



**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

**DG** Dirección General  
de Investigación  
Universidad de San Carlos de Guatemala

---

## **Informe final de Proyecto de Investigación**

**DIGI-PUI-004**

**Informe final de proyecto de investigación**

**Universidad de San Carlos de Guatemala**

**Dirección General de Investigación**

**Programa Universitario de Investigación en Alimentación y Nutrición -PRUNIAN-**

**Evaluación del aprovechamiento y uso del fósforo adsorbido en organoarcillas por plantas de berro  
(*Nasturtium officinale*) en cultivos hidropónicos**

**Unidad avaladora: Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas -IIQB.**

**4.8.63.6.77**

**Nombre del coordinador:**

**M.Sc. Erick Giovanni Estrada Palencia**

**Guatemala, 27 de febrero de 2026**



---

## Informe final de Proyecto de Investigación

### Contraportada

#### Autoridades de la Dirección General de Investigación

Dra. Alice Patricia Burgos Paniagua

Directora General de Investigación

Inga. Liuba María Cabrera

Coordinador(a) del Programa Universitario de Investigación

#### Autores

Erick Giovanni Estrada Palencia

Ana Luisa Isabel Droege Romero

Luis Bayron Macu Ajsivinac

Levis Efrain Donado Vivar

Colaboradores:

Dr. Mischa Zelzer, Nottingham University

Renato Rodolfo Rivera, Universidad del Valle de Guatemala

El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada con recursos del Fondo de Investigación de la DIGI de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la partida presupuestaria número: 4.8.63.6.77 en el Programa Universitario de Investigación en Alimentación y Nutrición -PRUNIAN-.

Los autores son responsables del contenido, de las condiciones éticas y legales de la investigación desarrollada.

**Este informe está licenciado bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).**

Puede copiarse, distribuirse y adaptarse con la condición de dar crédito a los autores, no usarlo con fines comerciales y compartir cualquier obra derivada bajo la misma licencia.

Para más información, visite: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>.



## Informe final de Proyecto de Investigación

### Índice general

|                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Resumen.....</b>                                                           | <b>4</b>  |
| <b>Palabras clave .....</b>                                                   | <b>4</b>  |
| <b>Abstract .....</b>                                                         | <b>4</b>  |
| <b>Keywords .....</b>                                                         | <b>5</b>  |
| <b>1. Introducción.....</b>                                                   | <b>5</b>  |
| <b>2. Contexto de la investigación .....</b>                                  | <b>5</b>  |
| <b>3. Revisión de literatura.....</b>                                         | <b>6</b>  |
| <b>4. Planteamiento del problema.....</b>                                     | <b>11</b> |
| <b>5. Objetivos.....</b>                                                      | <b>12</b> |
| <b>6. Hipótesis.....</b>                                                      | <b>12</b> |
| <b>7. Método .....</b>                                                        | <b>13</b> |
| 7.1. Tipo de investigación. ....                                              | 13        |
| 7.2. Enfoque y alcance de la investigación. ....                              | 13        |
| 7.3. Diseño de la investigación. ....                                         | 14        |
| 7.4. Población, muestra y muestreo. ....                                      | 14        |
| 7.5. Técnicas.....                                                            | 14        |
| 7.6. Resumen de las variables o unidades de análisis. ....                    | 26        |
| 7.7. Procesamiento y análisis de la información .....                         | 27        |
| <b>8. Resultados y discusión .....</b>                                        | <b>28</b> |
| <b>9. Propiedad intelectual.....</b>                                          | <b>50</b> |
| <b>10. Beneficiarios directos e indirectos .....</b>                          | <b>50</b> |
| <b>11. Estrategia de divulgación y difusión de los resultados.....</b>        | <b>50</b> |
| <b>12. Contribución a las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND).....</b> | <b>51</b> |
| <b>13. Vinculación.....</b>                                                   | <b>52</b> |
| <b>14. Conclusiones.....</b>                                                  | <b>52</b> |
| <b>15. Recomendaciones.....</b>                                               | <b>52</b> |



## Informe final de Proyecto de Investigación

|                                                                                                                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Referencias.....</b>                                                                                                                                           | <b>53</b> |
| <b>Apéndice.....</b>                                                                                                                                              | <b>59</b> |
| <b>Declaración del coordinador (a) del proyecto de investigación .....</b>                                                                                        | <b>64</b> |
| <b>Aval del director (a) del instituto, centro, unidad o departamento de investigación o coordinador de investigación del centro regional universitario .....</b> | <b>64</b> |
| <b>Recepción de la Dirección General de Investigación .....</b>                                                                                                   | <b>64</b> |

## Índice de Figuras

|                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Sistemas hidropónicos.....                                                                                                             | 7  |
| Figura 2. Filtración de arcilla tratada por activación ácida. ....                                                                               | 15 |
| Figura 3. Arcilla recuperada y en proceso de secado.....                                                                                         | 16 |
| Figura 4. Preparación de las soluciones de L-histidina y ninhidrina.....                                                                         | 17 |
| Figura 5. Equipo espectrofotómetro UV-Vis, utilizado para la determinación cuantitativa de los remanentes de L-histidina en solución. ....       | 17 |
| Figura 6. Saturación con fósforo de la arcilla funcionalizada. ....                                                                              | 18 |
| Figura 7. Ensamblaje y montaje de sistemas hidropónicos en el área designada. ....                                                               | 19 |
| Figura 8. Soluciones stock de nutrientes para las soluciones nutritivas de los sistemas hidropónicos. ....                                       | 21 |
| Figura 9. Germinación de las plantas de berro en esponjas. ....                                                                                  | 22 |
| Figura 10. Monitoreo de parámetros de control en las soluciones nutritivas. ....                                                                 | 23 |
| Figura 11. Arcilla activada y seca para su funcionalización. ....                                                                                | 29 |
| Figura 12. Soluciones para la curva de calibración para la cuantificación de L-histidina remanente en solución a distintas concentraciones. .... | 29 |
| Figura 13. Curva de calibración corregida para la cuantificación de L-histidina remanente en solución a distintas concentraciones.....           | 30 |
| Figura 14. Soluciones para la curva de calibración para la cuantificación de fósforo en solución a distintas concentraciones. ....               | 30 |
| Figura 15. Curva de calibración del método molibdato/metavanadato. ....                                                                          | 31 |
| Figura 16. Etapa de crecimiento de las plantas de berro dentro de los sistemas hidropónicos.....                                                 | 32 |
| Figura 17. Plantas cosechadas al término de la fase de crecimiento. ....                                                                         | 33 |
| Figura 18. Cinética química del pH de los sistemas por semanas.....                                                                              | 36 |
| Figura 19. Cinética de la conductividad por sistema por semana. ....                                                                             | 37 |
| Figura 20. Estabilidad y Variabilidad entre réplicas del pH. ....                                                                                | 39 |
| Figura 21. Estabilidad y variabilidad entre réplicas de la conductividad eléctrica.....                                                          | 40 |
| Figura 22. Correlación entre pH y Conductividad por sistema. ....                                                                                | 42 |
| Figura 23. Correlación longitud vs. pH. ....                                                                                                     | 47 |
| Figura 24. Correlación longitud vs. CE. ....                                                                                                     | 47 |



## Informe final de Proyecto de Investigación

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 25. Cosecha de plantas previo a liofilizar.....                                                      | 49 |
| Figura 26. Prueba de arcilla.....                                                                           | 59 |
| Figura 27. Pruebas de llenado en sistemas hidropónicos.....                                                 | 59 |
| Figura 28. Semillas de berro utilizadas.....                                                                | 60 |
| Figura 29. Potenciómetro para la medición de pH de soluciones nutritivas para su monitoreo diario.<br>..... | 60 |
| Figura 30. Medición de conductividad eléctrica en soluciones nutritivas para su monitoreo diario.           | 61 |
| Figura 31. Sistemas hidropónicos bajo sistema de iluminación instalado para su crecimiento.....             | 62 |
| Figura 32. Plantas de berro en sistemas hidropónicos.....                                                   | 63 |

## Índice de tablas

|                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Diseño experimental de sistemas hidropónicos .....                                                                                                                     | 20 |
| Tabla 2. Preparación de la solución nutritiva. ....                                                                                                                             | 20 |
| Tabla 3. Altura de las plantas por cada sistema tratado. ....                                                                                                                   | 24 |
| Tabla 4. Objetivos, variable, instrumentos y unidad de medida o cualificación utilizada en la<br>investigación. ....                                                            | 26 |
| Tabla 5. Resumen del crecimiento de las plantas en centímetros en los sistemas hidropónicos.<br>Valores de tamaño reportados en centímetros para cada experimento (S1-S8). .... | 33 |
| Tabla 6. Valores promedio de las cinéticas químicas del pH.....                                                                                                                 | 34 |
| Tabla 7. Valores promedio de la cinética química de la conductividad eléctrica.....                                                                                             | 36 |
| Tabla 8. Coeficiente de Variación (%) entre réplicas del pH.....                                                                                                                | 38 |
| Tabla 9. Coeficiente de variación entre réplicas de la conductividad eléctrica.....                                                                                             | 39 |
| Tabla 10. Coeficientes de Correlación de Pearson por sistema. ....                                                                                                              | 40 |
| Tabla 11. Análisis de varianza para el pH entre los sistemas.....                                                                                                               | 42 |
| Tabla 12. Análisis de varianza para la altura de las plantas.....                                                                                                               | 43 |
| Tabla 13. Análisis de Varianza de Welch para la altura de las plantas.....                                                                                                      | 44 |
| Tabla 14. Estadísticos descriptivos y supervivencia.....                                                                                                                        | 44 |
| Tabla 15. Comparaciones con el control (S5) – Sistemas con diferencias significativas.....                                                                                      | 45 |
| Tabla 16. Comparaciones con el control (S5)- Sistemas sin diferencias significativas.....                                                                                       | 45 |
| Tabla 17. Comparación Bentonitas vs Arenas.....                                                                                                                                 | 46 |



## Informe final de Proyecto de Investigación

### Resumen

El uso excesivo de fertilizantes fosforados ha llevado a través de las últimas décadas al deterioro y eutrofización de los cuerpos de agua. Esto ha conducido a la búsqueda de nuevos métodos de cultivo cuyo sistema provea de una eficiente gestión de los nutrientes y que eviten el uso de suelo. En este contexto, la hidroponía resulta ser un método de cultivo que cumple con dichas características. La investigación realizada buscó evaluar y desarrollar un método de fertilización usando organoarcillas saturadas con fósforo como fertilizantes de liberación controlada para el cultivo hidropónico de berro (*Nasturtium officinale*), optimizando su rendimiento y calidad nutricional y a la vez disminuir el impacto ambiental del fertilizante. El objetivo general fue evaluar la efectividad de estos materiales como fuente de macronutrientes. Para ello, se determinó la capacidad de saturación y la tasa de liberación del fósforo. La investigación de tipo experimental se basó en un enfoque mixto con técnicas cualitativas y cuantitativas para lo cual se utilizaron kits para cultivo hidropónico doméstico, se tenía contemplado el uso cromatografía líquida de alta presión (HPLC), se utilizó espectrofotometría UV – visible, horno para secado, liofilizadora, potenciómetros, conductímetros, lámparas para cultivo y equipo de laboratorio en general.

La investigación se realizó con el financiamiento de la Dirección General de Investigación de la Universidad de San Carlos de Guatemala, el aval del Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas IIQB de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia y la colaboración de Renato Rodolfo Rivera de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Valle de Guatemala y del Dr. Mischa Zelzer de la Universidad de Nottingham de Reino Unido.

### Palabras clave

|               |              |            |            |            |
|---------------|--------------|------------|------------|------------|
| 1. Hidroponía | 2. Nutrición | 3. Fósforo | 4. Arcilla | 5. Cultivo |
|---------------|--------------|------------|------------|------------|

### Abstract

The excessive use of phosphorus fertilizers has led to the deterioration and eutrophication of water bodies over the last few decades. This has prompted the search for new cultivation methods that provide efficient nutrient management and avoid the use of soil. In this context, hydroponics has emerged as a cultivation method that meets these criteria. This research aimed to evaluate and develop a fertilization method using phosphorus-saturated organoclays as controlled-release fertilizers for the hydroponic cultivation of cress (*Nasturtium officinale*), optimizing its yield and nutritional quality while simultaneously reducing the environmental impact of the fertilizer. The overall objective was to evaluate the effectiveness of these materials as a source of macronutrients. To this end, the saturation capacity and phosphorus release rate were determined. The experimental research employed a mixed-methods approach, combining qualitative and quantitative techniques. Home hydroponic cultivation kits were used, along with high-performance liquid chromatography (HPLC), UV-visible spectrophotometry, a drying oven, a freeze dryer, potentiometers, conductivity meters, grow lights, and general laboratory equipment.



## Informe final de Proyecto de Investigación

The research was funded by the General Directorate of Research of the University of San Carlos of Guatemala, endorsed by the Institute of Chemical and Biological Research (IIQB) of the Faculty of Chemical Sciences and Pharmacy, and conducted in collaboration with Renato Rodolfo Rivera of the Faculty of Agronomy at the University of the Valley of Guatemala and Dr. Mischa Zelzer of the University of Nottingham, United Kingdom.

### Keywords

|                |              |               |         |                |
|----------------|--------------|---------------|---------|----------------|
| 1. Hydroponics | 2. Nutrition | 3. Phosphorus | 4. Clay | 5. Cultivation |
|----------------|--------------|---------------|---------|----------------|

## 1. Introducción

La investigación realizada abordó uno de los problemas actuales derivados del uso excesivo de fertilizantes fosforados, el cual ha generado degradación de suelos y desequilibrios en cuerpos de agua, lo cual compromete la sostenibilidad de la producción alimentaria. Ante la creciente demanda de nutrientes y la necesidad de seguridad alimentaria local y global, se han desarrollado estrategias para el uso y aprovechamiento eficiente del fósforo ya que este nutriente posee una baja tasa de absorción en los cultivos, pero a la vez una alta solubilidad cuando este se transforma en especies de utilidad biológica en el suelo y agua. Estas estrategias incluyen fertilizantes de liberación lenta, fijación en matrices dinámicas y recuperación desde residuos (Biswas Chowdhury & Zhang, 2021; Li et al., 2021). Estudios previos han demostrado la capacidad de las organoarcillas para retener fósforo de forma regenerativa, evidenciando su potencial como fertilizantes inteligentes. (Estrada Palencia, et al., 2022)

En este contexto, la investigación evaluó el uso de organoarcillas saturadas con fósforo en sistemas hidropónicos buscando optimizar la gestión del nutriente y reducir pérdidas ambientales, partiendo que el uso de organoarcillas en agricultura es tecnología destacada por su eficiencia en el control de nutrientes (Aguilera Peña, 2020; Modu et al., 2020). El objetivo principal fue evaluar su efectividad en el cultivo de berro (*Nasturtium officinale*), analizando su desarrollo, composición nutricional y producción de compuestos bioactivos, contribuyendo así a sistemas agrícolas sostenibles y a la seguridad alimentaria global

## 2. Contexto de la investigación

El estudio se desarrolló en un periodo de 10 meses, de febrero a noviembre de 2025, en distintos espacios académicos de Guatemala, incluyendo el Laboratorio de Físicoquímica de la Escuela de Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro de Estudios Agrícolas y Alimentarios de la Universidad del Valle de Guatemala y la Unidad de Análisis Instrumental del Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas.



## **Informe final de Proyecto de Investigación**

La parte experimental se realizó bajo condiciones controladas de laboratorio, ya que la Facultad de Farmacia no cuenta con un invernadero techado. Se instalaron los kits de hidroponía en un laboratorio cerrado a una temperatura de entre 23 – 27 °C. El pH y electroconductividad de las soluciones fueron monitoreadas a diario y la intensidad lumínica se mantuvo en un ciclo diario constante para los sistemas de cultivo. Posteriormente se cosecharon las plantas de los diferentes sistemas y fueron liofilizadas, pesadas y almacenadas para su posterior análisis.

La población meta para este estudio son comunidades que realicen proyectos de sostenibilidad y agricultura alternativa en Guatemala y se espera los resultados obtenidos puedan aplicarse a diversas condiciones de cultivo hidropónico a nivel doméstico como industrial y sostenible.

