de los microorganismos (Rozhkova et al., 2021).

Cuadro 3. Adhesión de bacterias a las semillas de lechuga *Lactuca sativa* cv. Ruby Sky inoculadas con el consorcio bacteriano.

| Cepa                                          | UFC·semilla <sup>-1</sup> | Log UFC·semilla <sup>-1</sup> |
|-----------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| <i>Bradyrhizobium</i> sp. MS22                | 1.44 x 10 <sup>3</sup>    | 3.159                         |
| <i>Burkholderia unamae</i> MTI641T            | 5.60 x 10 <sup>4</sup>    | 4.748                         |
| <i>Azospirillum brasilense</i> Sp7            | 5.77 x 10 <sup>4</sup>    | 4.762                         |
| <i>Gluconacetobacter diazotrophicus</i> PAI5T | 1.71 x 10 <sup>4</sup>    | 4.233                         |
| <i>Sphingomonas</i> sp. OF178                 | 1.96 x 10 <sup>4</sup>    | 4.292                         |
| <i>Pseudomonas putida</i> KT2440              | 1.14 x 10 <sup>4</sup>    | 4.059                         |

UFC: Unidades formadoras de colonias; Log: Logaritmo base 10.

## CRECIMIENTO DE PLÁNTULA

El análisis de varianza (Cuadro 4) mostró diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ) en el crecimiento de las plántulas de lechuga durante su desarrollo. A los 28 dds, estas diferencias fueron encontradas en la altura de plántula y longitud de raíz.

Cuadro 4. Cuadrados medios del análisis de varianza de los caracteres de crecimiento y desarrollo de plántulas inoculadas y no inoculadas de lechuga *Lactuca sativa* cv. Ruby Sky a los 28 dds.

| FV     | GL | DT<br>(cm) | PFFA<br>(g) | AP<br>(cm) | LR<br>(cm) | MSPA<br>(g) | MSR<br>(g) | PFR<br>(g) | AF<br>(cm <sup>2</sup> ) |
|--------|----|------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|--------------------------|
| TRA    | 4  | 0.36       | 0.51        | 13.58**    | 14.31**    | 0.0006      | 0.0001     | 0.0281     | 437.35                   |
| BLO    | 4  | 0.72       | 1.14        | 2.79       | 6.16       | 0.0038      | 0.0004     | 0.1692     | 482.32                   |
| ERROR  | 16 | 0.28       | 1.11        | 3.27       | 3.29       | 0.0036      | 0.0003     | 0.1490     | 980.00                   |
| CV (%) |    | 16.44      | 23.86       | 7.57       | 14.41      | 27.13       | 45.56      | 39.08      | 25.25                    |
| MEDIA  |    | 2.07       | 1.89        | 8.74       | 10.60      | 0.10        | 0.02       | 0.53       | 52.72                    |

FV: fuente de variación, GL: grados de libertad, TRA: tratamientos, BLO: bloque, CV: coeficiente de variación; dds: días después de la siembra, DT: diámetro de tallo, PFFA: peso fresco de parte aérea, AP: altura de la planta, LR: longitud de raíz, MSPA: materia seca de parte aérea, MSR: materia seca de raíz, PFR: peso fresco de raíz, AF: área foliar, \*\*: Significativo con  $P \leq 0.01$ .

De acuerdo con las comparaciones de medias (Cuadro 5), a los 28 dds la altura de la plántula disminuyó 20.2 % cuando la semilla y la plántula (15 dds) fueron inoculadas (tratamiento 5); mientras que la longitud de raíz disminuyó 15.6 % cuando la semilla fue inoculada (tratamiento 4). La tasa de crecimiento de los caracteres DT, PFPA, AP, PFR, LR, MSPA y MSR en tres mediciones (7, 14, 21 dds) y ajustados a un modelo exponencial no mostraron diferencias estadísticas significativas (Cuadro 6), por lo que el consorcio bacteriano, no afectó la velocidad de crecimiento de las plántulas de lechuga en los siete caracteres evaluados. Esto indica que el consorcio bacteriano no tuvo efecto positivo sobre los caracteres de crecimiento cuando las semillas y plántulas fueron inoculadas, aun cuando todas las bacterias que conforman el consorcio colonizaron en un orden entre  $10^4$  y  $10^6$  UFC·g raíz<sup>-1</sup> las raíces de las plántulas (Cuadro 3).

Los efectos negativos de la aplicación del consorcio estudiado sobre la altura de planta y longitud de raíz en plántulas de lechuga, difieren de los resultados positivos que mostró un consorcio parecido al de esta investigación (*P. putida*, *Sphingomonas*, *Bradyrhizobium*, *B. unamae*, *G. diazotrophicus* y *A. brasilense*) en el incremento de la longitud y peso seco de raíz en plántulas de cacahuete (de Jesús-Ramos, Baez, Molina-Romero, Muñoz-Rojas y Morales-García, 2020), así como un aumento en altura de planta y peso seco de brotes y raíz en plántulas de maíz a inocularse con *P. putida*, *Sphingomonas*, *A. brasilense* y *Acinetobacter* sp. (Molina-Romero et al., 2017).

Se ha indicado que las condiciones abióticas (clima, temperatura, tipo de suelo) y bióticas (respuestas sinérgicas/antagónicas, el estado fenológico de la planta) (Bhattacharyya y Jha, 2012) son factores que afectan la interacción planta-microorganismo lo que conduce a un efecto benéfico o perjudicial (Tsukanova, Meyer y Bibikova, 2017; Piromyou et al., 2011), el cual depende no sólo del entorno sino también del balance hormonal asociado a la composición y cantidad de fitohormonas en las plantas (Kudoyarova et al., 2019). A su vez, la mejora en el crecimiento de las plantas depende también de la capacidad de las bacterias para sobrevivir y colonizar (Madhaiyan et al., 2007), la concentración bacteriana de cada cepa (Mangmang et al., 2015), así como de la compatibilidad de las PGPR con el cultivo, específicamente con los exudados de la raíz (Martínez-Viveros,

Jorquera, Crowley, Gajardo y Mora, 2010) lo que determinará el inicio de una relación de beneficio mutuo (Camelo et al., 2011).

Cuadro 5. Comparaciones de medias de tratamientos de los caracteres de crecimiento y desarrollo de plántulas de lechuga *Lactuca sativa* cv. Ruby Sky inoculadas y no inoculadas a los 28 dds.

| Tratamiento | Inoculación de semilla | Inoculación a plántula (dds) | AP (cm) | LR (cm) |
|-------------|------------------------|------------------------------|---------|---------|
| 1           | No                     | No                           | 9.6 a   | 11.3 ab |
| 2           | No                     | 15                           | 9.0 ab  | 11.7 a  |
| 3           | No                     | 7 y 15                       | 9.5 ab  | 10.2 ab |
| 4           | Si                     | No                           | 7.8 ab  | 9.6 b   |
| 5           | Si                     | 15                           | 7.6 b   | 9.96 ab |
| DMSH        |                        |                              | 1.9034  | 1.8781  |

dds: días después de la siembra, AP: altura de la planta, LR: longitud de raíz, DMSH: diferencia mínima significativa honesta. Medias con letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

Cuadro 6. Tasas de crecimiento de los caracteres evaluados durante el crecimiento y desarrollo de lechugas inoculadas y no inoculadas con un consorcio bacteriano.

| TRA | DT    |                | PFPA  |                | AP    |                | PFR   |                | LR    |                | MSPA  |                | MSR   |                |
|-----|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|
|     | C     | r <sup>2</sup> | C     | r <sup>2</sup> | C     | r <sup>2</sup> | C     | r <sup>2</sup> | C     | r <sup>2</sup> | C     | r <sup>2</sup> | C     | r <sup>2</sup> |
| 1   | 0.08  | 0.87           | 0.22  | 0.88           | 0.09  | 0.95           | 0.20  | 0.77           | 0.03  | 0.40           | 0.18  | 0.44           | 0.15  | 0.67           |
| 2   | 0.08  | 0.73           | 0.24  | 0.86           | 0.09  | 0.93           | 0.21  | 0.45           | 0.03  | 0.50           | 0.21  | 0.37           | 0.19  | 0.57           |
| 3   | 0.08  | 0.82           | 0.21  | 0.89           | 0.09  | 0.96           | 0.19  | 0.83           | 0.03  | 0.29           | 0.17  | 0.49           | 0.16  | 0.81           |
| 4   | 0.08  | 0.77           | 0.23  | 0.68           | 0.09  | 0.81           | 0.19  | 0.38           | 0.03  | 0.52           | 0.19  | 0.34           | 0.16  | 0.49           |
| 5   | 0.09  | 0.72           | 0.26  | 0.71           | 0.10  | 0.89           | 0.25  | 0.40           | 0.04  | 0.58           | 0.23  | 0.29           | 0.26  | 0.52           |
| CV  | 17.57 |                | 19.27 |                | 13.77 |                | 38.25 |                | 29.49 |                | 22.26 |                | 34.71 |                |

TRA: tratamientos, C: velocidad de crecimiento del carácter, r<sup>2</sup>: coeficiente de determinación; CV: coeficiente de variación, DT: diámetro de tallo, PFPA: peso fresco de parte aérea, AP: altura de la planta, LR: longitud de raíz, MSPA: materia seca de parte aérea, MSR: materia seca de raíz, PFR: peso fresco de raíz.

## CONCENTRACIÓN DE NUTRIMENTOS

El análisis de varianza no mostró diferencias significativas en las concentraciones de nutrimentos en tejido foliar entre tratamientos (Cuadro 7) por lo que el consorcio bacteriano no tuvo efecto sobre la concentración de macro y micronutrimentos al final del experimento (28 dds), los cuales se mantuvieron dentro del intervalo óptimo, con excepción de N (2.3 %), K (4.5 %) y Zn (16.6 mg·kg<sup>-1</sup>). El N debería estar en un intervalo 4.0-5.0 %, K en un intervalo 6.0-10.0 % y Zn en un intervalo 20-75 mg·kg<sup>-1</sup> (Mills y Jones, 1996), concentraciones que fueron descritas en general para todas las etapas fenológicas de la lechuga, por lo que podría haber algunas diferencias entre etapas. Tampoco se observaron diferencias ( $P \leq 0.05$ ) en el contenido de clorofila entre tratamientos, se infiere que la actividad fotosintética en los tratamientos fue la misma.