### **3. Revisión de literatura**

#### **3.1. Seguridad alimentaria**

El ritmo creciente de la sociedad humana ha traído consigo una de las mayores pruebas, aun sin solucionar, para el año 2050 la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) estima una población global de 9 billones de personas (United Nations for Food and Agriculture Organization (FAO)), s. f.), satisfacer esta demanda de alimentos ricos en nutrientes implica aun aumento sustancial en los niveles de producción. De forma paralela, el World Resource Institute (WRI) establece ciertas metas que deben de cumplirse para el año 2050, con el objetivo de establecer una sociedad sostenible (Ranganathan et al., 2018):

- 1) Aumentar la producción de alimentos a nivel global en un 56%
- 2) Prevenir la expansión de la agricultura en suelos, para salvar áreas forestales de gran importancia (actualmente se destina cerca del 50% de tierra útil en cultivos destinados a alimentación)
- 3) Reducir las emisiones globales en un 67%

Las estrategias para asegurar un estado de seguridad alimentaria son diversas y multifactoriales desde acciones preventivas, dietas sostenibles, disponibilidad de alimentos, entre otras. En Guatemala la legislación vigente desde 2005 establece el derecho de toda persona a tener acceso físico, económico y social de forma permanente a una alimentación adecuada, tanto en calidad como cantidad, esto a derivado en múltiples intervenciones y mejoras a diversas instituciones del país que velan por el apartado de seguridad alimentaria y nutricional. El suministro de alimentos debe ser adecuado a escalas nacional, regional y/o local, estas fuentes pueden ser producciones familiares o comerciales, incluyendo reservas, importación y asistencia alimentaria (Sesan, 2019).

## Informe final de Proyecto de Investigación

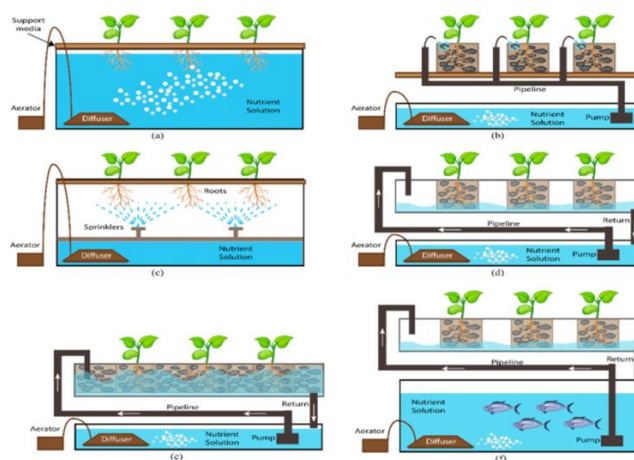
A pesar de la legislación vigente y las múltiples intervenciones y actores involucrados en Guatemala prevalece la inseguridad alimentaria a nivel moderado y severo, incluyendo entre los países con escala en el IGH (Índice Global del Hambre) (Situación SAN, s. f.). Esto resalta la necesidad de establecer sistemas de producción agrícolas menos dependientes del suelo útil, que permitan transformar y gestionar de manera eficiente los recursos nutricionales (FAO, s. f.).

### 3.2. Introducción al cultivo hidropónico

El termino hidroponía proviene de las palabras “hidro” (agua) y ponos (trabajo), haciendo alusión al trabajo realizado por el agua y diversos componentes o sales disueltas que permiten suplir los requerimientos nutricionales de diversos cultivos, esta técnica permite producir cultivos principalmente herbáceos, controlando las condiciones de temperatura, humedad, nutrientes y luminosidad (Aguilera-Peña, 2020).

En esta técnica de cultivo se utilizan sustratos como soportes de crecimiento, posicionados de tal manera que las raíces pueden obtener nutrientes de una solución química formulada con anterioridad. Los diferentes métodos hidropónicos varían en la estructura del sistema esto en función de los objetivos y condiciones operativas, así como: clima, espacio, cultivos, presupuesto, y otros factores. La Figura 1 ilustra los diferentes tipos de sistemas hidropónicos de mayor relevancia.

Figura 1. Sistemas hidropónicos.



*Nota:* imágenes de: A) Sistema de raíz flotante. B) Sistema de goteo. C= Sistema aeropónico. D) Técnica de film de nutrientes. E) Sistema de inundación y drenaje. F) Sistema acuapónico.

Tomado de (Velazquez-Gonzalez et al., 2022)



## Informe final de Proyecto de Investigación

La creciente demanda de alimentos ha impulsado el desarrollo eficiente de técnicas hidropónicas, pues presentan mejoras en eficiencia y sostenibilidad, con el auge de tecnologías de conectividad se ha impulsado el término de Agricultura 4.0, que hace uso de tecnologías como Inteligencia Artificial, Internet of Things y Big Data, integrándolas a sistemas de producción de alimentos de forma autónoma (Liu et al., 2020).

### 3.3. Importancia del Berro (*Nasturtium officinale*)

*Nasturtium officinale* es una planta perenne nativa de Europa y Asia, pertenece a la familia Brassicaceae que puede crecer en áreas acuáticas o cercanas a ella (USDA Plants Database, s. f.). Actualmente se cultiva a nivel casi mundial y es comercializado principalmente fresco, se utiliza de forma culinaria en sopas, ensaladas y otras recetas, los metabolitos secundarios principales encontrados en el berro incluyen: polifenoles, glucosinolatos y carotenoides, en comparación con otras plantas posee una de las mayores densidades de nutrientes y metabolitos por caloría (Faizy et al., 2021), además de exhibir propiedades antibacterianas y antioxidantes, lo cual lo convierte en un candidato potencial para la investigación en medicina natural (Zafar et al., 2017).

El berro requiere condiciones de acidez entre 6.5 a 7.5 en la escala de pH, condiciones lumínicas altas y una adecuada separación entre plantas, uno de los inconvenientes en la producción es su alta dependencia de fósforo para su crecimiento adecuado, lo cual implica la utilización de fertilizantes altamente solubles basados en fosfatos para obtener cultivos de berro en condiciones adecuadas para su consumo, se estima que la producción de berro aporta un 5.4% de la carga de fósforo vertida a ríos (Hibbert et al., 2023; Utah State University, s. f.).

### 3.4. Papel del fósforo en la agricultura y el medio ambiente

Aunque la tierra contiene una gran cantidad de fósforo comparado con la biomasa de las plantas, solo una pequeña fracción está en manera biodisponible para que las plantas y microorganismos puedan aprovecharlo (Helfenstein et al., 2024). Una de las fuentes iniciales del fósforo globalmente es por medio de la liberación de minerales de apatita, donde el fósforo se hace soluble y biodisponible por la deterioración del mineral mencionado (Filippelli, 2002). El fósforo es un nutriente irremplazable en el ciclo de crecimiento de las plantas, de hecho en el siglo XX se observó una relación directa entre la explotación de fósforo y el aumento de la producción agrícola, todo esto aunque bueno en principio es una paradoja que hace que la abundancia de algo de gran importancia como los fertilizantes de fósforo lleven a una gran producción de alimentos pero, a su vez al no ser el fósforo eficientemente absorbido por las plantas para su uso como nutriente y al ser sus compuestos de utilidad biológica altamente solubles se convierten en un contaminante difícil de controlar.



## **Informe final de Proyecto de Investigación**

en los cuerpos de agua que al estar disponible en grandes cantidades puede conducir a la eutrofización de los mismos.

La mayoría de los suelos es deficiente de especies de fósforo disponible para el crecimiento de las plantas por lo que es necesario adicionar especies fosforadas que ayuden a las plantas a que este elemento esté disponible para su uso. Sin embargo, en cultivos en suelo se presenta el problema de la casi inmediata fijación del fósforo en las raíces y su interacción con otros nutrientes lo que disminuye la tasa de disponibilidad del elemento para la planta. Se considera que el papel del fósforo como un fertilizante es indispensable para el sistema agrario actual, haciendo que su potencial escasez una amenaza para la producción mundial de alimentos (Verma et al., 2023). Sin embargo, efectores como el clima en altas temperaturas y lluvia pueden causar pérdidas del fósforo, afectando las propiedades del suelo y la fijación de de parte de las plantas (Hou et al., 2018).

Lo mencionado anteriormente explica en gran parte el por qué mucho del fósforo agregado a los suelos como fertilizante termina siendo un problema para el medio ambiente ya que pasa de ser un fertilizante que contribuye con la producción de alimentos y favorece a la seguridad alimentaria a un contaminante que provoca y acelera la eutrofización de los cuerpos de agua. Cabe mencionar que todo lo dicho se aplica en la agricultura en suelo que es la más extendida a nivel global, por lo que vale la pena recalcar que sistemas de cultivo como la hidroponía actúan aportando una mayor eficiencia a la gestión de los nutrientes.

### **3.5. Estado del Arte**

La importancia en los sistemas de producción para la conservación de nutrientes ha dado lugar a diversas investigaciones referentes al uso de mecanismos de liberación controlada, Romero reporta la síntesis de un fertilizante de liberación lenta basado en organobentonitas, cargadas con fosfatos para su utilización en el crecimiento de lechuga, indicando que existe una dinámica de intercambio entre organoarcilla-planta, que permite liberar fosfatos en función de los requerimientos específicos del cultivo (Romero-Mendez & Rojas-Velázquez, 2022).

Por otro lado, existen amplios reportes del uso de nanoarcillas en agricultura, desde diversos enfoques: vehiculización de nutrientes, moléculas orgánicas protectoras, señalización y soportes. Estas nanoarcillas destacan por su bajo coste, no toxicidad, y amplio espectro de utilización, se reporta la entrega de macronutrientes, micronutrientes y elementos benéficos, así como diversas matrices poliméricas que sirven como soportes para la retención de los elementos a entregar (estructuras nitrogenadas con átomos de silicio en combinación con cadenas carbonadas), se reportan además el uso de bioestimulantes en matrices poliméricas soportadas sobre arcillas, para la entrega de sustancias que mejoran los rendimientos de producción, la resistencia y vigor, así como acelerar el crecimiento y protección ante plagas



### **Informe final de Proyecto de Investigación**

específicas (Calicioglu et al., 2019; Ditta & Arshad, 2016; Hafez et al., 2018; Kopittke et al., 2019; Merino et al., 2020, 2021; Pulimi & Subramanian, 2016).

Es importante mencionar la brecha que existe entre los nutrientes administrados en forma de fertilizantes y la asimilación por parte de las plantas, la cual varía durante su desarrollo, esto conduce a las investigaciones relativas a fertilizantes de liberación lenta en matrices de arcillas como nanopartículas de hidroxipatita y nanocompuestos de zeolita cargados con nutrientes esenciales, simulando un fertilizante NPK (Chang et al., 2017; Kopittke et al., 2019; Pulimi & Subramanian, 2016).

En el grupo de los minerales de esmectita se incluyen la montmorillonita, nontronita, hectorita, saponita, sauconita y bentonita (Ismadji et al., 2015). Los materiales que se fabrican a partir de estas arcillas tienen un amplio campo de aplicación debido a sus propiedades fisicoquímicas y su capacidad de remoción de contaminantes en agua, tierra, y aire (Gupta et al., 2025). Las organoarcillas preparadas a partir de la modificación de la superficie de las arcillas se han usado para varias aplicaciones, como el uso de arcilla montmorillonita en la fabricación de materiales compuestos que mejoren el retardo de llama, propiedades térmicas y mecánicas del medio (Wang et al., 2008).

Las capacidades de captura de las organoarcillas se han resaltado en investigaciones previas. Se consideran que los materiales basados en arcillas forman complejos con su entorno que puede afectar las propiedades fisicoquímicas del suelo y la retención de agua, teniendo un impacto en la fertilidad del suelo (Younis et al., 2022). Asimismo, debido a la eutrofización de los ecosistemas, se han evaluado el uso de arcillas minerales para la captura de amonio y fosfato en agua residual sin previo tratamiento, donde se ha reportado que la captura de fosfato se realizó con una mayor efectividad (Fan et al., 2021).

Los materiales compuestos de polímero y arcilla se han considerado como de posible utilidad para agricultura de riego pluvial, ya que mejoraran la retención de agua y ejercen control sobre la liberación de nitrógeno (Mukhopadhyay & De, 2014). Se han trabajado fertilizantes para la liberación controlada de nitrógeno a partir de arcillas esmectita asociada con urea, encapsulada en un film polimérico, determinando la cinética de esta absorción en soluciones acuosas (Silva et al., 2020). En agricultura, la bentonita sódica ha sido modificada con bromuro de cetiltrimetilamonio y saturado por 24 horas se aplicó por medio de polímeros de acrilamida. En este caso, se determinó la cantidad que pudo ser aprovechada por el trigo a través de la fijación de fósforo y uso eficiente de este, observándose incrementos de 3.32 mg por kilogramo (Verma et al., 2016). Específicamente para mejorar el rendimiento de sistemas hidropónicos, se ha establecido ciertas aplicaciones de materiales compuestos con polímeros y carbono activado para un surfactante catiónicos, aprovechando que la técnica de hidroponía se considera una alternativa para los cultivos en suelo ya que evita patógenos, gusanos y erosión de la tierra (Nascimento et al., 2026).



## Informe final de Proyecto de Investigación

En los últimos años, la bentonita purificada y modificada se ha preferido para aplicaciones en organoarcillas por sus propiedades fisicoquímicas como área superficial, adsorción, toma de agua, intercambio de cationes, entre otras (Borah et al., 2022). Los materiales de bentonita modificada en la síntesis de polímeros de arcilla se han caracterizado por difracción de rayos X, espectroscopía infrarroja, microscopía de transmisión y de escaneo de electrones; aplicándose comúnmente determinación de la cinética de liberación de fósforo en suelo (Verma et al., 2023). Las técnicas mencionadas proporcionan evidencia sobre la modificación de la modificación orgánica (Parolo et al., 2014). Específicamente, en el caso de la bentonita siendo un tipo de ceniza volcánica, ha demostrado capacidad para remover compuestos tóxicos como lo son herbicidas, pesticidas, fertilizantes, detergentes, derrames de petróleo, entre otros (Pandey & Ramontja, 2016).

### 4. Planteamiento del problema

Las últimas décadas de investigación especializada en la mitigación del detrimento de cuerpos acuáticos y eutrofización por exceso de nutrientes, aún no ha logrado resolver de forma apropiada a la creciente contaminación causada por el uso excesivo de fertilizantes basados en fósforo debido a la naturaleza multifactorial del problema (Mort et al., 2024).

Esto conduce a la búsqueda de sistemas alternativos de cultivos que respondan a las necesidades nutricionales crecientes, los sistemas de cultivo hidropónicos se presentan como una alternativa viable por el manejo adecuado de nutrientes, la no utilización de suelo, una mayor velocidad de producción y protección ante variaciones climatológicas, así como menor riesgo de plagas y enfermedades (Modu et al., 2020).

Se plantea la evaluación de sistemas hidropónicos empleando organoarcillas saturadas de fósforo como fuente de liberación de fosfatos controlada, para el cultivo de berro (*Nasturtium officinale*) en condiciones de luminosidad controlada, este cultivo se seleccionó debido a la alta densidad de nutrientes por caloría (Di Noia, 2014), así como el aporte significativo de fitoquímicos de alto valor con actividad antiinflamatoria, antioxidante, cardioprotectiva, antipsoriática y anticancerígena (Klimek-Szczykutowicz et al., 2018; Klimek-Szczykutowicz et al., 2020; Zafar et al., 2017; Zeb, 2015) y sus múltiples aplicaciones tanto en alimentos como en la industria farmacéutica y cosmética. Usos adicionales del elemento fósforo están relacionados con la industria de alimentos, detergentes, suplementos nutricionales, medicamentos, iluminación, etc.

A pesar de ser una fuente de nutrientes y metabolitos secundarios de gran importancia, *N. officinale* presenta riesgos cuando proviene de afluentes contaminados debido a su capacidad biorremediadora y acumuladora de metales pesados, los cuales pueden depositarse en las partes comestibles y dañar la salud humana al ser consumidos (Khan et al., 2022; Yang et al., 2011).



## Informe final de Proyecto de Investigación

El propósito del estudio fue evaluar la inclusión de organoarcillas como agentes liberadores de nutrientes en sistemas hidropónicos, permitiendo explorar utilización de fertilizantes de liberación controlada, con la finalidad de mejorar la eficiencia del aprovechamiento del fósforo por la planta aumentando así la producción y calidad nutricional del berro. Con los resultados se pudo evaluar una serie de variables y desafíos que presenta la agricultura sostenible y alternativa ya que el uso de un sistema hidropónico a pesar de contar con características que lo hacen ideal para una producción eficiente y amigable con el ambiente requiere del ajuste de variables como la temperatura, luminosidad, ventilación, caudal de las soluciones de riego y otras que al optimizarse dan como resultado un excelente rendimiento en la producción

Los resultados permitirían contribuir a la mejora en las prácticas de producción hidropónicas e impulsar la producción agrícola sostenible.

## 5. Objetivos

### Objetivo General

Evaluar la efectividad de organoarcillas saturadas con fósforo como fuente de macronutrientes en el desarrollo de cultivos hidropónicos de berro (*Nasturtium officinale*),

### Objetivos Específicos

1. Analizar la influencia de las organoarcillas funcionalizadas con histidina en la absorción y asimilación de minerales esenciales en el berro.
2. Evaluar la capacidad de las organoarcillas saturadas con fósforo para proveer y liberar de manera controlada el fósforo en el cultivo de berro hidropónico.
3. Comparar el desarrollo de biomasa de berro en los diferentes experimentos sugeridos de cultivos hidropónicos con un cultivo tradicional.
4. Determinar el efecto de las organoarcillas saturadas con fósforo sobre la concentración de metabolitos secundarios producidos por *Nasturtium officinale*.

## 6. Hipótesis

H1: La incorporación de organoarcillas basadas en L-histidina en sistemas hidropónicos mejora el crecimiento, peso, densidad nutricional y glucósidos en el berro (*N. officinale*), en comparación con un sistema hidropónico estándar de raíz flotante.

H0: La incorporación de organoarcillas basadas en L-histidina en sistemas hidropónicos no mejora el crecimiento, peso, densidad nutricional y glucósidos en el berro (*N. officinale*), en comparación con un sistema hidropónico estándar de raíz flotante.



## Informe final de Proyecto de Investigación

### 7. Método

#### 7.1. Tipo de investigación.

La investigación realizada tiene un enfoque experimental, se basa en los conocimientos adquiridos de la investigación y de la experiencia práctica, pero enfatiza desarrollo o mejora de tecnología, productos o procesos.

Se planteó una investigación del tipo experimental, fundamentada en dos proyectos DIGI ejecutados previamente (uno de ellos en ejecución durante 2024), donde se han evaluado organoarcillas desde el desarrollo a nivel laboratorio, hasta las posibles aplicaciones de estos nanomateriales funcionalizados, presentando resultados favorables en lo que a la captura reversible de nutrientes como el fosfato respecta, estos resultados positivos permiten plantear la aplicabilidad de esta nueva tecnología de aplicación de fertilizantes a un sector de alto impacto en nuestro país, como lo es la producción agrícola para un mercado cada vez más demandante y competitivo que requiere la innovación y sustento científico el cual puede ser proporcionado por la parte académica.

#### 7.2. Enfoque y alcance de la investigación.

La investigación se realizó bajo un enfoque mixto. Se llevaron a cabo mediciones cuantitativas respecto a la composición elemental y la abundancia de glucosinolatos en las plantas de berro en cada sistema hidropónico. Adicional a esto, se evaluó cualitativamente la calidad de los cultivos, contrastándolos con plantas que son comercializadas en mercados y supermercados, con la finalidad de determinar la eficiencia los sistemas hidropónicos evaluados en función del aprovechamiento de nutrientes por la planta.

El alcance de la investigación se centró en la adopción y replicabilidad, debido a que los resultados, prototipos y procedimientos quedaron documentados para ser adoptados tanto por actores civiles como por grupos comunitarios y pequeñas o grandes cooperativas agrícolas.

Se planteó la investigación utilizando el cultivo de berro debido a su alta densidad de nutrientes. La intención era que los hallazgos de este estudio sentaran las bases para una de investigación que involucra el uso de nanomateriales y tecnologías de adsorción/desorción de nutrientes, con aplicabilidad en cultivos propios de la región para generar un impacto positivo en el sector económico y el desarrollo del país.



## **Informe final de Proyecto de Investigación**

### **7.3. Diseño de la investigación.**

La investigación se basó en un diseño mixto con una lógica de recolección de datos secuencial, obteniendo primero los datos cualitativos correspondientes a las características fenotípicas de la planta las cuales fueron a su vez relacionadas con el aprovechamiento de los nutrientes para el desarrollo del berro. Para esta parte del experimento, se cuantificó el fósforo presente en las soluciones antes y después del cultivo y en las plantas de berro.

Una vez obtenidas las plantas de berro de los cultivos hidropónicos éstas fue liofilizado para poder fijar los glucosinolatos presentes en la planta y ser cuantificados por HPLC.

### **7.4. Población, muestra y muestreo.**

Para el estudio, se consideró una población de 960 semillas de berro, las cuales fueron arregladas en grupos de tres por cada esponja utilizada. Las semillas de berro provinieron de un mismo proveedor. Los sistemas de hidroponía se trabajaron a la mitad de su capacidad, por lo cual cuarenta esponjas con brotes de berro fueron ubicadas por sistema.

Para verificar el efecto de la organoarcilla y compararla con distintas condiciones, se realizaron ocho tratamientos:

- S1: Organoarcilla funcionalizada saturada de fósforo en nutrientes sin fósforo
- S2: Arcilla cruda en nutrientes con fósforo
- S3: Organoarcilla funcionalizada en solución nutritiva sin fósforo
- S4: Arcilla cruda saturada de fósforo en nutrientes sin fósforo
- S5: Solución nutritiva completa
- S6: Solución nutritiva sin fósforo
- S7: Arena volcánica en nutrientes sin fósforo
- S8: Arena volcánica saturada de fósforo en nutrientes sin fósforo

### **7.5. Técnicas.**

El método de activación ultrasónica se basó en Bondarev et al., (2024), Pérez-Rodríguez et al. (2006) y Tyagi et al. (2006). Se realizó una suspensión de arcilla bentonita a 1.5 gramos de arcilla por cada 10 mL de agua. La dispersión se mantuvo en un baño de ultrasonido durante una hora, tras lo cual se dejó reposar por un mínimo de una hora. Se recuperó la arcilla activada tras separarla de la fase acuosa, tras lo cual se secó en horno a 70°C por al menos 6 horas. Posteriormente, los trozos de arcilla se trasladaron a un mortero para su pulverización. Seguido de esto, el pulverizado se secó a 70°C por un período de 24 horas.

### Informe final de Proyecto de Investigación

La funcionalización de las arcillas se basó en Benetoli et al. (2007), Kasprzhitskii et al. (2022), Samulewski et al. (2021) y Unuabonah et al. (2017). Se preparó una solución de L-histidina en agua destilada en una concentración de 0.1 mM. Empleando una relación de arcilla:aminoácido de 35:54 en gramos de arcilla y mililitros de solución, respectivamente, se realizó una dispersión en un Erlenmeyer de 250 mL. Ésta se mantuvo en agitación durante 24 horas. Transcurrido este período, la arcilla funcionalizada con L-histidina se centrifugó a 2400 rpm. Del sobrenadante, se aisló un gel el cual fue secado por 24 horas a 70°C para eliminar el agua residual, para determinar posteriormente la cantidad de aminoácidos retenidos por la arcilla por diferencia. Se empleó ácido clorhídrico a 0.1 N para la modificación de los grupos amino libres a fracciones de amonio.

Figura 2. Filtración de arcilla tratada por activación ácida.



*Nota:* Imágenes de los sistemas de filtración al vacío para separar el agua de la arcilla.

### Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 3. Arcilla recuperada y en proceso de secado.



*Nota:* Se muestra la arcilla en el proceso de activación y funcionalización para su posterior secado.

Los aminoácidos residuales se determinaron según el método de ninhidrina mediante espectrofotometría UV/Vis, propuesto por Sun et al. (2006). Para la preparación del reactivo de ninhidrina, se usó una solución de 1.0 g de ninhidrina en 20 mL de etanol absoluto; y una solución de 0.04 g de cloruro de estaño en 25 mL de un buffer de citrato a pH 5. A su vez, el buffer de citrato fue preparado con 20 mL de ácido cítrico y 29.5 mL de citrato de sodio a 2.94g/100mL. Se armó una curva de calibración de L-histidina para el rango de concentraciones utilizado en el experimento. Se tomó 1 mL de muestra proveniente del sobrenadante de la funcionalización de la arcilla y un blanco en recipientes separados. A cada uno se le agregó 2 mL del reactivo de ninhidrina y se calentó en un baño maría en ebullición por 15 minutos. Se enfrió en un baño de hielo y se adicionó 2 mL de etanol al 50%. Al desarrollarse la coloración violeta, se determinó la absorbancia a 575 nm.

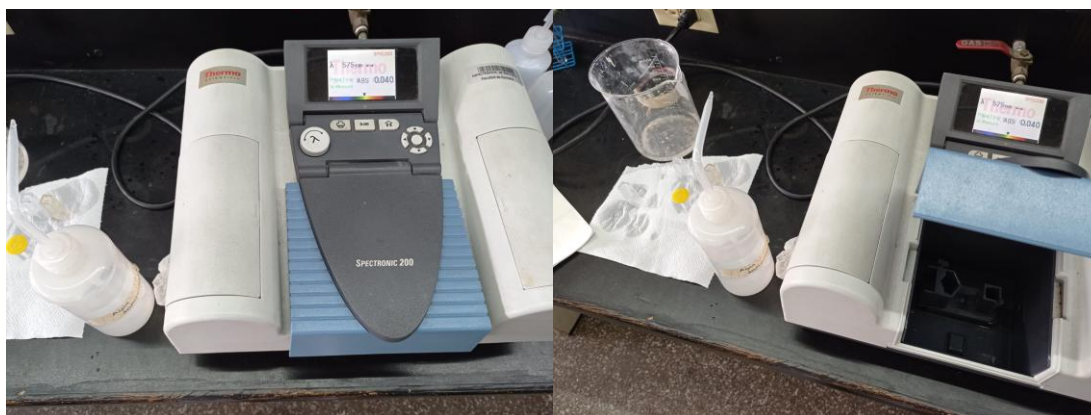
### Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 4. Preparación de las soluciones de L-histidina y ninhidrina.



*Nota:* Se muestra el proceso de preparación de las soluciones de aminoácidos para la posterior funcionalización.

Figura 5. Equipo espectrofotómetro UV-Vis, utilizado para la determinación cuantitativa de los remanentes de L-histidina en solución.



*Nota:* Imagen del equipo utilizado para la elaboración de curvas de calibración

### Informe final de Proyecto de Investigación

La saturación de las organoarcillas con fósforo se basó en el método 4500-p phosphorus contenido en Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater (2017) y Unuabonah et al. (2017). Previo a la saturación, se preparó el método de cuantificación de fósforo por espectrofotometría UV/Vis. Se preparó un volumen de 500 mL del reactivo de molibdato/metavanadato como sigue: se disolvieron 12.5 g de molibdato amónico tetrahidratado, en un volumen de 150 mL. Por separado, se disolvieron 0.625 g de metavanadato amónico en 150 mL de agua en ebullición. Al enfriarse, se le agregó a esta solución 150 mL de HCl concentrado. Se mezclaron las soluciones de molibdato amónico tetrahidratado y metavanadato amónico en un balón de 500 mL y se aforó. Se trabajó con una solución madre de fósforo preparada con fosfato diácido de potasio, a una concentración de trabajo de 50 mg P/L, para armar la curva de calibración del método. Considerando la saturación de organoarcilla, para un lote de organoarcilla de 400 g se usó 5 L de una solución de fosfatos a 100 mg P/L. Se mantuvo en agitación mecánica por dos horas. Se recuperó la arcilla saturada por medio de una filtración por gravedad y se dejó secar. Seguidamente, se tomó una alícuota de la solución de fósforo remanente, la cual se filtró y centrifugó. Se agregó 5 mL de esta solución en un balón de 50 mL, donde también se agregó 10 mL del reactivo de molibdato/metavanadato y se aforó a 50. Una porción de esta solución se agregó en una celda de vidrio y se midió su absorbancia a 370 nm. Se comparó el resultado con la curva de calibración mencionada previamente.

Figura 6. Saturación con fósforo de la arcilla funcionalizada.



*Nota:* Imagen que muestra la arcilla saturada con fósforo en Ciudad Universitaria zona 12, edificio T-10, tercer nivel, Unidad de Análisis Instrumental (UAI).

### Informe final de Proyecto de Investigación

Los sistemas hidropónicos se armaron en el laboratorio 300 de la Unidad de Análisis Instrumental. Para su operación, se consideró el uso de 12 L de solución nutritiva por sistema para poder mantener su circulación continua a través de una bomba. Para los sistemas, se consideró el uso de arcillas funcionalizadas, crudas y arena de origen volcánico; para las cuales se usaron 400 g de cada sólido.

Figura 7. Ensamblaje y montaje de sistemas hidropónicos en el área designada.



*Nota:* Imagen que muestra el montaje de los sistemas hidropónicos en el laboratorio asignado.

El esquema de configuraciones del experimento fue la siguiente:

## Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 1. Diseño experimental de sistemas hidropónicos

| Sistema                           | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Solución de nutrientes            | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Arena                             | - | - | - | - | - | - | + | + |
| Arcilla                           | - | - | + | + | - | - | - | - |
| Organoarcilla                     | - | + | - | - | - | - | - | - |
| Organoarcilla saturada de fósforo | + | - | - | - | - | - | - | - |

\*Solución de nutrientes con fósforo

Nota: En esta tabla se muestran las diferentes configuraciones que se trabajaron en los diferentes experimentos considerados.

A todos los sistemas se les agregó una solución nutritiva cuya preparación se encuentra en la Tabla 2, según la composición de Hoagland (Preethi-Rajan et al., 2019). La solución se tuvo en dos ciclos de circulación de 8 horas, correspondientes a los horarios de 11:00 a.m. a 6 p.m. y 11:00 p.m. a 6 a.m. De igual manera, se aplicó un ciclo de iluminación de 12 horas, en horario de 6 a.m. a 6 p.m. a través de lámparas instaladas en el laboratorio. Estos ciclos se controlaron a través de timers conectados a las líneas eléctricas de trabajo.

Tabla 2. Preparación de la solución nutritiva.

| Reactivo                          | Concentración Stock | mL stock/L nutrientes |
|-----------------------------------|---------------------|-----------------------|
| <b>Macronutrientes</b>            |                     |                       |
| Nitrato de potasio                | 1 M                 | 5                     |
| Nitrato de Calcio                 | 1 M                 | 5                     |
| Fosfato monopotásico*             | 1 M                 | 1                     |
| Sulfato de Magnesio               | 1 M                 | 2                     |
| <b>Micronutrientes</b>            |                     | 1                     |
| Ácido Bórico                      | 2.86 g/L            |                       |
| Cloruro de manganeso tetrahidrato | 1.81 g/L            |                       |
| Sulfato de zinc heptahidratado    | 0.22 g/L            |                       |
| Sulfato de Cobre pentahidratado   | 0.08 g/L            |                       |
| Ácido Molíbdico 85%               | 0.02 g/L            |                       |

Nota: Valores de macro nutrientes para medio de cultivo hidropónico Preethi-Rajan et al., (2019)

## Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 8. Soluciones stock de nutrientes para las soluciones nutritivas de los sistemas hidropónicos.

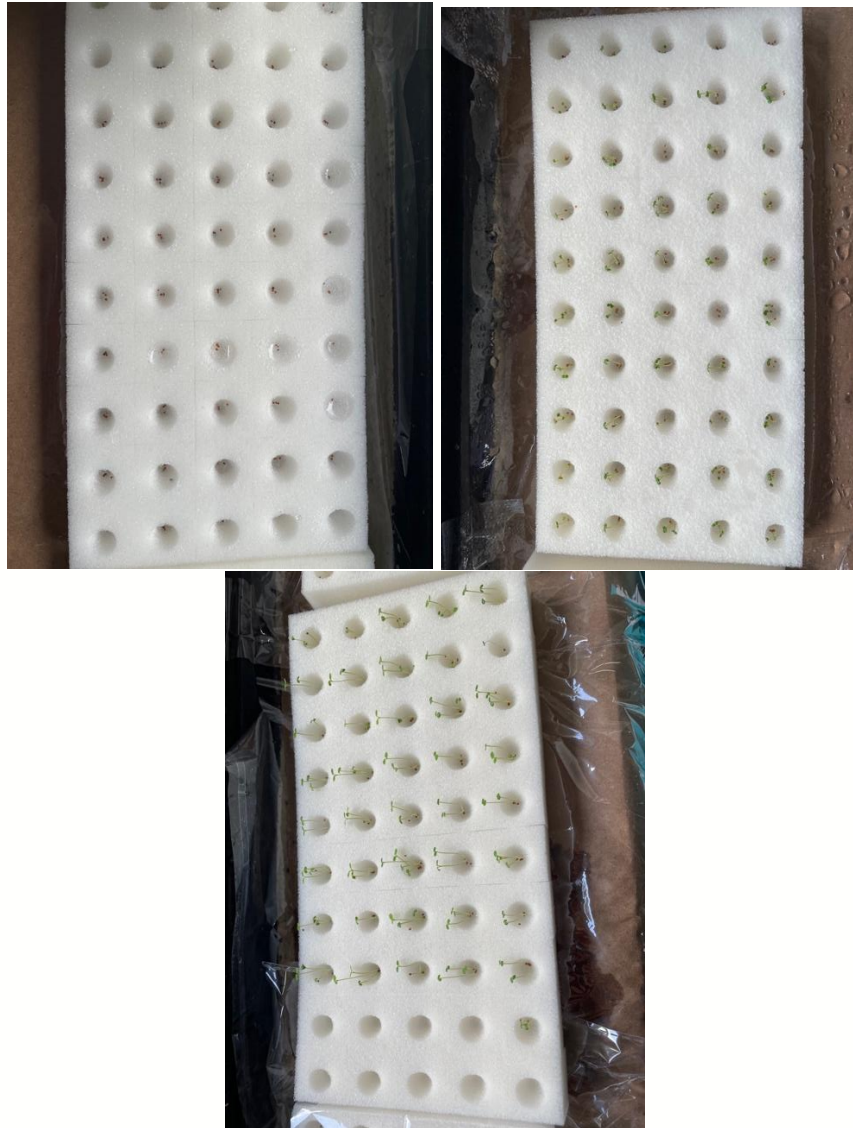


*Nota:* Soluciones de macro nutrientes empleados en el cultivo hidropónico tradicional y para complemento de otros experimentos.