Cuadro 7. Cuadrados medios del análisis de varianza de la concentración de nutrimentos en tejido de hoja en plántulas de lechuga a los 28 dds.

| FV     | GL | N     | P     | K     | Ca    | Mg    | Na    | Cu    | Mn    | Zn    | Fe     |
|--------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| TRA    | 4  | 0.08  | 0.02  | 0.57  | 0.018 | 0.012 | 0.020 | 13.13 | 399.4 | 1.84  | 1724.3 |
| BLO    | 4  | 0.03  | 0.015 | 0.35  | 0.012 | 0.005 | 0.005 | 14.85 | 92.7  | 0.85  | 2648.4 |
| ERROR  | 16 | 0.07  | 0.016 | 0.55  | 0.015 | 0.009 | 0.010 | 15.88 | 267.7 | 6.04  | 1237.4 |
| CV (%) |    | 11.47 | 26.84 | 16.43 | 12.58 | 18.36 | 17.18 | 21.87 | 26.1  | 14.81 | 20.4   |
| MEDIA  |    | 2.30  | 0.470 | 4.53  | 1.00  | 0.505 | 0.573 | 18.22 | 62.75 | 16.59 | 172.1  |

FV: Fuente de variación, TRA: tratamientos, BLO: bloque, CV: coeficiente de variación, GL: grados de libertad. Las unidades del valor de la media de N, P, K, Ca, Mg y Na se encuentra expresado en % y los de Cu, Mn, Zn y Fe en mg·kg<sup>-1</sup>.

Se ha señalado que la concentración de nutrimentos en solución de riego puede afectar la acción de las PGPR (da Costa et al., 2013). En esta investigación se proporcionó una solución nutritiva suficiente para el crecimiento de plántulas de lechuga. En condiciones suficientes de nutrientes, la lechuga *Lactuca sativa* Linn inoculada con *Bacillus velezensis* SAAS-63 exhibió una acumulación de macronutrimentos y ningún efecto en la concentración de micronutrimentos en las hojas; mientras que en condiciones subóptimas

de nutrientes estas concentraciones fueron significativamente superiores después de la inoculación (Bai et al., 2024). Lo que concuerda con Ikis, Dasgan y Gruda (2024) quienes observaron que la eficacia de PGPR se redujo a altas concentraciones de nutrientes. En contraste, cuando no hay suficientes nutrimentos los consorcios bacterianos también pueden llegar a tener efecto negativo en la disponibilidad de nutrientes en la etapa de siembra, ya que podrían competir por ellos con las plantas y así inhibir su desarrollo (Afanador-Barajas et al., 2021).

En este estudio, aun cuando las bacterias colonizaron las raíces de las plántulas de lechuga, el consorcio no tuvo efecto sobre los caracteres de crecimiento de la planta, ni en la concentración de nutrimentos, se puede atribuir a la ausencia de interacción entre las plantas y el consorcio, debido a los mecanismos de reconocimiento y señalización entre microorganismos-planta los cuales van a estimular y alterar mecanismos genéticos y moleculares para conducir a respuestas benéficas, mismas que se ven afectadas por el genotipo bacteriano y la variedad de la planta (Jalmi y Sinha, 2022; Molina-Romero et al., 2021).

## CONCLUSIÓN

En este estudio el consorcio bacteriano (EMMIM-1, Patente MX340596B-2016) conformado por *Pseudomonas putida* KT2440, *Sphingomonas* sp. OF178, *Bradyrhizobium* sp. MS22, *Burkholderia unamae* MT16451T, *Gluconacetobacter diazotrophicus* PAI5T y *Azospirillum brasilense* Sp7 aplicado a semillas peletizadas y a plántulas tuvo un efecto negativo sobre el porcentaje de emergencia, altura de planta y longitud de raíz, así como un efecto neutro sobre la concentración de nutrimentos en el tejido foliar en el cultivar de lechuga Ruby Sky. La respuesta positiva, negativa o neutra del consorcio bacteriano dependerá de los factores bióticos y abióticos que tienen efecto sobre las interacciones planta-microorganismos, entre ellos, el genotipo bacteriano y la variedad de la planta.

## LITERATURA CITADA

- Afanador-Barajas, L. N., Navarro-Noya, Y. E., Luna-Guido, M. L., y Dendooven, L. (2021). Impact of a bacterial consortium on the soil bacterial community structure and maize (*Zea mays* L.) cultivation. *Scientific Reports*, 11, Article 13092. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92517-0>
- Bai, Y., Song, K., Gao, M., Ma, J., Zhou, Y., Liu, ...Zheng, X. (2024). Using multi-omics to explore the effect of *Bacillus velezensis* SAAS-63 on resisting nutrient stress in lettuce. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 108, Article 313. <https://doi.org/10.1007/s00253-024-13153-y>
- Bashan, Y. (1998). Inoculants of plant growth-promoting bacteria for use in agriculture. *Biotechnology Advances*, 16(4) 729-770. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(98\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(98)00003-2)
- Bashan, Y., de-Bashan, L. E., Prabhu, S. R., y Hernandez, J. P. (2014). Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: Formulations and practical perspectives (1998–2013). *Plant and Soil*, 378, 1-33. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1956-x>
- Bashan, Y., Puente, M. E., de-Bashan, L. E., y Hernandez, J. P. (2008). Environmental uses of plant growth-promoting bacteria. En E. A. Barka, y C. Clement (Eds.), *Plant-microbe interactions*. (pp. 69-93). Trivandrum, Kerala, India. Research Signpost.
- Bhattacharyya, P., y Jha, D. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28, 1327-1350. <https://doi.org/10.1007/s11274-011-0979-9>
- Camelo, R. M., Vera, M. S. P. y Bonilla, B. R. R. (2011). Mecanismos de acción de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 12(2), 159-166. <https://www.redalyc.org/pdf/4499/449945031010.pdf>
- Da Costa, P. B., Beneduzi, A., De Souza, R., Schoenfeld, R., Vargas, L. K., y Passaglia, L. M. P. (2013). The effects of different fertilization conditions on bacterial plant growth promoting traits: guidelines for directed bacterial prospection and testing. *Plant Soil*, 368, 267-280. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1513-z>

- Das, P. P., Singh, K. R., Nagpure, G., Mansoori, A., Singh, R. P., Ghazi, I. A.,...Singh, J. (2022). Plant-soil-microbes: a tripartite interaction for nutrient acquisition and better plant growth for sustainable agricultural practices. *Environmental Research*, 214(1), Article 113821. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113821>
- de Jesús-Ramos, A., Baez, A., Molina-Romero, D., Muñoz-Rojas, J., y Morales-García, Y. E. (2020). Potenciación del crecimiento de cacahuate criollo Huaquechula por bacterias rizosféricas aplicadas de forma individual o en consorcio. *Alianzas y Tendencias BUAP*, 5(19), 20-40. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/00e45463-4bb7-41a7-ae9e-ce30abdbcd23>
- Díaz-Vargas, P., Ferrera-Cerrato, R., Almaraz-Suárez, J. J., y Alcántar-González, G. (2001). Inoculación de bacterias promotoras del crecimiento en lechuga. *Terra Latinoamericana*, 19(4), 327-335. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57319405.pdf>
- Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012, 963401. <https://doi.org/10.6064/2012/963401>
- Guo Z., Li B., Du J., Shen F., Zhao Y., Deng Y.,...Yang X. 2023. LettuceGDB: The community database for lettuce genetics and omics. *Plant Communications*, 4(1), Article 1100425. <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2022.100425>
- Herigstad, B. Hamilton, M., y Heersink, J. (2001). How to optimize the drop plate method for enumerating bacteria. *Journal of Microbiological Methods*, 44, 121-129. [https://doi.org/10.1016/S0167-7012\(00\)00241-4](https://doi.org/10.1016/S0167-7012(00)00241-4)
- Ikis, B., Dasgan, H. Y., y Gruda, N. S. (2024). Utilizing the power of plant growth promoting rhizobacteria on reducing mineral fertilizer, improved yield, and nutritional quality of Batavia lettuce in a floating culture. *Scientific Reports*, 14, 1616. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51818-w>
- Iparraguirre, J., Masciarelli, O., Llanes, A., Zocolo, J. Guilherme, y Luna, V. (2020). Biofertilization with *Macrocystis pyrifera* algae extracts combined with PGPR-enhanced growth in *Lactuca sativa* seedlings. *Journal of Applied Phycology*, 32, 4361-4371. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02202-4>
- Ishiaku, Y. M., Hassan, M. R., Abubakar, S. A., Amodu, J. T., Abdu, S. B., Tanko, R.,...Suleiman, A. (2020). Germination percentage and emergence potential of

- nine newly introduced temperate forage germplasms in Shika, Nigeria. *Nigerian Journal of Animal Production*, 44(5); 232-238. <https://doi.org/10.51791/njap.v44i5.1440>
- Jackson, M. L. (1964). *Análisis químico de suelos*. Barcelona, España: Omega.
- Jalmi, S. K., y Sinha, A. K. (2022). Ambiguities of PGPR-induced plant signaling and stress management. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.899563>
- Jones, B. J. R., Wolf, B. y Mills, B. H. (1991). *Plant analysis hand book: a practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide*. Athens: Micro-Macro Publishing, Inc.
- Kim, M. J., Moon, Y., Tou, J. C., Mou, B., y Waterland, N. L. (2016). Nutritional value, bioactive compounds and health benefits of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Food Composition and Analysis*, 49, 19-34. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2016.03.004>
- Kong, Z., y Liu, H. (2022). Modification of rhizosphere microbial communities: a possible mechanism of plant growth promoting rhizobacteria enhancing plant growth and fitness. *Frontiers in Plant Science*, 13, Article 920813. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.920813>
- Kudoyarova, G., Arkhipova, T., Korshunova, T., Bakaeva, M., Loginov, O. y Dodd, I. C. (2019). Phytohormone mediation of interactions between plants and non-symbiotic growth promoting bacteria under edaphic stresses. *Frontiers in Plant Science*, 10, Article 1368. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01368>
- Madhaiyan, M., Poonguzhali, S., Yim, W. J., Kim, K. A., Kang, B. G., y Sa, T. M. (2007). Optimization of the inoculation dose of plant growth promoting bacteria *Azospirillum brasilense* strain CW903 assessed by tomato, red pepper and rice under greenhouse conditions. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 40(4), 249-254. <https://koreascience.kr/article/JAKO200728066505876.pdf>
- Mangmang, J. S., Deaker, R., y Rogers, G. (2015). Optimal plant growth-promoting concentration of *Azospirillum brasilense* inoculated to cucumber, lettuce and tomato seeds varies between bacterial strains. *Israel Journal of Plant Sciences*, 62(3), 145-152. <https://doi.org/10.1080/07929978.2015.1039290>