Para la germinación de semillas de berro, se usaron semillas de un mismo origen de la empresa Germoveg's, originarias de España, pero de distinto lote de fabricación. Estas se colocaron en bandejas de esponjas de poliuretano de germinación previamente saturadas con agua desmineralizada, se colocó tres semillas por celda por bandeja de esponja. El tiempo de germinación duró cuatro semanas bajo incidencia de luz natural indirecta, durante las cuales se mantuvo humedecidas las esponjas y observando las características de las plantas. Al culminar el tiempo de germinación, se dividió cada bandeja de esponja en celdas y se trasladó cada celda de esponja a una canasta y se trasladó al sistema hidropónico empleando un sistema de siembra conocido como de triangulo o triangulación que permite una mejora en la distribución de luz, aire ente las plantas. En el caso de sistemas o tratamientos que contaban sustrato solido además de la solución nutritiva, ya sea arcilla o arena, se agregó una porción del sólido en los sitios de "siembra" utilizando una espátula. Una vez que el sistema hidropónico, la circulación del agua impulsado por la bomba, se puso en marcha se inicia con el monitoreo diario del pH y la conductividad eléctricas para mantenerlas en un rango óptimo para el sistema hidropónico, procurando mantener los valores a entre 5.5 – 6.8 y 0.8 - 1.8 mS/cm para el pH y Conductividad eléctrica respectivamente.

## Informe final de Proyecto de Investigación

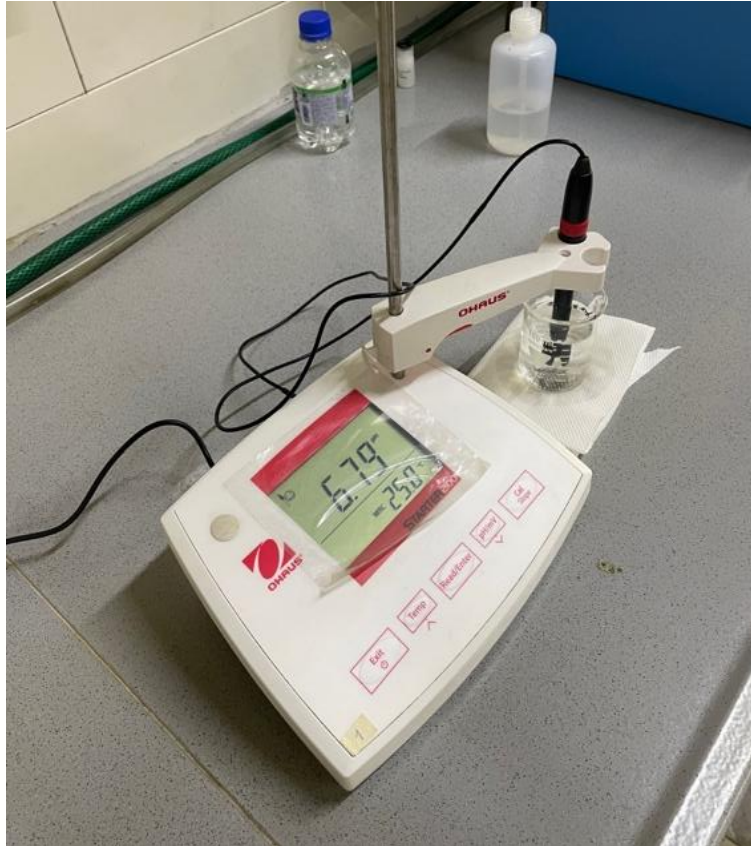
Figura 9. Germinación de las plantas de berro en esponjas.



*Nota:* Se muestran las bandejas de germinación en etapa de crecimiento para las plantas de berro.

## Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 10. Monitoreo de parámetros de control en las soluciones nutritivas.



*Nota:* Imagen que muestra el equipo que se utilizó para monitorear el pH y conductividad de los sistemas.

El proceso de crecimiento se llevó a cabo durante seis semanas. Culminado este periodo, se realizó la cosecha de las plantas. Para esto, se retiraron de las canastas y se colocaron sobre una bandeja con una regla, a manera de servir de referencia de tamaño. Seguidamente, se tomaron fotografías de las bandejas con la cosecha completa. Las fotografías fueron procesadas posteriormente por medio de ImageJ para la determinación digital de la altura final del tamaño de las plantas. En la aplicación, se tomó la regla mencionada anteriormente como una referencia de distancia y su equivalencia en pixeles, de manera que sirviera para aproximar la altura alcanzada por una planta. A continuación, se muestran las alturas determinadas por cada planta.



## Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 3. Altura de las plantas por cada sistema tratado.

| No | S1  | S2  | S3  | S4  | S5  | S6  | S7  | S8  |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1  | 6.2 | 3.2 | 5.3 | 4.0 | 3.9 | 5.2 | 4.5 | 5.8 |
| 2  | 6.7 | 3.6 | 6.5 | 3.2 | 4.0 | 4.3 | 3.7 | 5.9 |
| 3  | 7.9 | 5.8 | 4.4 | 4.0 | 0.9 | 2.9 | 4.6 | 5.6 |
| 4  | 8.3 | 5.5 | 4.6 | 3.6 | 4.9 | 4.4 | 3.8 | 4.2 |
| 5  | 6.8 | 5.4 | 4.9 | 4.8 | 4.0 | 3.9 | 4.2 | 2.9 |
| 6  | 7.9 | 5.7 | 5.3 | 4.4 | 2.0 | 5.4 | 3.6 | 4.1 |
| 7  | 6.9 | 4.9 | 5.9 | 4.1 | 4.9 | 8.0 | 4.2 | 4.5 |
| 8  | 6.6 | 5.4 | 5.8 | 3.8 | 3.5 | 2.4 | 4.7 | 3.2 |
| 9  | 6.6 | 4.6 | 4.8 | 3.1 | 3.8 | 3.7 | 4.0 | 4.2 |
| 10 | 8.8 | 5.2 | 7.3 | 3.3 | 2.9 | 1.2 | 2.4 | 2.6 |
| 11 | 6.6 | 4.5 | 4.6 | 3.3 | 3.8 | 5.1 | 3.1 | 4.9 |
| 12 | 5.1 | 4.0 | 7.2 | 5.0 | 3.4 | 3.5 | 4.3 | 3.2 |
| 13 | 6.0 | 5.4 | 5.1 | 4.0 | 5.0 | 1.3 | 3.4 | 2.9 |
| 14 | 8.1 | 3.6 | 5.5 | 3.3 | 3.3 | 2.9 | 4.4 | 4.7 |
| 15 | 5.0 | 1.7 | 6.0 | 3.6 | 3.3 | 5.0 | 3.8 | 3.2 |
| 16 | 4.9 | 3.9 | 5.1 | 3.5 | 5.2 | 4.0 | 3.7 | 3.4 |
| 17 | 3.0 | 5.2 | 3.9 | 3.8 | 2.5 | 3.7 | 4.6 | 3.7 |
| 18 | 4.3 | 5.9 | 3.8 | 3.8 | 3.8 | 4.5 | 3.8 | 5.4 |
| 19 | 4.7 | 3.5 | 3.6 | 2.9 | 2.0 | 3.4 | 3.1 | 4.7 |
| 20 | 6.8 | 3.6 | 7.9 | 2.9 | 4.0 | 6.0 | 4.5 | 3.2 |
| 21 | 3.2 | 4.2 | 5.8 | 3.2 | 3.5 | 5.1 | 4.0 | 3.3 |
| 22 | 6.4 | 4.5 | 4.4 | 4.5 | 3.2 | 4.1 | 5.0 | 3.7 |
| 23 | 5.2 | 5.5 | 5.5 | 5.0 | 3.4 | 1.8 | 3.4 | 3.5 |
| 24 | 5.3 | 4.3 | 7.4 | 4.1 | 5.5 | 2.8 | 5.0 | 5.5 |
| 25 | 3.5 | 4.6 | 2.6 | 5.0 | 2.9 | 0.8 | 4.2 | 4.5 |
| 26 | 4.2 | 5.3 | 6.3 | 4.9 | 3.0 | 5.6 | 3.2 | 3.6 |
| 27 | 5.9 | 5.1 | 5.7 | 6.2 | 3.3 | 4.7 | 4.8 | 5.1 |
| 28 | 5.5 | 3.3 | 5.4 | 5.2 | 3.1 | 4.8 | 4.4 | 4.5 |
| 29 | 3.8 | 4.8 | 5.5 | 4.4 | 3.1 | 6.4 | 3.6 | 3.7 |
| 30 | 6.0 | 3.9 | 5.2 | 3.3 | 1.8 | 4.9 | 2.8 | 3.6 |
| 31 | 5.5 | 4.8 | 4.5 | 4.6 | 3.6 | 4.4 | 3.2 | 2.8 |
| 32 | 6.5 | 4.2 | 5.4 | 3.9 | 4.2 | 1.8 | 3.6 | 4.8 |
| 33 | 5.1 | 3.1 | 5.8 | 5.4 | 3.9 | 5.9 | 2.3 | 4.4 |
| 34 | 5.9 | 2.8 | 2.6 | 5.6 | 5.0 | 2.6 | 4.2 | 4.4 |
| 35 | 5.8 | 5.3 | 6.2 | 6.0 | 4.4 | 3.0 | 4.3 | 5.4 |



### Informe final de Proyecto de Investigación

|    |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 36 | 4.7 | 3.2 | 5.2 | 4.3 | 3.1 | 3.2 | 3.6 | 5.7 |
| 37 | 6.4 | 4.7 | 2.1 | 3.8 | 2.8 | 4.4 | 3.8 | 4.3 |
| 38 | 5.3 | 4.7 | 6.1 | 3.5 | 3.8 | 3.7 | 3.8 | 3.2 |
| 39 | 5.9 | 3.1 | 3.3 | 2.6 | 1.1 | 2.3 | 4.0 | 1.8 |
| 40 | 4.7 | 4.0 | 4.1 | 2.3 | 3.8 | 3.6 | 3.5 | 4.7 |
| 41 | 4.9 | 2.4 | 5.5 | 4.3 | 2.9 | 4.1 | 3.2 | 4.3 |
| 42 | 6.1 | 3.3 | 5.9 | 5.2 |     |     | 6.4 | 5.1 |
| 43 | 5.7 | 4.1 | 5.9 | 4.6 |     |     | 4.7 | 4.9 |
| 44 | 6.6 | 2.7 | 3.1 | 4.9 |     |     | 5.9 | 4.4 |
| 45 | 5.4 | 4.1 | 3.8 | 3.7 |     |     | 2.1 | 4.5 |
| 46 | 6.1 | 6.3 | 4.6 | 4.1 |     |     | 2.7 | 3.8 |
| 47 | 4.5 | 2.0 | 5.4 | 5.1 |     |     | 3.8 | 3.4 |
| 48 | 4.4 | 5.5 | 2.4 | 4.5 |     |     | 3.6 | 5.2 |
| 49 | 6.2 | 2.9 | 1.3 | 5.2 |     |     | 4.2 | 2.4 |
| 50 | 4.1 | 4.6 |     | 4.6 |     |     | 3.3 | 5.3 |
| 51 | 5.8 | 3.3 |     | 5.9 |     |     | 3.6 | 4.3 |
| 52 | 6.2 | 2.4 |     | 4.3 |     |     | 3.4 | 4.0 |
| 53 |     | 4.3 |     | 5.1 |     |     | 1.4 | 4.4 |
| 54 |     | 2.4 |     | 5.4 |     |     | 3.2 | 2.9 |
| 55 |     | 5.6 |     | 5.9 |     |     | 3.8 | 4.5 |
| 56 |     | 3.2 |     | 3.6 |     |     | 4.1 | 4.6 |
| 57 |     | 6.2 |     | 3.3 |     |     | 3.9 | 3.7 |
| 58 |     | 4.5 |     |     |     |     | 3.9 | 3.5 |
| 59 |     |     |     |     |     |     | 2.8 | 3.3 |
| 60 |     |     |     |     |     |     |     | 4.4 |
| 61 |     |     |     |     |     |     |     | 3.1 |
| 62 |     |     |     |     |     |     |     | 3.7 |
| 63 |     |     |     |     |     |     |     | 4.5 |
| 64 |     |     |     |     |     |     |     | 4.6 |
| 65 |     |     |     |     |     |     |     | 4.5 |
| 66 |     |     |     |     |     |     |     | 3.4 |

*Nota:* en esta tabla se muestran los valores de altura registrados con monitoreo permanente del crecimiento de las plantas. Tabla de elaboración propia.

Inmediatamente después de la fotografía, las muestras fueron empacadas y puestas bajo refrigeración. El mismo día de la cosecha fueron transportadas a la Universidad del Valle de Guatemala, donde fueron liofilizadas prontamente para preservar los metabolitos a ser analizados posteriormente.

## Informe final de Proyecto de Investigación

### 7.6. Resumen de las variables o unidades de análisis.

Tabla 4. Objetivos, variable, instrumentos y unidad de medida o cualificación utilizada en la investigación.

| Objetivo específico                                                                                                                                           | Variable                            | Instrumentos                             | Unidad de medida o cualificación                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Analizar la influencia de las organoarcillas funcionalizadas con histidina en la absorción y asimilación de minerales esenciales en el berro.                 | Concentración de fósforo en plantas | Espectrofotómetro UV/Vis                 | Miligramos de fósforo por gramo de biomasa (mg/g)        |
| Evaluar la capacidad de las organoarcillas saturadas con fósforo para la proveer y liberar de manera controlada el fósforo en el cultivo de berro hidropónico | Concentración de fósforo (mg/L)     | Espectrofotómetro UV/Vis                 | Absorbancia<br>Miligramos por litro (mg/L)               |
| Comparar el desarrollo de biomasa de berro en los diferentes experimentos sugeridos de cultivos hidropónicos con un cultivo tradicional.                      | Masa, altura de plantas             | Balanza analítica, ImageJ                | Gramos (g),<br>Centímetros (cm)                          |
| Determinar el efecto de las organoarcillas saturadas con fósforo sobre la                                                                                     | Concentración de glucosinolatos     | Cromatografía líquida de alta eficiencia | Miligramos de glucosinolatos por gramo de biomasa (mg/g) |



### Informe final de Proyecto de Investigación

|                                                                                                        |  |  |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|
| concentración de<br>metabolitos<br>secundarios<br>producidos por<br><i>Nasturtium<br/>officinale</i> . |  |  |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|

Nota: la anterior tabla muestra un resumen de cómo lograr el desarrollo de los objetivos

#### 7.7. Procesamiento y análisis de la información

Se usaron los siguientes métodos para el análisis de los datos:

- Se empleó el promedio y desviación estándar que describe el valor central y la dispersión de pH, CE y altura por sistema, el cual permite identificar que sistemas mantienen valores estables y cercanos al rango óptimo del berro, los cuales son pH 5.5 – 6.5 y 1.2 – 2.5 mS/cm de pH y Conductividad respectivamente.
- Se calculó el coeficiente de variación para comparar la variabilidad relativa entre sistemas con diferentes escalas.
- La correlación de Pearson se empleó para determinar la relación lineal entre el pH y la conductividad dentro de cada sistema. En donde una correlación cercana a cero demuestra un efecto buffer en el sistema en particular.
- El análisis de varianza se empleó para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre el pH o en la altura entre todos los sistemas empleados en la investigación.
- La regresión lineal se empleó para calcular que porcentaje de la variación en el crecimiento del berro se explica por efecto del pH o por efecto de la conductividad.
- Estadísticos descriptivos o tablas dinámicas se emplearon para visualizar la evolución temporal del pH y la conductividad a lo largo de las 7 semanas de observaciones.
- Se empleó el Análisis de Varianza de Welch para el análisis de la altura de las plantas por sistema debido a que es una prueba más fiable para cuando no se cumple homocedasticidad como es el caso de las alturas de las plantas.
- Se desarrollaron pruebas post hoc para comparaciones entre sistemas con el sistema control mediante pruebas t de Welch para muestras independientes que no asume varianzas iguales para controlar el error tipo I (falso positivo) derivado de múltiples comparaciones con corrección de Bonferroni.
- Se calcularon para cada comparación Intervalos de confianza del 95% basados en la distribución t de student con los grados de libertad de Welch que permiten estimar la magnitud del efecto y evaluar su relevancia práctica.
- Se utilizó la prueba t de Welch para dos muestras independientes para comparar dos grupos de sustratos (sustratos con bentonitas S1-S4 y arenas volcánicas S7-S8), dado que no se asumió varianzas iguales entre grupos.



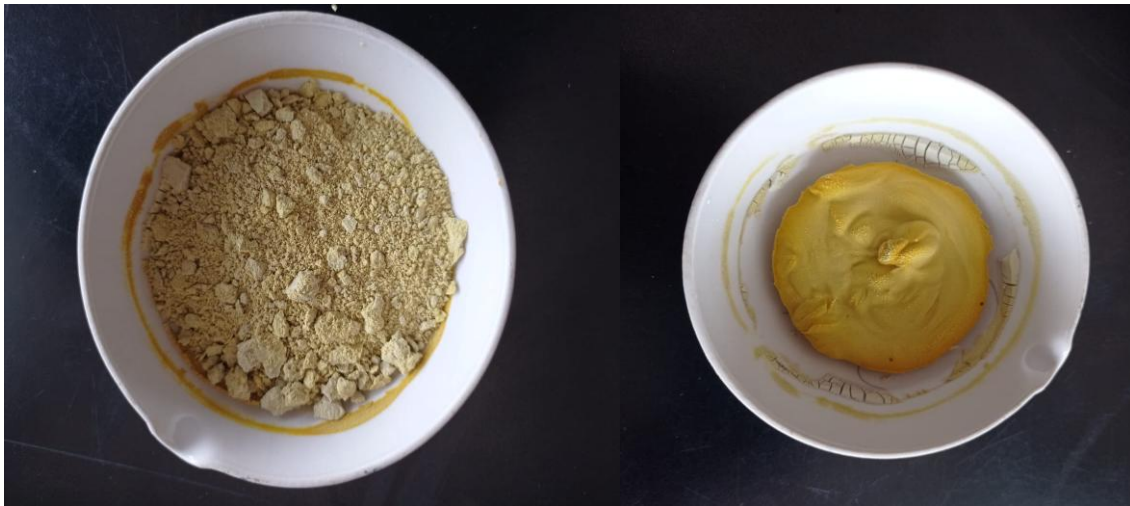
## Informe final de Proyecto de Investigación

### 8. Resultados y discusión

En los últimos años, se han desarrollado materiales de arcillas funcionalizadas para la captura de especies en aplicaciones de biorremediación, materiales y agricultura. Entre estos, se destaca el uso de organoarcillas para la captura y liberación controlada de fosfatos. Esto se ha estudiado previamente en el proyecto previamente elaborado con el apoyo de la Dirección General de Investigación: “Evaluación de adsorción-desorción de fósforo empleando arcillas modificadas con aminoácidos y desarrollo de modelo matemático que describa su comportamiento” por Estrada et al. (2022). En este proyecto, se sentaron las bases para la elaboración de organoarcillas y se mostró la efectividad de estas para la captura de especies de fósforo. A partir de este proyecto, se ha desarrollado una línea de investigación que busca aplicaciones para el material, como en la captura de fosfatos en el lago de Amatitlán como un agente de remediación (Estrada et al., 2024). Por ello, el presente estudio consideró la posibilidad de aplicar la adsorción y desorción de fosfatos para la liberación controlada de fosfatos, utilizando la planta de berro (*Nasturdium officinale*) como unidad de experimentación. Esto considerando que la planta puede llegar a ser una preocupación medio ambiental debido al uso de fertilizantes basados en fosfato (Hibbert y Taylor, 2022), por lo cual hace falta un medio de fertilización sostenible para su producción. A través de los resultados de las investigaciones anteriores, se seleccionó para el presente estudio la arcilla de bentonita funcionalizada con L-histidina, siguiendo el método desarrollado previamente (Figura 11). De igual manera, la verificación de las concentraciones de histidina y fósforo se llevaron a cabo por medio de espectrometría UV/Vis, cuyo método y curva se presentan ilustrados en las figuras 12 a 15.

## Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 11. Arcilla activada y seca para su funcionalización.



*Nota:* Comparativa de la arcilla que fue activada y la que se funcionalizó.

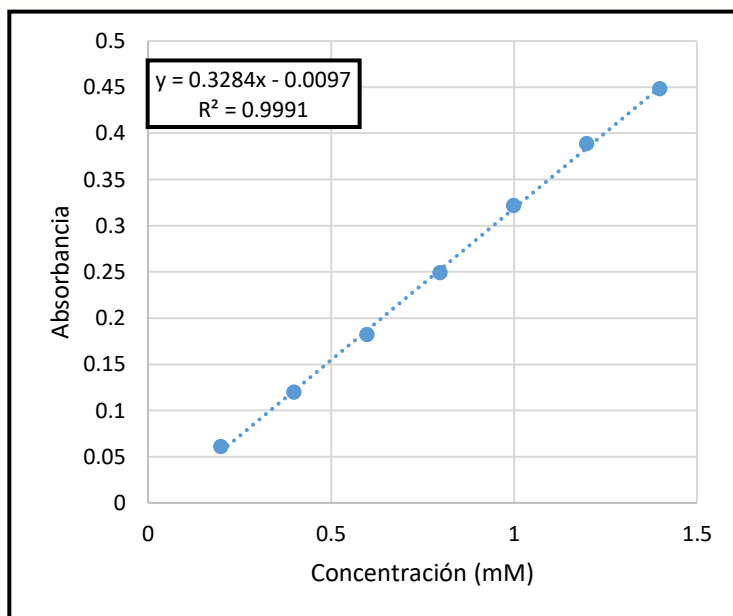
Figura 12. Soluciones para la curva de calibración para la cuantificación de L-histidina remanente en solución a distintas concentraciones.



*Nota:* Se muestran las soluciones empleadas para crear la curva de calibración para la cuantificación de aminoácidos.

### Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 13. Curva de calibración corregida para la cuantificación de L-histidina remanente en solución a distintas concentraciones.



*Nota:* Grafico que muestra los valores obtenidos de la curva de calibración.

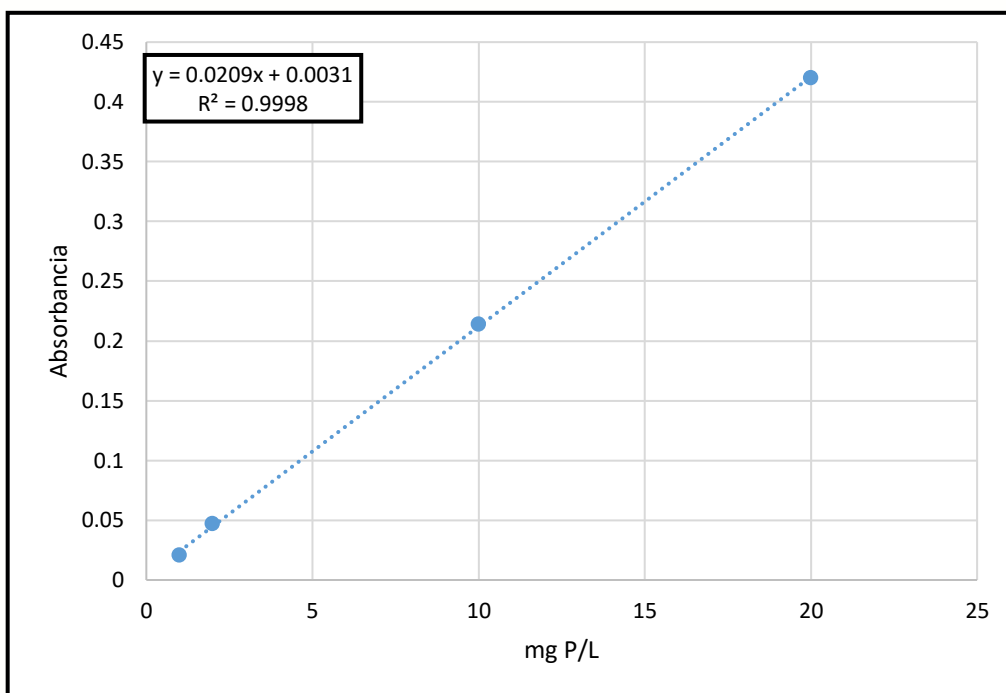
Figura 14. Soluciones para la curva de calibración para la cuantificación de fósforo en solución a distintas concentraciones.



*Nota:* Balones que muestran la coloración ascendente en función de la cantidad de fosforo en cada uno.

### Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 15. Curva de calibración del método molibdato/metavanadato.



*Nota:* Curva de calibración obtenida para la cuantificación de fosforo.

Los sistemas de hidroponía fueron instalados en el espacio autorizado del Laboratorio de la Unidad de Análisis Instrumental en el tercer nivel del edificio T-10, en el período de septiembre a noviembre de 2025. Sin embargo, debido a la ubicación laboratorio, se presentaron naturalmente condiciones insuficientes de iluminación para el sistema experimental, al no contar con un invernadero. Asimismo, condiciones de intemperie se mostraron inviables por cuestiones de precariedad y la temporada lluviosa. Por ello, se instaló un sistema de iluminación adicional con lámparas LED que posteriormente se complementó con luz ultravioleta para la etapa de crecimiento, como se ilustra en la Figura 16. A pesar que las plantas de berro puede aclimatarse a condiciones de luz baja, conservando parte de sus pigmentos (Going et al., 2008), se observó un escaso crecimiento de las plantas relativo a la etapa de germinación. Sin embargo, se consideró que en estas condiciones las concentraciones de metabolitos secundarios importantes para el desarrollo de la planta pueden disminuir y afectar su desarrollo (Lam et al., 2021).

### Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 16. Etapa de crecimiento de las plantas de berro dentro de los sistemas hidropónicos.



*Nota:* Sistemas hidropónicos instalados y puestos en marcha con las plantas de berro.

### Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 5. Resumen del crecimiento de las plantas en centímetros en los sistemas hidropónicos. Valores de tamaño reportados en centímetros para cada experimento (S1-S8).

| Sistema             | S1  | S2  | S3  | S4  | S5  | S6  | S7  | S8  |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Número de plantas   | 52  | 58  | 49  | 57  | 41  | 41  | 59  | 66  |
| Máximo              | 8.8 | 6.3 | 7.9 | 6.2 | 5.5 | 8.0 | 6.4 | 5.9 |
| Mínimo              | 3.0 | 1.7 | 1.3 | 2.3 | 0.9 | 0.8 | 1.4 | 1.8 |
| Promedio            | 5.7 | 4.2 | 5.0 | 4.2 | 3.5 | 3.9 | 3.8 | 4.1 |
| Desviación estándar | 1.3 | 1.1 | 1.4 | 0.9 | 1.0 | 1.5 | 0.8 | 0.9 |

*Nota:* Tabla que muestra los resultados de crecimiento de plantas en cada experimento.

Figura 17. Plantas cosechadas al término de la fase de crecimiento.



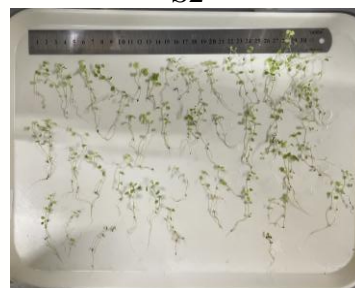
**S1**



**S2**



**S3**



**S4**



**S5**



**S6**

## Informe final de Proyecto de Investigación



**S7**



**S8**

*Nota:* Fotos que hacen una comparativa del volumen y cantidad de biomasa obtenida en cada experimento.

La absorción de nutrientes por la planta en cultivos hidropónicos depende de varios factores tanto físicos como químicos. Entre los factores químicos más importantes y que influyen directamente en el desarrollo de los cultivos hidropónicos son el pH del medio o solución nutritiva y la conductividad eléctrica del medio. La conductividad eléctrica es una medida de la cantidad total de sales que están disueltas en la solución hidropónica, es decir, es un valor que indica la cantidad de nutrientes, entre cationes y aniones, que están disponibles para ser absorbidos por las plantas en la solución nutritiva. Este valor es distinto para cada planta y para el caso de cultivo en técnica hidropónica de berro los valores que se prefieren están en el rango de 0.5 a 1.0 mS/s en la etapa de plántula y de 1.2 a 1.8 mS/s en la etapa de crecimiento. El caso del pH el cual es un indicador de la acidez o alcalinidad del medio, afecta la disponibilidad de los nutrientes disueltos. El rango ideal en hidroponía es de 5.5 – 6.5. Estos dos parámetros deben ser monitoreados constantemente para mantener la solución nutritiva equilibrada, lo cual se traduce en una planta saludable.

A continuación, se presentan las tablas los valores promedios de pH y EC para la fase desarrollo del cultivo.

Tabla 6. Valores promedio de las cinéticas químicas del pH.

| Semana   | Sistema 1 | Sistema 2 | Sistema 3 | Sistema 4 | Sistema 5 | Sistema 6 | Sistema 7 | Sistema 8 |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1        | 7.14      | 6.54      | 7.00      | 7.08      | 6.53      | 6.93      | 7.34      | 7.17      |
| 2        | 7.26      | 6.61      | 6.99      | 7.00      | 6.17      | 7.35      | 7.23      | 6.82      |
| 3        | 7.13      | 6.81      | 7.01      | 6.82      | 6.16      | 6.93      | 7.09      | 6.78      |
| 4        | 7.11      | 6.94      | 6.89      | 6.93      | 6.35      | 6.93      | 6.87      | 6.85      |
| 5        | 7.03      | 6.99      | 6.93      | 6.83      | 6.43      | 6.90      | 6.85      | 6.78      |
| 6        | 6.82      | 7.00      | 6.84      | 6.75      | 6.36      | 7.16      | 6.95      | 6.86      |
| 7        | 6.84      | 6.94      | 6.83      | 6.73      | 6.52      | 6.81      | 6.94      | 6.76      |
| Promedio | 7.05      | 6.83      | 6.92      | 6.88      | 6.36      | 7.00      | 7.04      | 6.86      |
| Mínimo   | 7.83      | 7.11      | 7.4       | 7.4       | 7.12      | 7.87      | 8.2       | 7.8       |
| Máximo   | 6.48      | 6.5       | 6.58      | 6.2       | 5.98      | 6.28      | 6.61      | 6.2       |

*Nota:* Tabla que muestra valores de pH de diferentes sistemas.



## **Informe final de Proyecto de Investigación**

En el caso del pH en todos los sistemas se observa una disminución del pH la cual fue en relación al tiempo, esto es favorable para los sistemas ya que para el berro el rango de pH óptimo para la absorción de nutrientes.

Considerando la Figura 18 de la evolución del pH a lo largo del todo el ciclo de desarrollo del berro se puede observar en el sistema 1 que corresponde a la bentonita funcionalizada y saturada con fósforo inicia con un pH ligeramente por arriba del neutro. Sin embargo, a medida que se avanza en las semanas del ciclo de crecimiento, se observa que la cinética de la bentonita en relación a la liberación de fosfato desciende hasta alcanzar el pH ideal (6.0 – 6.8) (Resh, 2013, p. 78; Jones, 2016), específicamente en la semana 6 y 7. Estas condiciones son las óptimas en cuando a la disponibilidad de los nutrientes para el berro.