- Martínez-Viveros, O., Jorquera, M. A., Crowley, D. E., Gajardo, G. y Mora, M. L. (2010). Mechanisms and practical considerations involved in plant growth promotion by rhizobacteria. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(3), 293-319. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162010000100006>
- Menezes, M. A. P., Kusdra, J. F., y Moreno, A. de L. (2024). Lettuce yield response to application of rhizobacteria and nitrogen to the growth substrate. *Comunicata Scientiae Horticultural Journal*, 15, Article e4235. <https://doi.org/10.14295/cs.v15.4235>
- Mills, H. A., y Jones, J. B. Jr. (1996). *Plant analysis handbook II: a practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide*. Athens. Micro-Macro Publishing.
- Molina-Romero, D., Baez, A., Quintero-Hernández, V., Castañeda-Lucio, M., Fuentes-Ramírez, L. E., Bustillos-Cristales, M. D. R.,... y Muñoz-Rojas, J. (2017). Compatible bacterial mixture, tolerant to desiccation, improves maize plant growth. *PLoS ONE*, 12(11), Article e0187913. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187913>
- Molina-Romero, D., Juárez-Sánchez, S., Venegas, B., Ortiz-gonzález, C.S., Baez, A., Morales-García, Y. E., y Muñoz-Rojas, J. (2021). A bacterial consortium interacts with different varieties of maize, promotes the plant growth, and reduces the application of chemical fertilizer under field conditions. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.616757>
- Morales-García, Y. E., Baez, A., Quintero-Hernández, V., Molina-Romero, D., Rivera-Urbalejo, A. P., Pazos-Rojas, L. A., y Muñoz-Rojas, J. (2019). Bacterial mixtures, the feature generation of inoculants for sustainable crop production. En D. Maheshwari y S. Dheeman. (Eds.), *Field crops: Sustainable management by PGPR* (pp. 11-44). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-30926-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-30926-8_2)
- Muñoz Rojas, J. y Caballero Mellado, J. (2001). *Gluconacetobacter diazotrophicus*, modelo de bacteria endófito. En E. Martínez Romero y J. Martínez Romero. (Ed.), *Microbios en línea* (pp. 157-176). México, UNAM. <https://www.biblioweb.tic.unam.mx/libros/microbios/Cap9/>
- Muñoz-Rojas, J., Morales-García, Y. E., Juárez-Hernández, D., Fuentes-Ramírez, L. E., y Munive-Hernández, J. A. (2019). *Formulación de un inoculante multiespecies*

- para potenciar el crecimiento de plantas (Patente MX3405596B). [https://www.researchgate.net/profile/Jesus-Munoz-Rojas/publication/309550250\\_Formulacion\\_de\\_un\\_inoculante\\_multiespecies\\_para\\_potenciar\\_el\\_crecimiento\\_de\\_plantas/links/58e84070a6fdccb4a8303498/Formulacion-de-un-inoculante-multiespecies-para-potenciar-el-crecimiento-de-plantas.pdf?origin=publication\\_list](https://www.researchgate.net/profile/Jesus-Munoz-Rojas/publication/309550250_Formulacion_de_un_inoculante_multiespecies_para_potenciar_el_crecimiento_de_plantas/links/58e84070a6fdccb4a8303498/Formulacion-de-un-inoculante-multiespecies-para-potenciar-el-crecimiento-de-plantas.pdf?origin=publication_list)
- Murty, M. G., y Ladha, J. K. (1988). Influence of *Azospirillum* inoculation on the mineral uptake and growth of rice under hydroponic conditions. *Plant and Soil*, 108, 281-285. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02375660>
- Nagrale, D.T., Chaurasia, A., Kumar, S., Gawande, S., Hiremani, N. S., Sahnkar, R.,...Prasa, Y. G. (2023). PGPR: The treasure of multifarious beneficial microorganisms for nutrient mobilization, pest biocontrol and plant growth promotion in field crops. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 39(4), 100. <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03536-0>
- Pineda-Pineda, J., Valdez-Zamora, A., Miranda-Velázquez, I., Rodríguez-Pérez, J. E., Ramírez-Arias, J. A., & Lozano-Toledano, A. (2018). Yield of two cultivars of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in hydroponic and aquaponic systems. *Acta Horticulturae*, 1227, 347–354. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1227.43>
- Piromy, P., Buranabanyat, B., Tantasawat, P., Tittabutr, P., Boonkerd, N., y Teaumroong, N. (2011). Effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) inoculation on microbial community structure in rhizosphere of forage corn cultivated in Thailand. *European Journal of Soil Biology*, 47(1), 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2010.11.004>
- Rashi, y Kaushik, N. (2024). Enhancing germination percentage and seed vigor in horticultural crops through biopriming techniques. *BIO Web of Conferences*, 110, Article 01012. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202411001012>
- Rozhkova, T. O., Burdulanyuk, A. O., Bakumenki O. M., Yemets O. M., Vlasenko, V. A., Tatarynova, V. I.,...Stankevych, S. V. (2021). Influence of seed treatment on microbiota and development of winter wheat seedlings. *Ukrainian Journal of Ecology*, 11(1), 55-61. [https://doi.org/10.15421/2021\\_8](https://doi.org/10.15421/2021_8)

- SIAP. (2023). Panorama Agroalimentario, México. Recuperado de [https://nube.siap.gob.mx/gobmx\\_publicaciones\\_siap/](https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/)
- Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil*, 15(2), 134-154. <https://doi.org/10.1007/BF01347224>
- Supratim, B., Rabara, R., y Negi, S. (2017). Towards a better greener future - an alternative strategy using biofertilizers. I: Plant growth promoting bacteria. *Plant Gene*, 12, 43-49. <https://doi.org/10.1016/j.plgene.2017.07.004>
- Tahir, M., y Sarwar, M. A. (2013). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): A budding complement of synthetic fertilizers for improving crop production. *Pakistan Journal of Life and Social Sciences*, 11(1), 1-7. [http://www.pjlss.edu.pk/pdf\\_files/2013\\_1/1-7.pdf](http://www.pjlss.edu.pk/pdf_files/2013_1/1-7.pdf)
- Thomloui, E. E., Tsalgatiou, P. C., Douka, D., Spantidos, T. N., Dimou, M., Venieraki, A., y Katinakis, P. (2019). Multistrain versus single-strain plant growth promoting microbial inoculants - The compatibility issue. *Hellenic Plant Protection Journal*, 12(2), 61-77. <https://doi.org/10.2478/hppj-2019-0007>
- Tsukanova, K., Meyer, J., Bibikova, T. (2017). Effect of plant growth-promoting Rhizobacteria on plant hormone homeostasis. *South African Journal of Botany*, 113, 91-102. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2017.07.007>
- Vetrano, F., Miceli, C., Angileri, V., Frangipane, B., Moncada, A., y Miceli, A. (2020). Effect of bacterial inoculum and fertigation management on nursery and field production of lettuce plants. *Agronomy*, 10(10), Article 1477. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101477>
- Vio, S. A., Galar, M. L., Gortari, M. C., Balatti, P., Garbi, M., Lodeiro, A. R., y Luna, M. F. (2023). Multispecies Bacterial Bio-Input: Tracking and Plant-Growth-Promoting Effect on Lettuce var. *sagess*. *Plants*, 12(4), Article 736. <https://doi.org/10.3390/plants12040736>
- Vivanco-Calixto, R., Molina-Romero, D., Morales-García, Y. E., Quintero-Hernández, V., Munive-Hernández, A., Baez-Rogelio, A., y Muñoz-Rojas, J. (2016). Reto agrobiotecnológico: inoculantes bacterianos de segunda generación. *Alianzas y Tendencias BUAP*, 1(1): 9-19. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5069043>

## CAPITULO 4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE SUBSISTEMAS HIDROPÓNICOS PARA EL CULTIVO DE LECHUGA Y TILAPIA EN SISTEMAS ACUAPÓNICOS

Hilda Elín Pérez-Ponce<sup>1</sup>, Joel Pineda-Pineda<sup>2\*</sup>, Juan Enrique Rodríguez-Pérez<sup>1</sup>, Antonino Báez Rogelio<sup>3</sup>, Rogelio Castro-Brindis<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Departamento de Fitotecnia, Instituto de Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO.

<sup>2</sup>Departamento de Suelos, Instituto de Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO.

<sup>3</sup>Instituto de Ciencias. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Estado de Puebla, C. P. 72570, MÉXICO.

### Resumen

Los sistemas acuapónicos integran el cultivo hidropónico de plantas y el cultivo acuícola de peces. Los subsistemas hidropónicos más utilizados en acuaponía son: cama de agregados, balsa flotante y técnica de película nutritiva (NFT), su elección depende de los recursos disponibles, el espacio y los objetivos productivos. El objetivo del estudio fue evaluar y comparar el crecimiento y rendimiento de lechuga (*Lactuca sativa*) cv. Ruby Sky y tilapia (*Oreochromis niloticus*) en tres sistemas acuapónicos (cama de agregados, balsa flotante y técnica de película nutritiva (NFT)) y un sistema hidropónico, para determinar el sistema más productivo. Se evaluaron cuatro tratamientos: los tres sistemas acuapónicos y el sistema hidropónico. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con tres repeticiones. Los resultados mostraron que el sistema acuapónico en cama de agregados tuvo mayor influencia ( $P \leq 0.05$ ) sobre altura de planta (34 %), peso fresco de parte aérea (39 %), área foliar (217 %), unidades SPAD (114 %) y rendimiento de lechuga (179 %) comparado con el subsistema hidropónico de balsa flotante; en contraste, disminuyó ( $P \leq 0.05$ ) la longitud de raíz (57.7%) sin afectar el volumen radical. Hubo acumulación de Na y Ca en la solución acuapónica. El Fe y Cu fueron indetectables en solución, aun así, el tejido foliar presentó concentraciones óptimas. El sistema acuapónico en cama de mostró mayor crecimiento de planta y rendimiento similar ( $P \leq 0.05$ ) al sistema hidropónico convencional. Los sistemas acuapónicos en cama de agregados, balsa flotante y NFT no tuvieron efecto ( $P > 0.05$ ) sobre el crecimiento, sobrevivencia y rendimiento de peces.

**Palabras clave:** balsa flotante, NFT (Técnica de película nutritiva), cama de agregados, *Lactuca sativa*, *Oreochromis niloticus*.

## **Introducción**

La acuaponía es un sistema de producción de organismos acuáticos y plantas, donde al menos el 50% de los nutrientes que sustentan el crecimiento óptimo de las plantas proviene de las heces de los organismos acuáticos (Lennard & Goddek, 2019). Se espera que ambas especies de cultivo tengan requerimientos similares de temperatura y pH para su desarrollo óptimo. La tilapia y la lechuga han sido las especies de cultivo más utilizadas en sistemas acuapónicos (El-Sayed, 2020), debido a que estos peces presentan crecimiento rápido, tolerancia a condiciones ambientales extremas, altas densidades y tolerancia a enfermedades; mientras que la lechuga es una hortaliza de ciclo corto (3-4 semanas en el sistema), con baja incidencia de plagas, requerimientos nutricionales bajos y adecuada adaptación a los sistemas acuapónicos (Rakocy et al., 2006). Estos sistemas de recirculación permiten reutilizar el agua, recuperar nutrientes, eliminar el uso de fertilizantes químicos (principalmente los nitrogenados) y minimizar o evitar las descargas del efluente acuícola, lo que disminuye la eutrofización e hipoxia de cuerpos de agua cercanos y evita problemas de contaminación ambiental (Endnut et al., 2009; Yang & Kim, 2020).

En general, los sistemas acuapónicos constan de un subsistema acuícola que comprende depósitos para mantener organismos acuáticos, un subsistema de filtración que incluye un sedimentador para eliminar lodos y un biofiltro que hace posible la nitrificación bacteriana, además de un subsistema hidropónico para el cultivo de plantas (Palm et al., 2023). Los subsistemas hidropónicos más utilizados en acuaponía son las camas de agregados, la técnica de balsa flotante y la técnica de película nutritiva (NFT) (Maucieri et al., 2018).