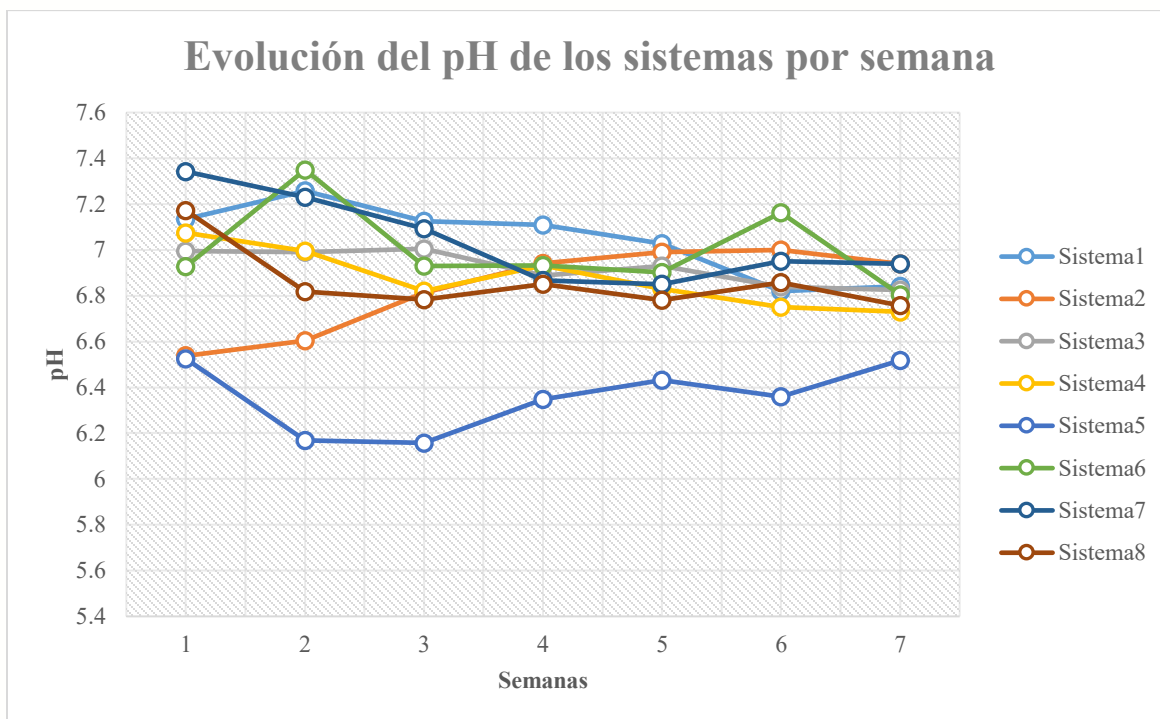
El sistema 5 fue el control del experimento, en el cual se empleó únicamente solución nutritiva líquida con fósforo y no se agregó sustrato sólido (ya sea bentonita o arena). Este inicia con pH más bajo que el sistema 1. Sin embargo, a medida que se avanza en las semanas de desarrollo, el pH no cambia drásticamente.

El sistema 6, al igual que el sistema 5, se empleó únicamente solución nutritiva sin sustrato sólido, además de no contener fósforo en la solución. Se puede observar en la Figura 18 que la evolución del pH es bastante inestable, aunque nunca sale del rango permitido para cultivos hidropónicos. Este comportamiento del pH se observa a menudo en ambientes o sistemas en donde existe deficiencia de fósforo y la planta no es capaz de regular el pH en los alrededores de sus propias raíces (Marschner, 2012; Havlin et al., 2016).

Los sistemas 7 y 8 que corresponden a los sistemas con sustrato sólido de arena volcánica, en la figura 18 se observa que presentan un comportamiento similar en cuanto a la evolución del pH. Estos inician en pH por arriba del neutro y se estabiliza con el tiempo, pero no lo suficiente como para alcanzar el valor máximo de pH en el cual es óptimo la disponibilidad de nutrientes para que la planta pueda absorberla (5.5 - 6.5). A este pH la disponibilidad de nutrientes no desaparece completamente, pero si disminuye significativamente a unos elementos nutritivos más que a otros. Entre estos se encuentran el hierro, el manganeso y el zinc (Resh, 2013; Grattan & Grieve, 1999).

## Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 18. Cinética química del pH de los sistemas por semanas.



*Nota:* Curva de desarrollo de pH en función del tiempo para cada uno de los sistemas.

Tabla 7. Valores promedio de la cinética química de la conductividad eléctrica.

| Semana   | Sistema 1 | Sistema 2 | Sistema 3 | Sistema 4 | Sistema 5 | Sistema 6 | Sistema 7 | Sistema 8 |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1        | 1.53      | 1.83      | 1.86      | 1.74      | 1.76      | 2.11      | 1.77      | 1.74      |
| 2        | 1.75      | 1.84      | 1.83      | 1.75      | 1.75      | 1.94      | 1.84      | 1.73      |
| 3        | 1.85      | 1.85      | 1.87      | 1.80      | 1.80      | 1.95      | 1.91      | 1.82      |
| 4        | 1.72      | 1.80      | 1.83      | 1.79      | 1.80      | 1.90      | 1.85      | 1.82      |
| 5        | 1.67      | 1.72      | 1.71      | 1.70      | 1.69      | 1.76      | 1.74      | 1.75      |
| 6        | 1.69      | 1.71      | 1.71      | 1.72      | 1.69      | 1.75      | 1.75      | 1.74      |
| 7        | 1.65      | 1.68      | 1.67      | 1.67      | 1.66      | 1.68      | 1.72      | 1.68      |
| Promedio | 1.69      | 1.77      | 1.78      | 1.74      | 1.74      | 1.87      | 1.80      | 1.75      |
| Mínimo   | 1.92      | 1.93      | 1.98      | 1.89      | 1.89      | 2.16      | 2.02      | 1.92      |
| Máximo   | 0.84      | 1.65      | 1.64      | 1.64      | 1.60      | 1.65      | 0.11      | 1.65      |

*Nota:* Valores tabulados de conductividad eléctrica obtenidos en el desarrollo del experimento para cada sistema.

El valor de conductividad eléctrica es un parámetro importante, ya que si se supera el rango óptimo de EC significa que hay exceso de nutrientes en la solución. Estos no son absorbidos

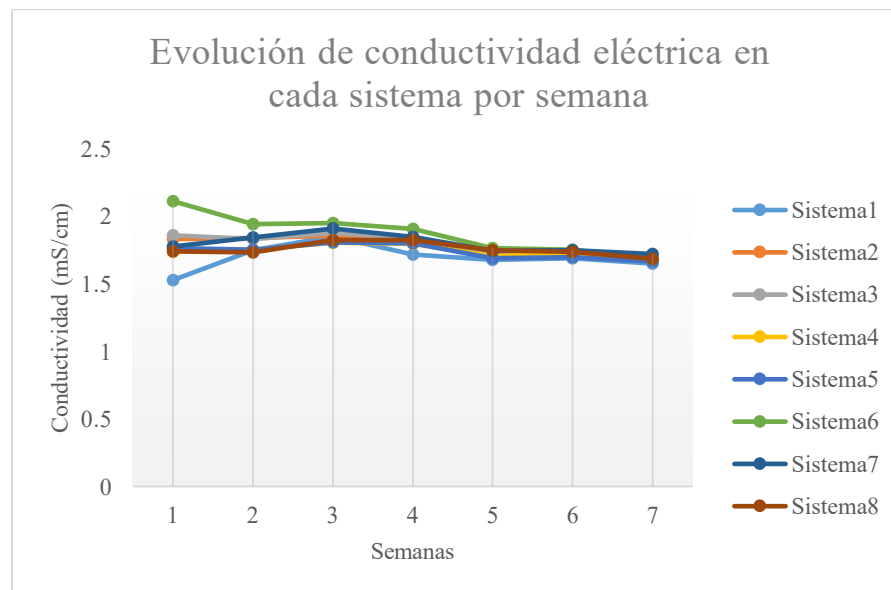
## Informe final de Proyecto de Investigación

por las plantas, quedando en la solución y siendo desechados al momento de colocar una nueva solución en el sistema. Los promedios indican que se dio una buena absorción si tomamos como referencia el rango de EC para la etapa de crecimiento. Sin embargo, los valores iniciales son altos en relación al rango recomendado para la etapa de plántula (1.2 – 2.5 mS/cm)

Considerando la Figura 19 de la evolución de la conductividad eléctrica durante las semanas, se observa un pico en la semana 3 correspondiente a 1.85 mS/cm según la Tabla 7. Este comportamiento podría ser atribuido a que el sustrato sólido bentonita funcionalizada libera iones al inicio, que luego se consumen de forma efectiva por la planta (Bergaya & Lagaly, 2013), estabilizando de esta forma la conductividad.

Para el caso del sistema 6 que contiene únicamente solución nutritiva pero sin fósforo en sus componentes nutritivos y tampoco fase o sustrato sólido, exhibe un valor de conductividad más alto al inicio (ver Tabla 7). Esto podría deberse a que la ausencia de fósforo en el medio nutritivo, la planta deja de absorber o absorbe menos a otros nutrientes, por cuestiones de sinergismo de nutrientes. Es decir, la presencia del fósforo favorece y/o facilita la absorción de otros elementos; en este caso en específico el fósforo favorece o facilita la absorción de Mg, N, Mn, Zn (dependiendo de las condiciones) y K de forma indirecta. (Jones, 2016)

Figura 19. Cinética de la conductividad por sistema por semana.



*Nota:* Curva que muestra la tendencia de la conductividad con respecto al tiempo



### Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 8. Coeficiente de Variación (%) entre réplicas del pH.

| Semanas       | Sistema 1 | Sistema 2 | Sistema 3 | Sistema 4 | Sistema 5 | Sistema 6 | Sistema 7 | Sistema 8 |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1             | 4.86      | 1.15      | 4.05      | 3.13      | 6.41      | 4.74      | 7.81      | 6.42      |
| 2             | 5.28      | 0.80      | 1.06      | 2.47      | 2.75      | 2.20      | 3.14      | 8.15      |
| 3             | 0.88      | 0.63      | 1.70      | 6.15      | 1.27      | 6.49      | 2.21      | 4.66      |
| 4             | 4.34      | 1.83      | 4.18      | 2.95      | 0.96      | 3.93      | 3.37      | 1.57      |
| 5             | 3.65      | 1.31      | 3.01      | 1.40      | 0.63      | 1.88      | 2.42      | 5.55      |
| 6             | 2.95      | 1.25      | 2.63      | 2.38      | 1.16      | 6.82      | 3.44      | 1.53      |
| 7             | 3.56      | 1.06      | 2.12      | 1.43      | 3.59      | 1.54      | 2.06      | 0.84      |
| Total general | 4.07      | 2.83      | 2.74      | 3.34      | 3.54      | 4.66      | 4.36      | 4.74      |

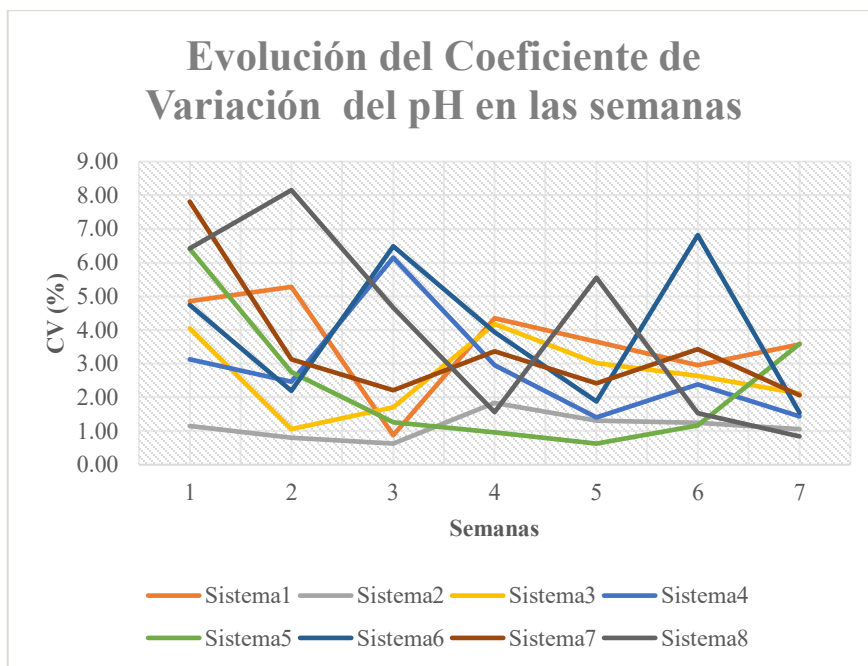
*Nota:* Tabla que compila información de variación de pH en diferentes experimentos.

En Tabla 8 se presentan los coeficientes de variación entre tratamientos del pH. En esta investigación un coeficiente de variación menor al 10% indica que existe alta reproducibilidad entre los tratamientos y un coeficiente de variación corresponde a que los sistemas se comportan o exhiben resultados muy distintos.

Para el caso del pH del sistema 2, correspondiente a la que contiene bentonita cruda sin funcionalizar y fósforo, tiene la variación más baja en la semana 3 pero exhibe el mismo comportamiento en todas las semanas en comparación con los demás sistemas (Figura 20). Esto podría ser evidencia de que la bentonita que no está funcionalizada no altera la química del medio (Steel et al., 1997). El sistema 1 inicia su crecimiento con un alto coeficiente (ver Tabla 8), pero disminuye considerablemente en el tiempo (ver Figura 20), el cual sugiere un periodo de acondicionamiento de la bentonita para su estabilización y que podría requerir lavados previos antes de la siembra. (De Boodt & Verdonck, 1972). Y finalmente el sistema 5, el control correspondiente a la que contiene únicamente solución nutritiva líquida sin sustrato sólido y la presencia de fósforo presenta un coeficiente aceptable menor al 7% el cual como se indicó anteriormente representa un alta reproducibilidad.

## Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 20. Estabilidad y Variabilidad entre réplicas del pH.



*Nota:* Gráfico de variación del pH con respecto al tiempo.

Tabla 9. Coeficiente de variación entre réplicas de la conductividad eléctrica.

| Semana   | CV_S1 (%) | CV_S2 (%) | CV_S3 (%) | CV_S4 (%) | CV_S5 (%) | CV_S6 (%) | CV_S7 (%) | CV_S8 (%) |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Semana 1 | 33.4      | 36.1      | 16.1      | 16.7      | 10.0      | 27.4      | 25.0      | 13.5      |
| Semana 2 | 34.3      | 44.6      | 57.5      | 36.6      | 38.9      | 82.2      | 44.7      | 38.2      |
| Semana 3 | 27.1      | 12.1      | 13.3      | 9.6       | 14.3      | 12.7      | 11.6      | 17.3      |
| Semana 4 | 31.1      | 41.7      | 56.1      | 38.6      | 34.6      | 52.2      | 63.7      | 37.4      |
| Semana 5 | 31.0      | 37.3      | 32.3      | 34.3      | 47.4      | 48.7      | 40.2      | 40.0      |
| Semana 6 | 24.0      | 31.2      | 30.8      | 33.1      | 21.0      | 39.2      | 44.1      | 40.9      |
| Semana 7 | 16.5      | 18.5      | 20.3      | 21.6      | 26.1      | 23.2      | 28.5      | 11.3      |

*Nota:* Compilación de datos tabulados de conductividad eléctrica.

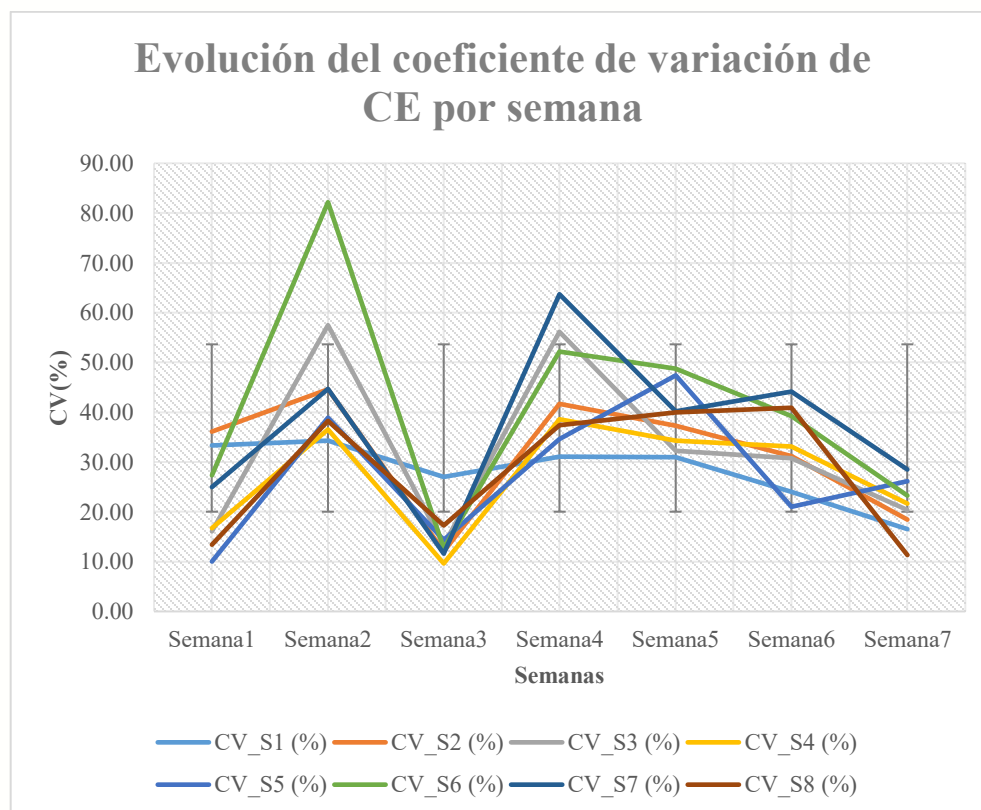
De acuerdo a la Tabla 9, únicamente el sistema 6 presenta un valor atípico con un 82 % de variación y se observa un comportamiento exagerado del mismo en la Figura 21. Este sistema corresponde al que tenía únicamente solución nutritiva sin ningún sustrato sólido, sin fósforo en su composición nutritiva. Se considera un dato atípico debido a que el coeficiente de

### Informe final de Proyecto de Investigación

variación del pH es considerablemente bajo para este mismo sistema durante la misma semana, entonces la relación entre ellos no concuerda.

En el caso del sistema 8, que contiene arena volcánica saturada con fósforo presenta en la tabla un coeficiente bajo, inestable durante las primeras 3 semanas pero exhibe estabilidad de la semana 4 a la 6 (ver figura 21). Comparado con el comportamiento inestable que muestra del sistema 7, que contiene arena cruda sin funcionalizar, se puede concluir que el sustrato muestra un comportamiento homogéneo después de que se funcionaliza.

Figura 21. Estabilidad y variabilidad entre réplicas de la conductividad eléctrica.



*Nota:* Grafico que muestra la evolución de la conductividad eléctrica con el paso del tiempo.

Tabla 10. Coeficientes de Correlación de Pearson por sistema.

| Sistema | r (Pearson) | Categoría |
|---------|-------------|-----------|
|---------|-------------|-----------|



### Informe final de Proyecto de Investigación

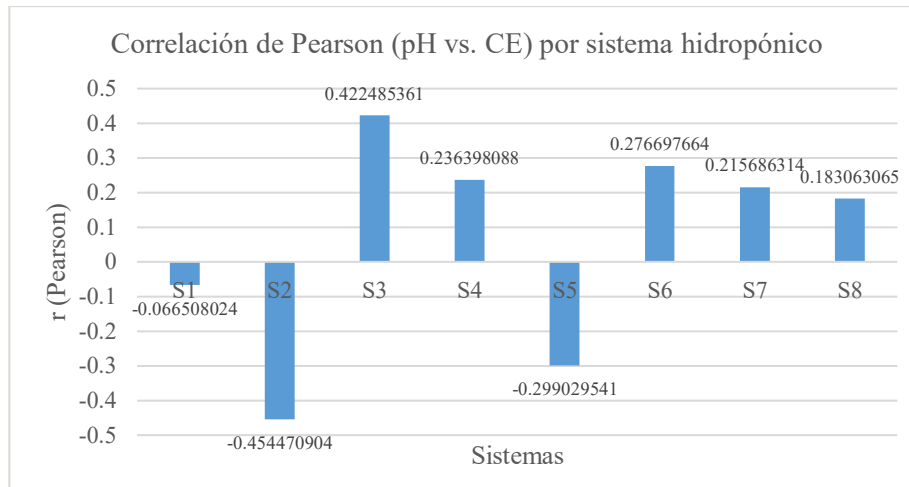
|    |              |                           |
|----|--------------|---------------------------|
| S1 | -0.066508024 | Independencia<br>(buffer) |
| S2 | -0.454470904 | Negativa moderada         |
| S3 | 0.422485361  | Positiva                  |
| S4 | 0.236398088  | Positiva débil            |
| S5 | -0.299029541 | Negativa moderada         |
| S6 | 0.276697664  | Negativa moderada         |
| S7 | 0.215686314  | Positiva fuerte           |
| S8 | 0.183063065  | Positiva débil            |

*Nota:* Valores de coeficiente de correlación para cada sistema obtenidos en la Ciudad Universitaria zona 12, edificio T-10, tercer nivel, Unidad de Análisis Instrumental (UAI).

El coeficiente de correlación de Pearson es una medida cuyo valor se ubica en un rango que varía entre -1 y +1. El valor exacto indica la relación y la fuerza de dicha relación que existe entre dos variables (Zar, 2014). En el caso específico de esta investigación, la relación entre el pH y la conductividad eléctrica. Se evaluó inicialmente la linealidad entre el pH y la conductividad eléctrica a lo largo del tiempo mediante diagramas de dispersión. Los resultados que se presentan en la Tabla 10 muestran que el único sistema con una correlación casi nula es el sistema 1, correspondiente a la que contiene arcilla funcionalizada saturada con fósforo y solución nutritiva sin fósforo. Esto puede ser un indicio de que la bentonita funcionalizada y saturada con fósforo actúa como amortiguador químico (Bergaya & Lagaly, 2013). Es decir, el sustrato evita que el pH cambie drásticamente a pesar de la alta o baja concentración de sales. En el cultivo hidropónico es ideal porque se previene el estrés de la planta por cambios en el pH. El sistema 5, correspondiente al control que tiene solución nutritiva con fósforo, presentó un valor de correlación negativa moderada (ver Figura 22 y Tabla 10). Es un comportamiento esperado en sistemas hidropónicos tradicionales como lo es el control. Algunos sistemas como el 3, 4, 7 y 8 con valores de correlación positiva, se deben evaluar constantemente ya que pueden cambiar rápidamente su pH. (Savvas y Gruda, 2018). Y finalmente, los sistemas 2 y 5 presentan una correlación negativa (Ver figura 22 y tabla 10), el cual es un comportamiento típico en sistemas con presencia de fósforo en el medio que ayuda a la planta a modificar o controlar los cambios de pH del medio nutritivo. (Sonneveld & Voogt, 2009).

## Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 22. Correlación entre pH y Conductividad por sistema.



*Nota:* Grafico que muestra la correlación del pH y la CE

Tabla 11. Análisis de varianza para el pH entre los sistemas.

| Grupos    | Cuenta | Suma   | Promedio    | Varianza    |
|-----------|--------|--------|-------------|-------------|
| Sistema 1 | 28     | 197.27 | 7.045357143 | 0.082173942 |
| Sistema 2 | 28     | 191.31 | 6.8325      | 0.037271296 |
| Sistema 3 | 28     | 193.89 | 6.924642857 | 0.03612209  |
| Sistema 4 | 28     | 192.53 | 6.876071429 | 0.052602513 |
| Sistema 5 | 28     | 178.03 | 6.358214286 | 0.050630026 |
| Sistema 6 | 28     | 196.04 | 7.001428571 | 0.106479365 |
| Sistema 7 | 28     | 197.09 | 7.038928571 | 0.094335847 |
| Sistema 8 | 28     | 192.07 | 6.859642857 | 0.105744312 |

| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F          | Probabilidad | Valor crítico para F |
|---------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|------------|--------------|----------------------|
| Entre grupos              | 9.602710268       | 7                  | 1.371815753               | 19.4115923 | 4.70E-20     | 2.052155592          |
| Dentro de los grupos      | 15.26470357       | 216                | 0.070669924               |            |              |                      |
| Total                     | 24.86741384       | 223                |                           |            |              |                      |

*Nota:* Valores tabulados de la varianza de pH en los diferentes experimentos.

### Informe final de Proyecto de Investigación

De acuerdo a los resultados del análisis de varianza se puede observar que el valor P es menor a 0.001, esto significa que existen diferencias significativas en el pH entre los 8 sistemas y el valor del F calculado, 1.41 (ver Tabla 11), es mayor que el valor del F crítico, 2.05. Estos resultados del análisis de varianza indican que el tipo de sustrato que se introduce al sistema hidropónico, ya sea bentonita o arena volcánica; así como la presencia o ausencia de fósforo, ya sea en el sustrato o en la solución nutritiva; afectan significativamente el pH del sistema completo (Álvarez-Mejía et al., 2006).

Tabla 12. Análisis de varianza para la altura de las plantas.

| Grupos    | Cuenta | Suma  | Promedio    | Varianza   |
|-----------|--------|-------|-------------|------------|
| Sistema 1 | 52     | 298   | 5.730769231 | 1.5880543  |
| Sistema 2 | 58     | 245.8 | 4.237931034 | 1.25432547 |
| Sistema 3 | 49     | 244.5 | 4.989795918 | 1.95260204 |
| Sistema 4 | 57     | 241.9 | 4.243859649 | 0.82857769 |
| Sistema 5 | 41     | 142.5 | 3.475609756 | 1.03889024 |
| Sistema 6 | 41     | 160.8 | 3.92195122  | 2.2572561  |
| Sistema 7 | 59     | 225.1 | 3.815254237 | 0.7023495  |
| Sistema 8 | 66     | 271.5 | 4.113636364 | 0.8051958  |

| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F          | Probabilidad            | Valor crítico para F |
|---------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|------------|-------------------------|----------------------|
| Entre grupos              | 179.7510296       | 7                  | 25.67871851               | 20.5913055 | 9.075*10 <sup>-24</sup> | 2.03164874           |
| Dentro de los grupos      | 517.5324219       | 415                | 1.247066077               |            |                         |                      |
| Total                     | 697.2834515       | 422                |                           |            |                         |                      |

*Nota:* Tabla que muestra los valores de los cambios en la altura de plantas de berro.

Considerando la tabla del ANOVA clásico (tabla 12) en donde se observa la gran diferencia entre las varianzas de las alturas de las plantas entre cada sistema y la prueba de Levene,  $p < 0.05$ . Se puede inferir que el ANOVA normal que supone o requiere homogeneidad entre varianzas de las muestras para poder ser aplicado no es suficiente para el análisis. Por lo tanto para el análisis de los datos de forma objetiva se realiza un ANOVA de Welch (Welch, 1951). El cual es un método estadístico más fuerte que el ANOVA clásico cuando no se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas (Delacre et al. 2019).

### Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 13. Análisis de Varianza de Welch para la altura de las plantas.

| Efecto  | FW (Welch) | Df <sub>1</sub> (numerador) | Df <sub>2</sub> (denominador) | p                       |
|---------|------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Sistema | 17.82      | 7                           | 169.227                       | 3.792*10 <sup>-19</sup> |

*Nota:* Varianza de Welch con respecto a la altura de las plantas.

Los resultados del ANOVA de Welch (tabla 13) mostro diferencias estadísticamente muy significativas entre los sistemas con un valores estadísticos de  $F(7,415) = 20.59$ , y  $p < 0.0001$ , el cual significa que al menos un sistema es muy diferente de los demás en relación a la altura media de las plantas (Field, 2018). Por lo tanto, dado que se demostró las diferencias entre sistemas se procede a la comparación de pares de sistemas por medio de pruebas t de Welch (Welch, 1951) y con corrección de Bonferroni para identificar qué sistemas difieren entre sí. La corrección de Bonferroni se puede aplicar en las siete comparaciones realizadas en la investigación para controlar errores del tipo I en el estudio ( $\alpha$  ajustado =  $0.05/7 \approx 0.0074$ ) (Bland & Altman, 1995).

Tabla 14. Estadísticos descriptivos y supervivencia.

| Sistema | n  | Media (cm) | DE (cm) | Supervivencia (%) |
|---------|----|------------|---------|-------------------|
| S1      | 52 | 5.73       | 1.26    | 57.8              |
| S2      | 58 | 4.24       | 1.12    | 64.4              |
| S3      | 49 | 4.99       | 1.40    | 54.4              |
| S4      | 57 | 4.24       | 0.91    | 63.3              |
| S5      | 41 | 3.48       | 1.02    | 45.6              |
| S6      | 41 | 3.92       | 1.50    | 45.6              |
| S7      | 59 | 3.82       | 0.84    | 65.6              |
| S8      | 66 | 4.11       | 0.90    | 73.3              |

*Nota:* Tabla que muestr valores de supervivencia de plantas de berro

En la tabla 14 se observa los sistemas que mayor altura promedio mostraron fueron el sistema 1 y el 3 ( $5.73 \pm 1.26$  cm y  $4.99 \pm 1.40$  cm respectivamente). El caso del sistema 5, el control, el cual no contiene ningún tipo de sustrato solido presenta la menor altura promedio entre todos los sistemas estudiados ( $3.48 \pm 1.02$  cm). En relación a sustratos crudos de bentonitas como arenas tanto saturadas como no saturadas con fosforo presentaron valores promedios intermedios (45.6 % - 73.3%) respecto al control. En supervivencia la arena volcánica saturada con fosforo (73.3%) presento mejores resultados, luego le sigue la arena cruda y las bentonitas crudas y el control fue la de menor supervivencia. Los datos anteriores indican que introducir sustratos solidos mejora supervivencia del berro, pero el crecimiento depende directamente del tipo de sustrato.

### Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 15. Comparaciones con el control (S5) – Sistemas con diferencias significativas.

| Comparación | Diferencia (cm) | EE    | gl   | t    | p-ajustado* | IC 95%      |
|-------------|-----------------|-------|------|------|-------------|-------------|
| S1 vs S5    | 2.255           | 0.236 | 90.9 | 9.54 | <0.001      | [1.79,2.27] |
| S2 vs S5    | 0.762           | 0.217 | 90.9 | 3.52 | <0.001      | [0.33,1.19] |
| S3 vs S5    | 1.514           | 0.255 | 86.5 | 5.93 | <0.001      | [1.01,2.02] |
| S4 vs S5    | 0.768           | 0.200 | 80.2 | 3.85 | <0.001      | [0.37,1.17] |
| S8 vs S5    | 0.638           | 0.194 | 76.8 | 3.29 | 0.011       | [0.25,1.02] |

Nota: \*Corrección de Bonferroni ( $\alpha=0.05/7=0.0074$ ). Solo se muestran diferencias con p-ajustado <0.05 (S8 queda marginal).

Dado los análisis anteriores y confirmando que las varianzas entre sistemas son distintas estadísticamente, se realizaron pruebas t de Welch, las cuales son recomendadas para este caso de muestras independientes; además de la aplicación de correcciones de Bonferroni para el control de errores tipo I entre los 7 sistemas. En la tabla 15 se presentan las comparaciones de los sistemas que contienen sustrato bentonita (Sistema 1-4) y del Sistema 8 con arena volcánica con el control (Sistema 5); se observa que si presentan diferencias significativas con el valor de p-ajustado < 0.05. El caso específico del Sistema 8 con p = 0.011 el cual es marginalmente significativo, su valor p no es menor a 0.05 esto sugiere que aún podría existir algún tipo de efecto real, pero según algunos autores bajo el criterio de Bonferroni no lo consideran significativo. Los sistemas que más presentan diferencias según la tabla 15 son el sistema 3 con 2.26 cm de diferencia, intervalos de confianza 95% de 1.79-2.27 y 1.51 cm de diferencia e intervalos de confianza 95% de 1.01-2.02.

Tabla 16. Comparaciones con el control (S5)- Sistemas sin diferencias significativas.

| Comparación | Diferencia (cm) | EE    | gl   | t    | p-crudo | p-ajustado* | IC 95%        |
|-------------|-----------------|-------|------|------|---------|-------------|---------------|
| S6 vs S5    | 0.446           | 0.284 | 70.4 | 1.57 | 0.120   | 0.840       | [-0.12, 1.01] |
| S7 vs S5    | 0.340           | 0.193 | 75.0 | 1.76 | 1.76    | 0.581       | [-0.04, 0.72] |

\*Corrección de Bonferroni. No significativo (p-ajustado > 0.05)

Nota: Comparación con control.

En la tabla 16 los sistemas 6 correspondiente al que tiene solución sin fosforo y 7 correspondiente al sistema con arena volcánica cruda no presentaron diferencias estadísticamente significativas con el control, mostrando un valor de p-ajustado >0.05.



### Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 17. Comparación Bentonitas vs Arenas.