La elección del subsistema hidropónico puede fundamentarse en las ventajas específicas que ofrece cada subsistema por separado (Lenard & Leonard, 2006). Por ejemplo, las camas de agregados son capaces de actuar como un biofiltro y dar estabilidad al crecimiento de raíces. Suelen ser utilizados para sistemas a pequeña escala debido a que la cama puede obstruirse con los sólidos en suspensión, el crecimiento bacteriano y las raíces restantes de la cosecha, además, el peso de la grava requiere estructuras resistentes. Debido a que la grava retiene poca agua, una falla en la electricidad o el

sistema de bombeo puede provocar estrés hídrico en las plantas y comprometer el cultivo (Schmautz et al., 2016).

La técnica de balsa flotante provee máxima exposición de las raíces al agua y capacidad para sostener un elevado número de plantas utilizando una cantidad reducida de materiales (Patillo, 2017). Una desventaja es la presencia de plagas acuáticas que pueden afectar el crecimiento de las plantas (Rakocy, 2003). La técnica de película nutritiva es utilizada para plantas de crecimiento rápido y es útil cuando se busca optimizar espacio. La combinación de una inversión inicial reducida, diseño simple y fácil operación ha favorecido su adopción en sistemas acuapónicos comerciales (Goda et al., 2015); sin embargo, una revisión y análisis de los sistemas acuapónicos por Maucieri et al. (2018) indicó que este subsistema es el menos exitoso. Al respecto, algunos estudios han realizado comparaciones entre subsistemas hidropónicos y los resultados difieren entre sí, esta variabilidad puede deberse al tipo de filtración utilizada, condiciones ambientales y al nivel de experiencia práctica en la operación y funcionamiento de un sistema acuapónico (Goda et al., 2015; Lenard & Leonard, 2006; Schmautz et al., 2016; Yep & Zheng, 2019).

El objetivo de este estudio fue evaluar y comparar el crecimiento y rendimiento de lechuga (*Lactuca sativa*) cv. Ruby Sky y tilapia (*Oreochromis niloticus*) en tres sistemas acuapónicos (cama de agregados, balsa flotante y NFT) y un sistema hidropónico.

## **Materiales y métodos**

### **Ubicación del experimento**

El experimento se llevó a cabo del 17 de agosto al 14 de septiembre de 2023 en un invernadero ubicado en el campo San Ignacio de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco de Mora, Estado de México (19°29'18'' N, 98°53'16'' W y 2,252 msnm).

### **Sistemas acuapónicos evaluados**

Se evaluaron tres sistemas acuapónicos definidos por el subsistema hidropónico: cama de agregados (tezontle como sustrato), balsa flotante y NFT (técnica de la película nutritiva), y un sistema hidropónico.

## Diseño de tratamientos

Este estudio evaluó cuatro tratamientos (Cuadro 8) para comparar tres sistemas acuapónicos (con variación en el subsistema hidropónico) con un sistema hidropónico.

**Cuadro 8.** Tratamientos acuapónicos utilizados para el desarrollo de tilapia y producción de lechuga cv. Ruby Sky.

| Tratamiento | Sistema de producción | Subsistema hidropónico | Densidad de cultivo inicial de peces |
|-------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|
| 1           | Acuaponía             | Cama de agregado       | 18.7                                 |
| 2           | Acuaponía             | Balsa flotante         | 18.3                                 |
| 3           | Acuaponía             | NFT                    | 18.9                                 |
| 4           | Hidroponía            | Cama de agregado       | -                                    |

NFT: Técnica de película nutritiva

Los sistemas acuapónicos (Figura 1) fueron sistemas cerrados que constaron de un subsistema acuícola (tanque de peces 200 L de capacidad), un subsistema hidropónico (cama de agregados, balsa flotante y NFT) y un biofiltro. La recirculación de los sistemas acuapónicos e hidropónicos se realizó con bombas sumergibles de 0.25 HP, la temperatura se mantuvo controlada con un calentador de 100 watts y la aireación fue suministrada por un “Blower” o soplador GF-370 de 1600 mm H<sub>2</sub>O de presión que funcionó las 24 horas durante todo el ciclo de cultivo, el aire fue dispersado en cada tanque con piedras difusoras de acuario.

Se utilizaron plántulas de lechuga (*Lactuca sativa*) cv. Ruby Sky (3-4 hojas, 28 días después de la siembra). En cada sistema acuapónico e hidropónico se trasplantaron 21 plántulas, a una densidad de 25 plantas·m<sup>-2</sup>. Se utilizaron tilapias (*Oreochromis niloticus*) criadas en una granja acuícola ubicada en Teotihuacán, estado de México. La densidad de peces se ajustó aproximadamente a 19 kg·m<sup>-3</sup> y el peso promedio por pez fue de 253 g. La alimentación de los peces se realizó 2 veces al

día a saciedad con alimento comercial Nutripec® (Purina, México) en pellets de 3.5 mm con 32% de proteína y 6% de lípidos a razón del 3 % de la biomasa total del tanque.

El sistema acuapónico con subsistema hidropónico de cama de agregados consistió en un tanque circular de polietileno (0.60 m de diámetro por 0.72 m de altura) para el cultivo de peces. El subsistema hidropónico constó de una tina rectangular (1.0 m x 0.7 m x 0.4 m) de polietileno con capacidad de 210 L relleno de tezontle. El acomodo del sustrato (tezontle) se realizó por capas con diferente granulometría. La cama de agregados funcionó como biofiltro y como sustrato para las plantas (Figura 1a).

El sistema acuapónico con subsistema hidropónico de balsa flotante constó de un tanque para peces, el biofiltro estuvo constituido por una tina de polietileno de 110 L relleno de tezontle, el acomodo del sustrato se realizó por capas con diferente granulometría. El agua de los peces fue bombeada al biofiltro que estaba situado sobre el tanque de peces con una bomba de 0.25 HP, el agua filtrada cayó por gravedad a un pequeño contenedor (tina de 110 L de capacidad) y de ahí fue bombeada con una segunda bomba de 0.25 HP al subsistema hidropónico que estuvo conformado por una tina de polietileno de 210 L y una balsa flotante de poliestireno extruido de 1''. El agua regresó al tanque de peces por gravedad (Figura 1b).

El sistema acuapónico con subsistema hidropónico de técnica de película nutritiva (NFT) constó de un tanque para peces; el biofiltro y bombeo de agua fue realizado igual que en el sistema acuapónico con subsistema de balsa flotante. El subsistema hidropónico estuvo conformado por 3 canaletas construidas con tubos de pvc de 4 ½'' de diámetro y una longitud de 1 m cada una, a cada canaleta se le realizaron 7 perforaciones. Las canaletas estuvieron suspendidas en una base metálica rectangular. El agua regresó al tanque de peces por gravedad (Figura 1c).

El sistema hidropónico convencional fue construido igual que el sistema acuapónico con subsistema hidropónico de cama de agregados, la diferencia es que el tanque de peces fue utilizado para contener la solución nutritiva propuesta por Steiner (1961) al 100%. La solución nutritiva

permaneció a temperatura ambiente y el tanque que la contenía fue cubierto con plástico negro para evitar el crecimiento de microalgas (Figura 1).

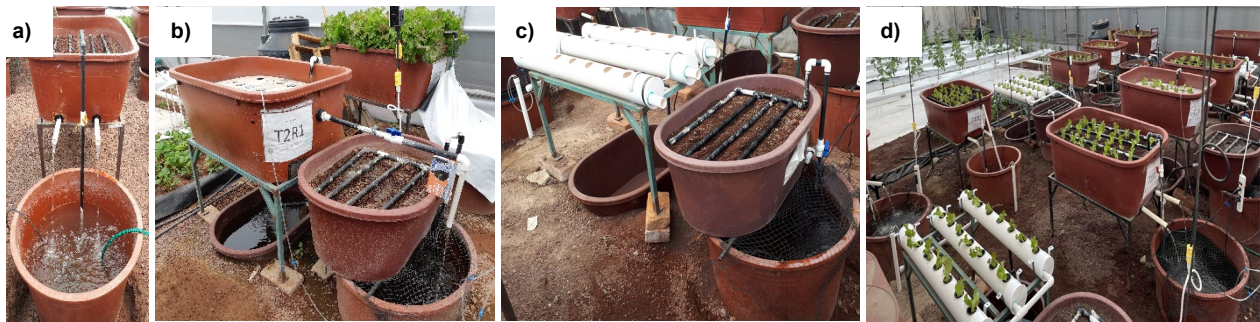


Figura 1. a) sistema acuapónico con subsistema hidropónico de cama de agregados (T1) y sistema hidropónico simple (T4), b) sistema acuapónico con subsistema hidropónico de balsa flotante (T2), c) sistema acuapónico con subsistema hidropónico NFT (T3) y d) sistemas acuapónicos y sistema hidropónico simple a los 7 ddt.

### **Unidad y Diseño experimental**

La unidad experimental consistió en 21 plántulas establecidas en el sistema hidropónico convencional y en cada subsistema hidropónico que conformó a los sistemas acuapónicos. Se utilizó el diseño experimental completamente al azar con tres repeticiones.

### **Caracteres evaluados**

#### **Crecimiento y peso de los peces**

Semanalmente se registró el peso corporal (g) y longitud total (cm) de peces considerando la distancia que va desde la punta del hocico hasta la punta de la aleta caudal. Los peces fueron capturados uno por uno con una red de acuario, el peso fue determinado en una báscula electrónica OHAUS modelo Traveler TA302 y la longitud total con una cinta métrica flexible ajustada a una caja de plástico para evitar la caída del pez al moverse. Después del manejo, se aplicó a los peces un baño de sal. Los peces muestreados fueron colocados por 10 min en una tina con 51 L de agua con  $7 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  de sal disuelta para prevenir infecciones y ayudar a recuperarse del estrés.

La ración de alimento establecida diariamente fue pesada y colocada en un contenedor de plástico para cada tratamiento, posteriormente se alimentó 2 veces al día a saciedad. Al final del día el alimento no consumido fue pesado y registrado. La cantidad de alimento consumido se determinó diariamente restando la cantidad de alimento inicial menos la cantidad de alimento final (no consumido) ( $\text{g} \cdot \text{día}^{-1}$ ). Se determinó el peso total inicial (PTi, g), peso total final (PTf, g) y peso ganado (PG, g) de los peces. La densidad de cultivo (DC) se determinó considerando el peso total inicial (kg) por volumen del sistema ( $\text{m}^3$ ). El rendimiento ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) se calculó considerando el peso total de los peces al final del cultivo (kg) por volumen de agua del sistema.

La tasa de supervivencia (S, %) se obtuvo mediante la fórmula:

$$S = \frac{N_t}{N_0} \times 100$$

Donde  $N_t$  = número total de peces al momento de la cosecha;  $N_0$  = Número inicial de peces sembrados.

El índice de conversión alimenticia (FCA) se calculó con la fórmula:

$$FCA = \frac{P_f}{P_b}$$

Donde,  $P_f$  = Peso seco del alimento suministrado;  $P_b$  = ganancia de peso corporal.

### **Calidad de la solución acuapónica**

La temperatura (T, °C), conductividad eléctrica (CE,  $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ ) y pH se midieron una vez por semana con un medidor de pH/CE/TDS portátil Hanna® modelo HI991301, el oxígeno en solución (OD,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) con un medidor de oxígeno Hanna® HI9147-04. Los compuestos nitrogenados: amoníaco ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), nitritos ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) en la solución acuapónica se determinaron por colorimetría con un Kit comercial marca Fluval®.

### **Concentración de nutrimentos en la solución acuapónica**

La concentración de nutrimentos en la solución acuapónica o efluente acuícola fue determinada una vez a la semana. Las muestras de solución fueron tomadas por la mañana, siempre del tanque de peces. La concentración de  $\text{N-NH}_4$  y  $\text{N-NO}_3$  se determinó por el método micro-Kjeldahl de

destilación simple (Jones, Wolf & Mills, 1991), el P se determinó mediante la reducción con ácido ascórbico para obtener azul de molibdeno y fue cuantificado a una absorbancia de 882 nm en un espectrofotómetro de luz UV-VIS marca Thermo Scientific modelo Genesys 10uv (Preciado-Guzmán et al., 2025). La concentración de  $K^+$ ,  $Ca^{+2}$  y  $Na^+$  se cuantificó con un flamómetro marca Sherwood modelo 410. El  $Mg^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$  y  $Cu^{+2}$  fueron determinados en un espectrofotómetro de absorción atómica marca GBC modelo Avanta. Todos los nutrientes se expresaron en  $mg \cdot L^{-1}$ .

### **Concentración de nutrientes en tejido foliar de lechuga**

Para determinar la concentración de nutrientes en tejido foliar, al final del experimento (28 días después del trasplante (ddt) se colectó la parte aérea de 4 plántulas de cada UE. Cada plántula fue colocada en una bolsa de papel y secada en un horno de secado por convección a 65 °C durante 72 h. Posteriormente, las muestras se trituraron en un molino de acero inoxidable marca Thomas Wiley Mill modelo ED-5. El material pulverizado fue sometido a digestión húmeda en medio ácido (relación ácido sulfúrico: perclórico 4:1) para determinar el contenido de N, P, K, Ca, Mg y Na, expresados en porcentaje (%) y Fe y Zn, expresados en  $mg \cdot kg^{-1}$ . Todos los nutrientes se determinaron mediante los mismos métodos utilizados en las muestras de solución acuapónica con excepción del P que fue determinado por el método de desarrollo de color vanadato-molibdato (Jackson, 1964) a una absorbancia de 420 nm.

### **Caracteres de crecimiento de la planta**

Se colectaron 4 plántulas al azar de cada UE a los 7, 14, 21 y 28 ddt. Los caracteres de crecimiento evaluados fueron: diámetro de tallo (DT, cm), altura de planta (AP, cm), peso fresco de parte aérea (PFPA, g), longitud de raíz (LR, cm) y peso fresco de raíz (PFR, g). Para el peso seco de parte aérea (PSPA, g) y peso seco de raíz (PSR, g) todas las hojas de la planta y la raíz fueron secadas a 65 °C durante 72 h en un horno de secado por convección marca Binder 108 modelo ED400. El área foliar (AF,  $cm^2$ ) fue determinada en un integrador de área foliar LI-3000A (LI-COR, Inc. Lincoln, NE). Las unidades SPAD (US) asociadas con el contenido de clorofila fueron estimadas usando un medidor portátil (SPAD-502, Konica Minolta Sensing, INC. Japan). El rendimiento de las plantas en peso fresco ( $kg \cdot m^{-2}$ ) se calculó considerando el peso de la parte aérea de las lechugas (kg) por  $m^2$  en la UE de cada sistema acuapónico e hidropónico.

## **Análisis estadístico**

Los datos obtenidos fueron analizados con el programa SAS® On Demand for Academics. Se realizó la prueba de Kruskal-Wallis ( $P \leq 0.05$ ) y la comparación de promedios de rangos para la concentración de nitritos y amonio. Los caracteres de crecimiento y la concentración de nutrimentos fueron sometidos a análisis de varianza y comparación de medias mediante la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ).

## **Resultados y discusión**

### **Calidad de la solución acuapónica**

Los parámetros de calidad de la solución acuapónica de los diferentes sistemas de producción (T1 acuaponía con cama de agregados, T2 acuaponía con balsa, T3 acuaponía con NFT y T4 hidroponía) (Cuadro 8) se mantuvieron dentro del intervalo óptimo a excepción de la CE en T2, sistema que presentó la CE más baja ( $0.9 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ ). La temperatura y CE fluctuaron durante el experimento y mostraron diferencias ( $P \leq 0.05$ ) entre tratamientos. La fluctuación de la temperatura se debió a que los sistemas acuapónicos contaron con termostatos y el hidropónico no. Las comparaciones de medias (Cuadro 9) mostraron que la CE fue diferente ( $P \leq 0.05$ ) en el T2 y T3 respecto al T1 y T4 debido a un derrame de agua por problemas con las bombas sumergibles durante la noche, por lo que fue necesario agregar agua, lo que diluyó la concentración de nutrimentos y disminuyó la CE. La CE osciló entre  $0.6$  y  $0.9 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ , lo que refleja una baja concentración iónica en la solución. Esto sugiere que el suministro de nutrientes resultó insuficiente para satisfacer los requerimientos del cultivo, considerando que el intervalo óptimo de CE para el desarrollo de lechuga es de  $0.9$ - $1.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$  (Hosseini et al., 2021). La comparación múltiple de rangos mostró que las concentraciones de amoníaco ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) y nitritos ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ) presentaron diferencias entre tratamientos ( $P \leq 0.05$ ); no obstante, se mantuvieron dentro de los límites de seguridad para los peces ( $<1$  y  $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , respectivamente). La concentración de nitratos ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) no mostró diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ) y a lo largo del ciclo de cultivo se mantuvo alrededor de  $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . Los nitratos son una de las formas de N que las plantas utilizan para su crecimiento con concentraciones adecuadas en la solución hidropónica por arriba de  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (Pineda-Pineda et al., 2018; Velázquez-González et al., 2022), pero una concentración por debajo

de 100 mg·L<sup>-1</sup> es propicia para el crecimiento de la tilapia (El-Sayed, 2020; Stone & Thomforde, 2004).

**Cuadro 9.** Comparación de medias de los parámetros de calidad de la solución acuapónica durante un ciclo de cultivo de lechuga *Lactuca sativa* cv. Ruby Sky y tilapia *Oreochromis niloticus* cultivadas en sistemas acuapónicos e hidropónico (28 ddt).

| TRA    | pH     | T<br>(°C) | CE<br>(dS·m <sup>-1</sup> ) | OD<br>(mg·L <sup>-1</sup> ) |
|--------|--------|-----------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1      | 7.0 a  | 27.4 a    | 1.38 ab                     | 7.13 b                      |
| 2      | 7.8 a  | 26.3 a    | 0.94 b                      | 7.36 b                      |
| 3      | 7.1 a  | 28.7 a    | 1.13 b                      | 7.10 b                      |
| 4      | 6.5 a  | 22.7 b    | 2.08 a                      | 7.9 a                       |
| CV (%) | 7.54   | 4.14      | 24.7                        | 1.26                        |
| DMSH   | 1.3502 | 2.8393    | 0.8929                      | 0.2824                      |

TRA: tratamiento, CV: coeficiente de variación, DMSH: diferencia mínima significativa honesta, T: temperatura, CE: conductividad eléctrica y OD: oxígeno disuelto. Medias con misma letra dentro de columnas no difieren estadísticamente (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

### Crecimiento y peso de los peces

Durante el ciclo de cultivo, la calidad de la solución acuapónica fue óptima para el crecimiento de los peces y la supervivencia fue del 100% en todos los tratamientos. El análisis de varianza de los caracteres evaluados no mostró diferencias ( $P > 0.05$ ) (Cuadro 10), es decir que los peces mantuvieron el mismo comportamiento y crecimiento independientemente del subsistema hidropónico. Se observó un factor de conversión alimenticia (FCA) promedio de 2.85. El FCA es un indicador que mide la eficiencia con la que los peces convierten el alimento consumido en ganancia de peso (Fry et al., 2018). En general, para la tilapia se ha estimado un FCA de 1.8 (Tacon & Metian, 2008). En estudios acuapónicos se han reportado FCA por debajo de 1.8 como el obtenido en un sistema acuapónico con subsistema de balsa flotante de 0.9, conteniendo en un inicio peces de 180 g (Yang & Kim, 2019), un FCA de 0.99 en un subsistema NFT con peces de

78 g (Castillo-Castellanos et al., 2015), así como FCA de 1.8 con peces de 300 g (Yang & Kim, 2020). El FCA varía según el estadio de crecimiento de los peces. En nuestro estudio el factor estuvo por encima de 2, esto significa que la eficiencia alimenticia no fue adecuada y es necesario mejorar las prácticas de alimentación.

El rendimiento del cultivo fue de  $21 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  y hubo un incremento en la biomasa de los peces del 12.4 %, en contraste, un sistema acuapónico con subsistema de balsa generó un rendimiento de  $25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (Yang & Kim, 2020), un cultivo con subsistema NFT  $21.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (Castillo-Castellanos et al., 2015); mientras que un estudio similar al nuestro (Pineda-Pineda et al., 2018) con peces de 150 a 215 g como peso inicial obtuvo un rendimiento de  $45.3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  después de 2 meses de cultivo, es decir, un 215.7 % más que lo obtenido en nuestro estudio. La variación en el rendimiento de cultivo depende de factores como la calidad del efluente, la alimentación, la especie de cultivo, el estadio de desarrollo, el manejo sanitario y el diseño y operación del sistema (Abdel-Tawwab & Ahmad, 2009; Al-Hafedh, 1999; Stone et al., 2024).

**Cuadro 10.** Cuadrados medios del análisis de varianza del crecimiento y rendimiento de tilapia *Oreochromis niloticus* cultivada en tres sistemas acuapónicos (28 ddt).

|        |    | PTi      | PTf      | PG      | AC      |        | R                                 |
|--------|----|----------|----------|---------|---------|--------|-----------------------------------|
| FV     | GL | (g)      | (g)      | (g)     | (g)     | FCA    | ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) |
| TRA    | 2  | 5908.33  | 5842.27  | 993.91  | 1902.19 | 0.0304 | 0.2597                            |
| ERROR  | 6  | 19923.06 | 40574.97 | 6465.46 | 8174.21 | 0.205  | 1.8033                            |
| CV (%) |    | 5.04     | 6.39     | 22.56   | 9.10    | 15.88  | 6.39                              |
| MEDIA  |    | 2797.44  | 3153.87  | 356.42  | 993.68  | 2.85   | 21.03                             |

FV: fuente de variación, GL: grados de libertad, TRA: tratamiento, CV: coeficiente de variación, DMSH: diferencia mínima significativa honesta, PT<sub>i</sub>: Peso total inicial, PT<sub>f</sub>: Peso total final, PG: Peso total ganado, AC: Alimento consumido, FCA: Factor de conversión alimenticia, R: rendimiento.

## Concentración de nutrimentos en la solución acuapónica

Al final del ciclo de cultivo (28 ddt), las comparaciones de medias (Cuadro 11) mostraron que el contenido de  $\text{N-NO}_3^-$ ,  $\text{N-NH}_4^+$  y P no fueron diferentes entre tratamientos ( $P \leq 0.05$ ). El P en los sistemas acuapónicos tiende a ser limitante y puede ser suficiente o insuficiente dependiendo de la etapa de crecimiento del cultivo (Cerozi & Fitzsimmons, 2017), en este estudio su concentración en todos los tratamientos estuvo por debajo de lo reportado por Pineda-Pineda et al. (2018) y Delaide et al. (2016); sin embargo, su concentración en tejido foliar fue óptima.

La concentración de Mg fue mayor en el T4 ( $P \leq 0.05$ ), pero se mantuvo dentro del intervalo deseable para el cultivo de lechuga (Khater et al., 2024). En cuanto al Na, se encontraron concentraciones superiores a las óptimas ( $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) en todos los tratamientos. Las mayores concentraciones se presentaron en el T1 con un incremento del 148 % y en T4 225.4 % respecto al óptimo. La acumulación de Na en los sistemas acuapónicos es común y difícil de controlar debido a que entra al sistema como parte del alimento de los peces, en el agua corriente al reponer las pérdidas por la evapotranspiración (Delaide, 2016; Rakocy et al., 2006) y en este caso, el Na entró con los residuos del baño de sal (NaCl) aplicado a los peces en cada medición de las variables respuesta.

La concentración de Ca al final del experimento aumentó respecto a la concentración inicial de este nutrimento, 80 % en T1, 101 % en T2, 72 % en T3 y 96 % en T4. Los sistemas acuapónicos en general presentan niveles insuficientes de calcio (Schmautz et al., 2016) y en este caso la única fuente externa de este nutrimento fue la contenida en el agua corriente. El Cu y Fe fueron encontrados en los sistemas hidropónicos, pero no fueron detectables en los sistemas acuapónicos. Estas deficiencias se deben a que los requerimientos de estos iones metálicos en los peces son mínimos y por tanto bajos en el alimento de peces y, en consecuencia, también bajos en la solución acuapónica (Seawright et al., 1998), mientras que en los sistemas hidropónicos los nutrimentos son suministrados en cantidades ideales (Quillere et al., 1995). Por esta razón, el Cu y el Fe son micronutrimentos que no se acumulan significativamente en los sistemas acuapónicos y suelen ser complementados de manera foliar o con sales sintéticas (Rakocy, 2012).

Las diferencias en la concentración de los nutrientes en el efluente acuícola están relacionadas con la densidad de peces y la dosis de alimentación (Pantanella et al., 2012). Sin embargo, los nutrientes pueden ser menos disponibles para la planta a través de antagonismos químicos en el sistema y por un pH alto de la solución acuapónica que disminuye la disponibilidad de micro nutrientes (Yep & Zheng, 2019). Se ha encontrado que el crecimiento no es afectado fácilmente por la variación en concentración de un nutriente específico cuando las plantas se encuentran en condiciones donde las raíces están en contacto directo con la solución nutritiva, debido a que los nutrientes se pueden absorber de manera constante independientemente de la concentración de la solución nutritiva (Delaide et al., 2016), mientras la concentración de ese nutriente no sea menor a la requerida para alcanzar la velocidad máxima ( $I_{max}$ ) de absorción controlada por los transportadores de membrana en las células radicales (Coskun and White, 2023), pero, la concentración debe mantenerse por encima de ese mínimo requerido (Barber, 1979; 1984; Olsen, 1950).

**Cuadro 11.** Comparaciones de medias de la concentración de nutrientes ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) en el efluente acuícola al final del ciclo de cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*) (28 ddt).

| TRA                           | N-NH <sub>4</sub> | N-NO <sub>3</sub> | P     | K      | Ca       | Mg      | Na      | Mn      | Cu     | Fe     |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|-------|--------|----------|---------|---------|---------|--------|--------|
| $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ |                   |                   |       |        |          |         |         |         |        |        |
| 1                             | 3.97 a            | 60.4 a            | 7.0 a | 30.8 a | 164.4 ab | 37.4 cb | 134.0 a | 0.15 a  | 0.0 b  | 0.0 b  |
| 2                             | 4.15 a            | 56.6 a            | 5.3 a | 23.3 a | 132.4 b  | 28.8 c  | 83.9 b  | 0.11 ab | 0.0 b  | 0.0 b  |
| 3                             | 4.54 a            | 60.8 a            | 6.0 a | 30.7 a | 142.2 b  | 39.9 b  | 106.1 b | 0.06 b  | 0.0 b  | 0.0 b  |
| 4                             | 3.58 a            | 51.2 a            | 8.3 a | 25.6 a | 207.8 a  | 70.6 a  | 130.8 a | 0.14 ab | 0.07 a | 0.27 a |
| CV (%)                        | 20.98             | 19.10             | 49.23 | 42.84  | 31.25    | 18.520  | 16.03   | 54.61   | 116.04 | 126.63 |
| DMSH                          | 1.09              | 13.84             | 4.19  | 15.08  | 64.55    | 10.45   | 23.29   | 0.08    | 0.03   | 0.11   |

TRA: tratamiento, CV: coeficiente de variación, DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Medias con letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

### Concentración de nutrientes en tejido foliar

El análisis de varianza mostró diferencias significativas entre tratamientos en las concentraciones de nutrientes en tejido foliar. De acuerdo con las comparaciones de medias (Cuadro 12) al momento de la cosecha (28 ddt) las concentraciones más altas de N, P, K y Fe se observaron en el

T1 y T4, mientras que T2 y T3 presentaron las concentraciones más bajas; sin embargo, todas estuvieron dentro del intervalo óptimo a excepción del N el cual debió estar entre 4.0-5.0 % (Mills & Jones, 1996).

El Fe no fue detectable en el análisis químico de la solución acuapónica de los tratamientos T1, T2 y T3, debido a que las bajas concentraciones de este nutrimento en el efluente acuapónico fueron rápidamente absorbidas por las plantas; sin embargo, aunque se presentó en concentraciones óptimas en el tejido foliar, se observaron al final del experimento plantas con clorosis en T2. Plantas con niveles normales o altos de hierro total podrían presentar síntomas de deficiencia de hierro, ya que el hierro reducido ( $\text{Fe}^{2+}$ ) fisiológicamente activo en el tejido, se correlaciona con dichos síntomas (Katyal & Sharma, 1980).

El contenido foliar de Zn fue uno de los elementos con mayor variación con un CV de 28.8. El T2 y T3 presentaron las concentraciones más altas y T1 y T4 las más bajas respecto a su intervalo óptimo de 25-100  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  en lechuga. El Zn es un micro nutrimento importante en reacciones enzimáticas, su absorción esta influenciada por el pH y la concentración de P de la solución nutritiva (Gibson, 2007); sin embargo, a pesar de la insuficiencia de este elemento no se observaron síntomas de deficiencia en las hojas de las plantas de los tratamientos.

**Cuadro 12.** Comparación de medias de la concentración de nutrimentos en el tejido foliar al final del ciclo de cultivo de la lechuga (28 ddt).

| TRA    | N        | P       | K        | Ca     | Mg      | Na         | Zn                             | Fe        |
|--------|----------|---------|----------|--------|---------|------------|--------------------------------|-----------|
|        | %        |         |          |        |         |            | $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ |           |
| 1      | 2.5196 a | 0.689 a | 7.1225 a | 1.57 a | 0.533 b | 1.30667 a  | 10.98 b                        | 161.84 a  |
| 2      | 1.9704 b | 0.676 b | 5.5625 b | 1.68 a | 0.982 a | 0.98333 bc | 26.94 a                        | 122.04 bc |
| 3      | 1.7950 b | 0.485 c | 4.9504 b | 1.39 b | 0.553 b | 1.07333 b  | 22.43 a                        | 94.83 c   |
| 4      | 2.6288 a | 0.777 a | 7.1492 a | 1.27 b | 0.366 c | 0.86667 c  | 8.83 b                         | 161.56 ab |
| CV (%) | 15.31    | 10.66   | 11.33    | 9.69   | 14.27   | 10.81      | 28.8                           | 26.96     |
| DMSH   | 0.372    | 0.0763  | 0.765    | 0.1556 | 0.0947  | 0.125      | 5.433                          | 39.69     |

TRA: tratamiento, CV: coeficiente de variación, DMSH: diferencia mínima significativa honesta. Medias con letras iguales dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). La concentración de Na y Ca foliar se mantuvo dentro de los límites permisibles (1.0-4.0 y 1.2-2.0 %, respectivamente), aun cuando en el efluente acuapónico se mantuvieron por arriba de su concentración óptima (50 mg·L para Na y 180 mg·L para Ca). Los niveles altos de Na pueden interferir en la absorción de K y Ca. En lechuga, una disminución en la absorción de Ca causa quemadura en las puntas de las hojas, lo que hace que la planta no sea comercializable (Rakocy et al., 2006); sin embargo, esto no ocurrió en ninguno de los tratamientos, por lo que la lechuga estaría mostrando tolerancia a la concentración de Na contenida en la solución acuapónica al no acumularlo en exceso en el tejido foliar. De manera similar, Delaide et al. (2016) observaron una acumulación de Na sin que tuviera efecto negativo aparente en la lechuga, por lo que resaltan que es necesario estudiar más la tolerancia y asimilación del Na en sistemas acuapónicos, a fin de establecer su umbral de toxicidad.

En general, la acumulación de nutrimentos en tejido foliar fue afectada ( $P \leq 0.05$ ) por el subsistema hidropónico utilizado. Los resultados demostraron que los sistemas acuapónicos con subsistema hidropónico de cama de agregados (T1) lograron suministrar los nutrientes necesarios para que la lechuga acumulara nutrimentos de manera similar como lo hizo el sistema hidropónico (T4), esto puede deberse a que el subsistema hidropónico de cama en agregados contó con una mayor superficie específica para el establecimiento de bacterias (biofiltro) que en T2 y T3, donde el medio de crecimiento fue la propia solución nutritiva, lo que permitió una mejor mineralización de los desechos orgánicos de los peces en T1, es decir una transformación mayor y eficiente de los residuos a N mineral ( $\text{NO}_3$ ) (Ekc et al., 2019).

### **Crecimiento y desarrollo de lechuga**

Durante el ciclo de cultivo hubo un 100% de supervivencia de plantas en los diferentes tratamientos. Los caracteres de crecimiento evaluados durante la cosecha (28 DDT) de lechuga *Lactuca sativa* cv. Ruby Sky presentaron diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ) con excepción del diámetro de tallo. De acuerdo con las comparaciones de medias (Cuadro 13), la AP, PFPA, MSPA

y AF en el sistema acuapónico con cama de agregados (T1) fueron superiores en 14.9, 17.4, 25.2 y 19.9% respectivamente, comparado con el sistema hidropónico (T4).

El sistema radical de las plantas presentó la mayor longitud en el sistema acuapónico de balsa flotante (T2); sin embargo, el peso fresco de raíz y el volumen radical fue 26.7 y 13.5% mayor en NFT (T3). El crecimiento de la raíz incrementará la capacidad de absorción de agua y nutrientes, lo que favorece y mejora el crecimiento y rendimiento de las plantas (Thomas et al., 2021).

El desarrollo de las plantas está determinado por la disponibilidad de nutrientes en la zona radical y por niveles adecuados de oxígeno que están influenciados por la temperatura (Khater et al., 2024). Los datos registrados de AP, DT, PFPA y MSPA por Pineda-Pineda et al. (2018) para la misma variedad en un sistema acuapónico con cama de agregados fueron mayores en 9.7, 25.9, 20.4 y 17.8 %, respectivamente, a lo obtenido en este estudio.

La evaluación de clorofila mostró unidades SPAD similares ( $P<0.05$ ) entre el T1 y T4, mientras que las unidades más bajas correspondieron al T2. El contenido de clorofila en hojas es un indicador de la eficiencia de la fotosíntesis, estrés nutricional y estado de crecimiento de la planta (Kizil et al., 2012), por lo que la disminución de unidades SPAD en el T2 se relaciona con una disminución en la capacidad fotosintética y una nutrición deficiente que se corrobora en los caracteres de crecimiento que mostraron los valores más bajos en altura de la planta, área foliar y peso seco de parte aérea. La mayor área foliar se observó en T1 y podría atribuirse a condiciones de crecimiento más favorables y al desarrollo de un mayor número de hojas en comparación con los otros tratamientos (Weerakkody et al., 2002).

**Cuadro 13.** Comparación de medias de los caracteres de crecimiento de la lechuga al final del ciclo de cultivo (28 ddt).

| TRA    | AP<br>(cm) | PFFA<br>(g) | MSPA<br>(g) | AF<br>(cm <sup>2</sup> ) | US     | LR<br>(cm) | PFR<br>(g) | MSR<br>(g) | VR<br>(mL) | R<br>(kg·m <sup>-3</sup> ) |
|--------|------------|-------------|-------------|--------------------------|--------|------------|------------|------------|------------|----------------------------|
| 1      | 29.0 a     | 228.7 a     | 10.9 a      | 3707.4 a                 | 30.0 a | 21.2 b     | 18.5 b     | 1.0 b      | 24.2 ab    | 6.7 a                      |
| 2      | 19.1 c     | 88.5 c      | 5.6 c       | 1168.9 c                 | 14.0 c | 37.5 a     | 17.7 b     | 1.2 a      | 21.9 b     | 2.4 b                      |
| 3      | 17.5 c     | 103.1 c     | 6.4 c       | 1512.4 c                 | 17.4 b | 18.0 c     | 24.1 a     | 1.4 a      | 25.3 a     | 3.0 b                      |
| 4      | 24.7 b     | 189.0 b     | 8.1 b       | 2968.7 b                 | 28.5 a | 19.4 bc    | 18.2 b     | 0.9 b      | 24.1 ab    | 5.5 a                      |
| CV (%) | 7.49       | 9.99        | 14.69       | 14.58                    | 8.14   | 10.47      | 21.81      | 20.46      | 10.49      | 19.54                      |
| DMSH   | 2.457      | 24.311      | 1.407       | 371.920                  | 1.994  | 2.743      | 4.661      | 0.250      | 2.731      | 2.310                      |

TRA: tratamiento, CV: coeficiente de variación, DMSH: Diferencia mínima significativa, AP: altura de la planta, PFFA: peso fresco de parte aérea, MSPA: materia seca de parte aérea, AF: área foliar, US: unidades SPAD, LR: longitud de raíz, PFR: peso fresco de raíz, MSR: materia seca de raíz, VR: Volumen radical, R: Rendimiento.

El mayor rendimiento o producción de lechuga por m<sup>2</sup>, así como el mayor peso fresco por planta se registró en el sistema acuapónico con cama de agregados (6.7 kg·m<sup>-2</sup> y 228.7 g·planta<sup>-1</sup>, respectivamente) y el sistema hidropónico convencional (5.5 kg·m<sup>-2</sup> y 189.0 g·planta<sup>-1</sup>), los cuales fueron iguales con base en las comparaciones de medias ( $P>0.05$ ), seguido del sistema acuapónico con NFT (3.0 kg·m<sup>-2</sup> y 103.1 g·planta<sup>-1</sup>, respectivamente) y el sistema de balsa flotante (2.6 kg·m<sup>-2</sup> y 88.5 g·planta<sup>-1</sup>). Lechugas cv. Ruby Sky cultivadas en un sistema acuapónico cama de agregados exhibieron un peso fresco por planta (287.3 g·planta<sup>-1</sup>) mayor al registrado en este estudio (Pineda-Pineda, 2018). El aumento en el peso fresco puede estar relacionado con una mayor actividad fotosintética, lo que favorece la acumulación de biomasa y un mejor crecimiento, también puede atribuirse a un sistema radical más desarrollado que optimizó la absorción de nutrimentos (Hao & Papadopoulos, 2002).

Los resultados de este estudio concuerdan con la comparación entre subsistemas hidropónicos que describió Lenard y Leonard (2006), quienes encontraron un mayor rendimiento en el subsistema

de cama de agregados ( $5.05 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ). En contraste, el cultivo de lechuga cv. Grosse Blonde Paresseuse y albahaca en un sistema acuapónico de cama de agregados con bolas de arcilla no fue eficiente debido a una disminución del flujo de agua alrededor de las raíces, que redujo la disponibilidad y absorción de nutrimentos, además la carga negativa de la arcilla pudo adsorber nutrientes haciéndolos menos disponibles (Delaide et al., 2017).

Por lo tanto, con base en el rendimiento y crecimiento de peces y plantas, la acumulación de nutrientes en tejido foliar y en la solución acuapónica, el presente estudio mostró que la acuaponía con subsistema hidropónico de cama de agregados fue tan productiva como el sistema hidropónico convencional para el cultivo de lechuga, por lo que el subsistema hidropónico sí afectó el rendimiento de la lechuga.

Aunque existieron factores como el derrame de agua que tuvo un efecto en la CE y en la concentración de algunos nutrimentos, la causa principal de los resultados observados fue la eficiencia de los sistemas acuapónicos. Por ejemplo, el subsistema de balsa flotante contenía un volumen de agua (470 L) mayor que en NFT (183 L) y cama de agregados (220 L) por lo que algunos nutrimentos (Fe, Mn, Cu) pueden haber estado en menor concentración en la solución acuapónica y haber actuado como factor limitante. Cabe destacar que se observaron sólidos sedimentados en los sistemas acuapónicos con subsistema NFT y balsa flotante, por ende, sólidos adheridos a las raíces de las plantas. Esto puede deberse a una disminución en la eficiencia del biofiltro de estos dos sistemas, ya que su tamaño fue 62% más pequeño que el del subsistema de cama de agregados (función de biofiltro y sustrato para plantas). Asimismo, la acumulación de partículas en las raíces de las plantas puede crear zonas anaeróbicas que impiden la absorción de nutrimentos (Rakocy, 2006).

Identificar el sistema acuapónico idóneo depende de factores como el crecimiento y rendimiento del cultivo (plantas y organismos acuáticos), la acumulación de nutrimentos, el tipo de filtros utilizados, prácticas de manejo, costo del subsistema hidropónico y de operación, escala de producción, entre otras (Hussain & Brown, 2024; Lennard & Leonard, 2006; Maucieri et al., 2018; Yep & Zheng, 2019).

## **Conclusiones**

El sistema acuapónico con subsistema hidropónico de cama de agregados (T1) fue eficiente y tuvo un crecimiento de lechuga superior y un rendimiento comparable al sistema hidropónico convencional (T4). Los resultados más bajos en crecimiento y rendimiento de lechuga, concentración de nutrimentos en tejido foliar y en el efluente acuapónico se observaron en el sistema acuapónico con balsa flotante y NFT. No obstante, el crecimiento y supervivencia de los peces no se vieron afectados por el sistema acuapónico independientemente del subsistema hidropónico.

## **Declaración de conflictos de intereses**

Los autores declaramos que no tenemos conflictos de intereses económicos ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

## Referencias

- Abdel-Tawwab, M., & Ahmad, M. H. (2009). Effect of dietary protein regime during the growing period on growth performance, feed utilization and whole-body chemical composition of Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.). *Aquaculture Research*, 40, 152-1537. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2009.02254.x>
- Al Hafedh, Y. S. (1999). Effects of dietary protein on growth and body composition of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L. *Aquaculture Research*, 30, 385-393. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2109.1999.00343.x>
- Barber, S. A. (1979). Growth requirement for nutrients in relation to demand at the root surface. In: Harley, J. L., Scott-Russell, R. (Eds.). *The Soil-Root Interface*. Academic Press, London and Orlando, pp. 5-20.
- Barber, S.A. (1984). *Soil Nutrient Bioavailability*. John Wiley and Sons, New York, NY, USA.
- Castillo-Castellanos, D., Zavala-Leal, I., Ruiz-Velazco, J. M. J., Radilla-García, A., Nieto-Navarro, J. T., Romero-Bañuelos, C. A., & González-Hernández, J. (2015). Implementation of an experimental nutrient film technique-type aquaponic system. *Aquaculture Internacional*, 24, 637-646. <https://doi.org/10.1007/s10499-015-9954-z>
- Cerozi, B. S., & Fitzsimmons, K. (2017). Phosphorus dynamics modeling and mass balance in aquaponics system. *Agricultural Systems*, 153, 94-100. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.020>
- Coskun, D. and P. J. White. (2023). Chapter 2. Ion-uptake mechanisms of individual cells and roots: short-distance transport. In: Rengel, Z., Cakmak, I., & White, P. J. (Eds.), *Marschner's mineral nutrition of plants* (4th ed., pp. 11-71). Academic Press.
- Delaide, B., Delhay, G., Dermience, M., Gott, J., Soyeurt, H., & Jijakli, M. H. (2017). Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF Box, a small-scale aquaponic system. *Aquacultural Engineering*, 78, Part B, 130-139. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.06.002>
- Delaide, B., Goddek, S., Gott, J., Soyeurt, H. & Jijakli, S. H. (2016). Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. Sucrine) growth performance in complemented aquaponic solution outperforms hydroponics. *Water*, 8(10), Article 467. <https://doi.org/10.3390/w8100467>

- Eck, M., Körner, O., & Jijakli, M. H. (2019). Nutrient cycling in aquaponics systems. In S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, & G. M. Burnell (Eds.), *Aquaponics food production systems* (pp. 231-246). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_9)
- El-Sayed, A. F. M. (2020). *Tilapia culture* (2nd ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816509-6.00004-5>
- Endnut, A., Jusoh, A., Ali, N., Wan Nik, W. B., & Hassan, A. (2009). A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. *Bioresource Technology*, 101(1), 1511-1517. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.040>
- Fry, J. P., Mailloux, N. A., Love, D. C., Milli, M. C., & Cao, L. (2018). Feed conversion efficiency in aquaculture: do we measure it correctly?. *Environmental Research Letters*, 13, Article 024017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa273>
- Gibson, J. L. (2007). *Nutrient deficiencies in bedding plants*. Ball Publishing.
- Goda, A. M. A., Essa, M. A., Hassaan, M. S., & Sharawy, Z. (2015). Bio-economic features for aquaponic systems in Egypt. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 15, 525-532. <https://doi.org/10.4194/1303-2712-v15>
- Hao, X., & Papadopoulos, A. P. (2002). Growth, photosynthesis and productivity of greenhouse tomato cultivated in open or closed rockwool systems. *Canadian Journal of Plant Science*, 82(4), 771-780. <https://doi.org/10.4141/P01-113>
- Hosseini, H., Mozafari, V., Roosta, H. R., Shirani, H., van de Vlasakker, P. C. H., & Farhangi, M. (2021). Nutrient use in vertical farming: optimal electrical conductivity of nutrient solution for growth of lettuce and basil in hydroponic cultivation. *Horticulturae*, 7(9), Article 283. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7090283>
- Hussain, A. S., & Brown, P. B. (2024). A literature review of tilapia/lettuce aquaponics-production status, varieties, and research gaps. *Aquaculture Research*, 2024(1). <https://doi.org/10.1155/2024/2642434>
- Jackson, M. L. (1964). *Análisis químico de suelos*. Omega.
- Jones, B. J. R., Wolf, B., & Mills, B. H. (1991). *Plant analysis handbook: A practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide*. Micro-Macro Publishing.
- Katyal, J. C. and B. D. Sharma. (1980). A new technique of plant analysis to resolve iron chlorosis. *Plant and Soil* 55, 105–119. <https://doi.org/10.1007/BF02149714>

- Khater, E. S., Bahnasawy, A., Mosa, H., Abbas, W., & Morsi, O., (2024). Nutrient supply systems and their effect on the performance on the Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) and lettuce (*Lactuca sativa*) plant integration system. *Scientific Reports*, 14, Article 4229. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54656-y>
- Kizil, Ü., Genc, L., Inalpulat, M., Şapolyo, D., & Mirik, M. (2012). Lettuce (*Lactuca sativa* L.) yield prediction under water stress using artificial neural network (ANN) model and vegetation indices. *Zemdirbyste-Agriculture*, 99(4), 409-418. [https://zemdirbyste-agriculture.lt/99\(4\)tomas/99\\_4\\_tomas\\_str10.pdf](https://zemdirbyste-agriculture.lt/99(4)tomas/99_4_tomas_str10.pdf)
- Lennard, W. A., & Leonard, B. V. (2006). A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an aquaponic test system. *Aquaculture International*, 14, 539-550. <https://doi.org/10.1007/s10499-006-9053-2>
- Lennard, W., & Goddek, S. (2019). Aquaponics: The basics. In S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, & G. M. Burnell (Eds.), *Aquaponics food production systems* (pp. 113-143). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_5)
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmautz, Z., Sambo, P., & Borin, M. (2018). Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy*, 13(1012), 1-11. <https://doi.org/10.4081/ija.2017.1012>
- Mills, H. A., & Jones, J. B. Jr. (1996). *Plant analysis handbook II: A practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide*. Micro-Macro Publishing.
- Olsen, C. (1950). The significance of concentration on the rate of ion absorption by higher plants in water culture. *Physiologia Plantarum*, 3, 152-164. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1953.tb08453.x>
- Palm, H. W., Knaus, U., & Kotzen, B. (2023). Aquaponics nomenclature matters: It is about principles and technologies and not as much about coupling. *Reviews in Aquaculture*, 16(1), 473-490. <https://doi.org/10.1111/raq.12847>
- Pantarella, E., Cardarelli, M., Colla, G., Rea, E., & Marcucci, A. (2012). Aquaponics vs. hydroponics: Production and quality of lettuce crop. *Acta Horticulturae*, 927, 887–893. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.109>
- Pattillo, D. A. (2017). An overview of aquaponic systems: Hydroponic components. *NRAC Technical Bulletin Series*, 19, 1-10. [https://www.ncrac.org/files/inline-files/hydroponic\\_components.pdf](https://www.ncrac.org/files/inline-files/hydroponic_components.pdf)

- Pineda-Pineda, J., Valdez-Zamora, A., Miranda-Velázquez, I., Rodríguez-Pérez, J. E., Ramírez-Arias, J. A., & Lozano-Toledano, A. (2018). Yield of two cultivars of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in hydroponic and aquaponic systems. *Acta Horticulturae*, 1227, 347–354. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1227.43>
- Quillere, I., Marie, D., Roux, L., Gosse, F., & Morot-Gaudry, J. F. (1995). An artificial productive ecosystem based on a fish/bacteria/plant association. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 53(1), 19-30. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(94\)00551-O](https://doi.org/10.1016/0167-8809(94)00551-O)
- Rakocy, J. E. (2003). Aquaponics-Integrating fish and plant culture. In J. H. Tidwell (Ed.), *Aquaculture production systems* (pp. 343-386). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781118250105.ch14>
- Rakocy, J. E. (2012). Aquaponics-integrating fish and plant culture. In J. J. Tidwell (Ed.), *Aquaculture Production Systems* (1st ed., pp. 343-386). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118250105.ch14>
- Rakocy, J. E., Masser, M. P., & Losordo, T. M. (2006). *Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics-Integrating fish and plant culture* (Revision). SRAC Publication No. 454. <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/recirculating-aquaculture-tank-production-systems-aquaponics-integrating-fish-and-plant-culture.html>
- Schmautz, Z., Loeu, F., Liebisch, F., Graber, A., Mathis, A., Bulc, T. G., & Junge, R. (2016). Tomato productivity and quality in aquaponics: Comparison of three hydroponic methods. *Water*, 8, Article 533. <https://doi.org/10.3390/w8110533>
- Seawright, D., Stickney, R. R., & Walker, R. B. (1998). Nutrient dynamics in integrated aquaculture-hydroponics systems. *Aquaculture*, 160(3-4), 215-237. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(97\)00168-3](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00168-3)
- Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil*, 15(2), 134–154. <https://doi.org/10.1007/BF01347224>
- Stone, N. M., & Thomforde, H. K. (2004). *Understanding your fish pond water analysis report*. Cooperative Extension Program, University of Arkansas at Pine Bluff. [https://freshwater-aquaculture.extension.org/wp-content/uploads/2019/08/Understanding\\_Your\\_Fish\\_Pond\\_Water\\_Analysis\\_Report.pdf](https://freshwater-aquaculture.extension.org/wp-content/uploads/2019/08/Understanding_Your_Fish_Pond_Water_Analysis_Report.pdf)
- Stone, N. M., Engle, C. R., Kumar, G., Li, M. H., Hedge, S., Roy, L. A., Kelly, A. M., Dorman, L., & Recsetar, M. S. (2024). Factors affecting seed conversion ratios in US commercial

- catfish production ponds. *World Aquaculture Society*, 55(3), Article e13053. <https://doi.org/10.1111/jwas.13053>
- Tacon, A. G. J., & Metian, M. (2008). Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: trends and future prospects. *Aquaculture*, 285(1-4), 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.08.015>
- Thomas, T., Biradar, M. S., Chimmad, V. P., & Janagoudar, B. S. (2021). Growth and physiology of lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivars under different growing systems. *Plant Physiology Reports*, 26, 526-534. <https://doi.org/10.1007/s40502-021-00591-3>
- Velázquez-González, R. S., García-García, A. L., Ventura-Zapata, E., Barceinas-Sánchez, J. D. O., & Sosa-Savedra, J. C. (2022). A review on hydroponics and the technologies associated for medium- and small-scale operations. *Agriculture*, 12(5), 646. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050646>
- Weerakkody, W. A. P., Kumari, N. A. K. G. E., Bandara, W. M. S. M., Dris, R., & Oladele, O. I. (2002). Appropriate hydroponic systems for growing tropical leafy vegetables in greenhouse. *Nigerian Journal of Horticultural Science*, 7(1), 18–21. <https://doi.org/10.4314/njhs.v7i1.3330>
- Yang, T., & Kim, H. J. (2019). Nutrient management regime affects water quality, crop growth, and nitrogen use efficiency of aquaponic systems. *Scientia Horticulturae*, 256(15), Article 108619. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108619>
- Yang, T., & Kim, H. J. (2020). Comparisons of nitrogen and phosphorus mass balance for tomato, basil-, and lettuce-based aquaponic and hydroponic systems. *Journal of Cleaner Production*, 274(20), Article 122619. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122619>
- Yep, B., & Zheng, Y. (2019). Aquaponic trends and challenges: a review. *Journal of Cleaner Production*, 228(10), 1586-1599. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.290>

## **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES GENERALES**

Los resultados de este estudio mostraron que la inoculación de semillas con el consorcio bacteriano no tuvo efecto sobre la concentración de nutrimentos en el tejido foliar de las plántulas; sin embargo, generó efectos negativos sobre el porcentaje de emergencia, altura de planta y longitud de raíz, debido probablemente a la incompatibilidad de las bacterias con los exudados de la raíz de la lechuga cultivada, lo que no habría permitido la acción de ninguna de las propiedades de promoción de crecimiento por parte de las bacterias.

En cuanto a la comparación de los tres sistemas acuapónicos con sus variantes en el sistema hidropónico, se registró un aumento en rendimiento, crecimiento de la parte aérea, concentración de nutrimentos en tejido foliar de N, P, K, Ca y Fe en las plantas cultivadas en cama de agregados comparado con balsa flotante y NFT, por lo que se observó la siguiente relación: cama de agregados > NFT > balsa flotante. El sistema acuapónico con cama de agregados tuvo un crecimiento superior y un rendimiento similar al sistema hidropónico convencional, lo que destaca la eficiencia de los cultivos acuapónicos y su potencial como sistemas de producción sustentable.

Durante el desarrollo del cultivo fue posible observar partículas sólidas en la solución acuapónica de los sistemas con balsa flotante y NFT por lo que se sugiere mejorar el sistema de filtración para evitar daño en las raíces de las plantas cultivadas y evitar una disminución en el rendimiento vegetal y problemas con la calidad del efluente o solución acuapónica.

Los subsistemas hidropónicos con cultivo en cama de agregados, balsa flotante y NFT no tuvieron efecto en el crecimiento y supervivencia de los peces; sin embargo, con base en el factor de conversión alimenticia se identificó que es necesario mejorar las prácticas de alimentación para que la producción de tilapia sea más rentable y se disminuya el gasto en alimento.