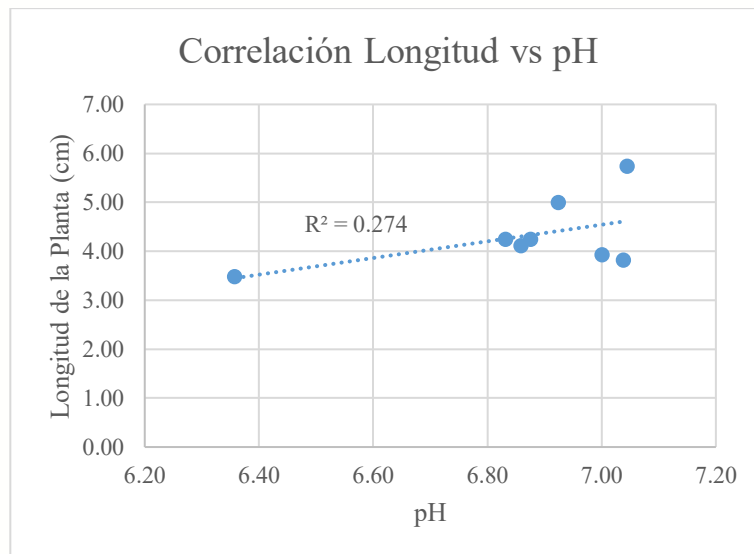
| Grupo     | n   | Media (cm) | Varianza | Diferencia | EE      | gl     | t      | P                      |
|-----------|-----|------------|----------|------------|---------|--------|--------|------------------------|
| Bentonita | 216 | 4.76944    | 1.745015 | 0.796644   | 0.11942 | 332.41 | 6.6707 | $1.067 \cdot 10^{-10}$ |
| Arenas    | 125 | 3.9728     | 0.772963 |            |         |        |        |                        |

*Nota:* Tabla de comparación de propiedades de arcilla y arena

Con relación a la comparación entre sistemas con sustratos sólidos distintos se agruparon los sistemas (tabla 17) que contenían bentonita (funcionalizada y cruda) los cuales son S1 –S4 con  $n=216$  y los sistemas que contenían arena volcánica (saturada y no saturada con fósforo) correspondientes a S7-S8 con  $n=125$ . Los resultados de la prueba de *t* Welch ( $t(332.41)=6.67 < 0.0001$ ), indican que los sistemas con bentonita exhiben una altura promedio de 0.8 cm mayor que los sistemas con arena (tabla 3). Estos valores se calcularon con un intervalo de confianza del 95% y límites [0.56, 1.04]. El resultado evidencia que sustratos a base de bentonita en sistemas hidropónicos ya sea saturados con fósforo o presencia de fósforo en la solución nutritiva se prefieren para incrementar el crecimiento del berro (Quinn & Keough, 2002) más que los sustratos a base de arena volcánica. Por lo tanto se puede inferir que incluir sustrato además de la solución nutritiva en el sistema hidropónico mejora la supervivencia según los resultados (ver tabla 14) pero respecto a la altura de la planta se prefiere sustratos de bentonita funcionalizada y arena saturada con fósforo como en el sistema 8. Estos resultados se confirman con otros estudios que han demostrado que la capacidad de intercambio catiónico y la liberación lenta de nutrientes de las bentonitas benefician el crecimiento vegetal (Churchman et al., 2006; Murray, 2000).

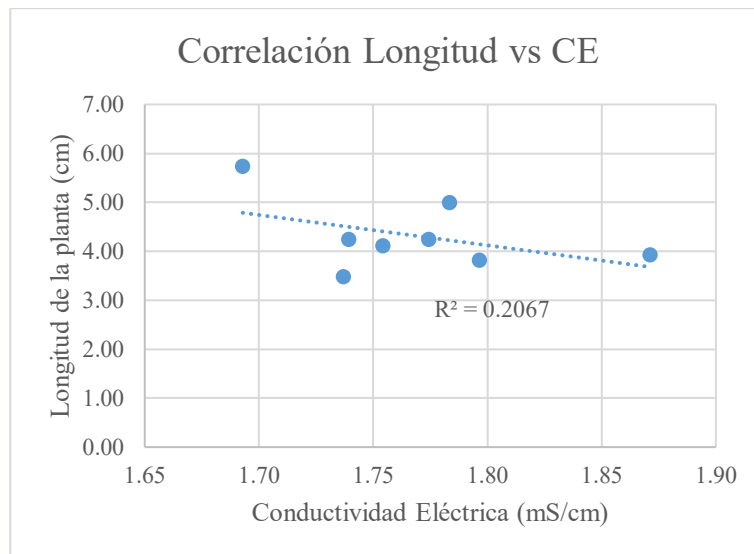
## Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 23. Correlación longitud vs. pH.



*Nota:* Grafico que muestra la correlación del parametro longitud y el pH

Figura 24. Correlación longitud vs. CE.



*Nota:* Grafico que muestra la correlación de la longitud y la conductividad eléctrica.

### Informe final de Proyecto de Investigación

Según las Figuras 23 y 24, el pH es más determinante que la CE para el crecimiento del berro al comparar sus coeficientes de determinación de 0.274 y 0.206, respectivamente. Esto es consistente con lo indicado en la literatura, ya que el berro es sensible a la alcalinidad. (Resh, 2013; Marschner, 2012). El valor de  $R^2$  menor al 30% indica que otros factores no medidos (oxigenación, luz, genética) explican la mayor parte de la variación. Esto es común en estudios biológicos (Quinn & Keough, 2002; Montgomery, 2017). Específicamente para el sistema 1, se logró un pH moderadamente ácido (6.8–7.0) y una CE baja a moderada, condiciones que maximizan la absorción de nutrientes sin estrés osmótico.

Tabla 18. Masas de material vegetal cosechado fresco y liofilizado.

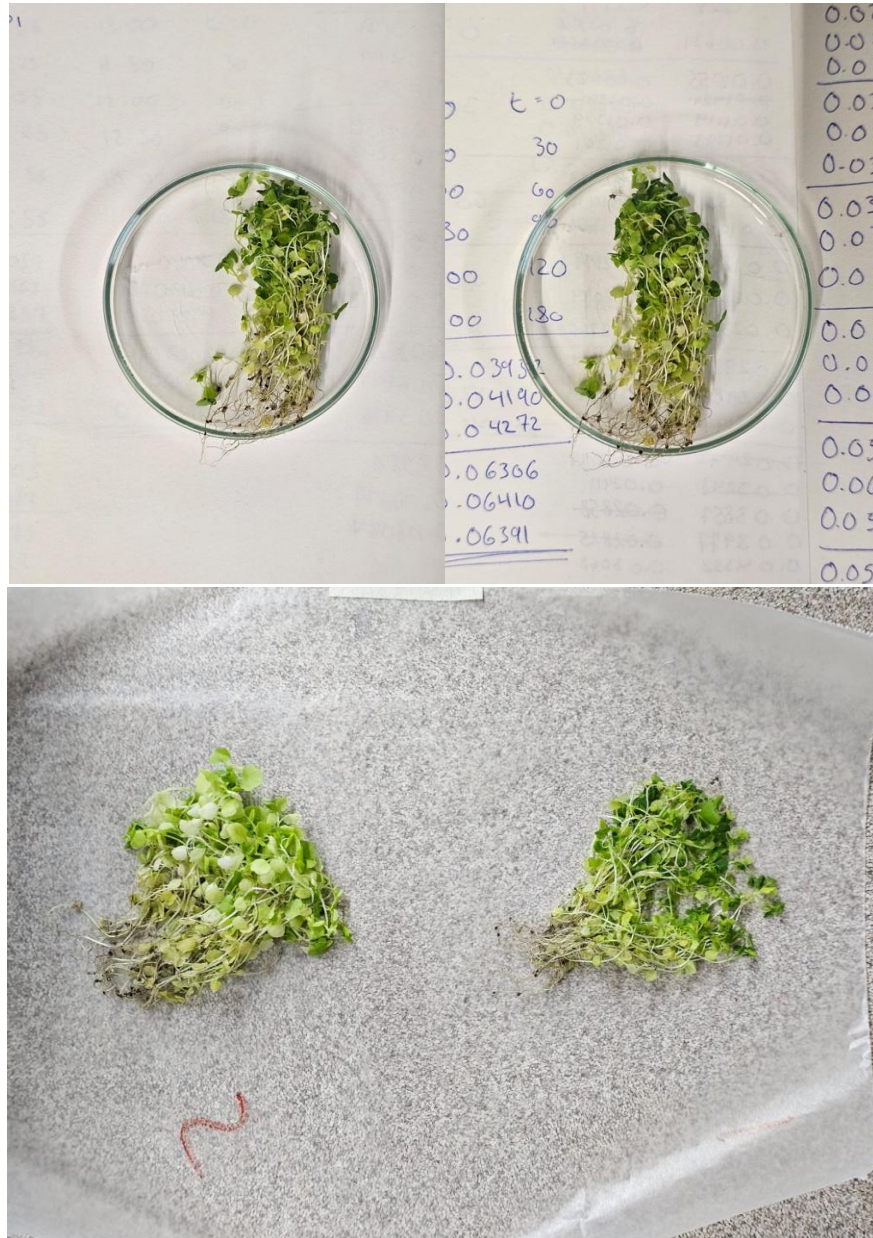
| Sistema   | Pesos fresco | Peso liofilizado | % Material seco | % agua |
|-----------|--------------|------------------|-----------------|--------|
| Sistema 1 | 1.4529       | 0.1201           | 8.26            | 91.74  |
| Sistema 2 | 2.1264       | 0.1510           | 7.10            | 92.90  |
| Sistema 3 | 2.9162       | 0.2264           | 7.76            | 92.24  |
| Sistema 4 | 1.1995       | 0.0872           | 7.27            | 92.73  |
| Sistema 5 | 0.7120       | 0.0709           | 9.96            | 90.04  |
| Sistema 6 | 1.1780       | 0.1052           | 8.93            | 91.07  |
| Sistema 7 | 1.1780       | 0.1373           | 11.66           | 88.34  |
| Sistema 8 | 0.7527       | 0.0818           | 10.87           | 89.13  |

*Nota:* Tabla que informa acerca de los valores de masa de planta obtenido.

En el caso del último objetivo planteado: “Determinar el efecto de las organoarcillas saturadas con fósforo sobre la concentración de metabolitos secundarios producidos por *Nasturtium officinale*.” No se logró realizar la determinación porque la cantidad de muestra de biomasa liofilizada fue insuficiente (Tabla 19). Se estuvieron realizando pruebas en la Unidad de Análisis Instrumental UAI con el equipo HPLC para ver si se podía adaptar el método para esas cantidades tan pequeñas de muestra.

# Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 25. Cosecha de plantas previo a liofilizar.



*Nota:* Fotografía de las cantidades de biomasa obtenidas por cada experimento.



## Informe final de Proyecto de Investigación

### 9. Propiedad intelectual

No se generaron resultados susceptibles de propiedad intelectual.

### 10. Beneficiarios directos e indirectos

Tabla 19. Beneficiarios directos e indirectos de la investigación.

| Resultados, productos o hallazgos                    | Beneficiarios directos (institución, organización, sector académico o tipo de personas) | Número de beneficiarios directos | Beneficiarios indirectos (institución, organización, sector académico o tipo de personas) | Número de Beneficiarios indirectos |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Método para sistemas de cultivo hidropónico de berro | Municipalidad de Villa Canales                                                          | 1                                | Grupos focales coordinados por la municipalidad                                           | 25 personas                        |
| Transferencia de conocimiento                        | Municipalidad de San Miguel Uspantán el Quiché                                          | 1                                | Grupos comunitarios coordinados por la municipalidad de Uspantán, el Quiché               | 3500 personas                      |

Nota: en esta tabla se muestran de forma ordenada los beneficiarios de este proyecto

### 11. Estrategia de divulgación y difusión de los resultados.

Tabla 20. Estrategias de divulgación.

|                        | Sí | No |
|------------------------|----|----|
| Presentación TV        |    | X  |
| Entrevistas radiales   |    | X  |
| Podcast                |    | X  |
| Entrevista DIGI        |    | X  |
| Recursos audiovisuales |    | X  |



### Informe final de Proyecto de Investigación

|                                                    | Sí | No |
|----------------------------------------------------|----|----|
| Congresos científicos nacionales o internacionales |    | X  |
| Talleres                                           |    | X  |
| Publicación de libro                               |    | X  |
| Publicación de artículo científico                 | X  |    |
| Divulgación por redes sociales institucionales     | X  |    |
| Presentación pública                               |    | X  |
| Presentación autoridades USAC                      | X  |    |
| Presentación a beneficiarios directos              | X  |    |
| Entrega de resultados                              | X  |    |
| Docencia en grado                                  | X  |    |
| Docencia postgrado                                 |    | X  |
| Póster científico                                  |    | X  |
| Trifoliales                                        |    | X  |
| Conferencias                                       | X  |    |
| Otro (describa)                                    |    | X  |

Nota: en esta tabla se muestran los medios de divulgación que serán considerados para dar a conocer los resultados del presente estudio.

## 12. Contribución a las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND)

La investigación contribuyó a las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND) a través de la meta de Seguridad alimentaria y nutricional, en el apoyo a la comprensión y el desarrollo de un cultivo hidropónico de berro empleando organoarcillas saturadas con fósforo. Esto con el objetivo de brindar una opción de fertilización en este contexto, que brinde opciones de cultivo en un margen de tiempo aceptable y con un contenido nutricional comparable al cultivo tradicional, evitando el uso de suelo.



## Informe final de Proyecto de Investigación

### 13. Vinculación

La síntesis de órganoarcillas se realizó en el Laboratorio de Fisicoquímica de la Escuela de Química, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia USAC. El desarrollo de cultivos hidropónicos se realizó en el Laboratorio 300 de la Unidad de Análisis Instrumental de la Escuela de Química, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia USAC. La preservación de muestras vegetales a través de liofilización se llevó a cabo en la Universidad del Valle de Guatemala. Los ensayos de espectroscopía UV-Vis y HPLC se llevaron a cabo en la Unidad de Análisis Instrumental de la Escuela de Química.

### 14. Conclusiones

1. Se logró confirmar la eficiencia de las organoarcillas para la captura de fósforo en plantas de berro (*Nasturtium officinale*), realizando determinación de espectrometría UV VIS para el efecto en matriz y en solución.
2. Se comprobó que las organoarcillas funcionalizadas con histidina lograron suministrar nutrientes a las plantas de berro para el desarrollo de biomasa.
3. No se logró evaluar del todo la capacidad de las organoarcillas saturadas con fosforo para promover y liberar de manera controlada el fosforo en el cultivo de berro.
4. Se comprobó que el experimento que se desarrolló empleando una arcilla funcionalizada con histidina saturada con fósforo mostró mejores resultados en el desarrollo de biomasa y vitalidad de plantas comparado con el experimento en el que no se incluye fósforo.
5. No se logró determinar la concentración de metabolitos secundarios porque no se obtuvo una cantidad adecuada de biomasa para poder desarrollar el método por HPLC.
6. En todos los experimentos se observó un desarrollo de biomasa con algunas diferencias en cuanto a la longitud y la masa sin evidenciar diferencias muy marcadas en cuanto a tamaño de tallo y hojas así como en el color y brillo de las hojas.

### 15. Recomendaciones

1. Desarrollar los sistemas hidropónicos en invernaderos o en su defecto emplear un número adecuado de lámparas LED para compensar la cantidad de luz requerida para que las plantas puedan generar biomasa.
2. Contactar con una entidad seria y responsable para la realización de los análisis instrumentales que se pudieran requerir.
3. Mezclar la arcilla funcionalizada con algún material aglutinante para aumentar el tamaño de partícula.



## Informe final de Proyecto de Investigación

4. Evaluar la efectividad de organoarcillas saturadas con fósforo como fuente de macronutrientes en el desarrollo de cultivos hidropónicos de berro (*Nasturtium officinale*),

## Referencias

- 4500-p phosphorus. (2017). En *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association.
- Aguilera-Peña, R. (2020). Hidroponía una oportunidad para la seguridad alimentaria de las comunidades rurales. *Desarrollo Local Sostenible*, junio. Benetoli, L., De Souza, C., Da Silva, K., De Souza, I., De Santana, H., Paesano, A., Da Costa, A., Zaia, C., & Zaia, D. (2007). Amino Acid Interaction with and Adsorption on Clays: FT-IR and Mössbauer Spectroscopy and X-ray Diffractometry Investigations. *Orig Life Evol Biosph*, 37, 479-493. <https://doi.org/10.1007/s11084-007-9072-7>
- Álvarez-Mejía, C., Estrada-Luna, A. A., & Vielle-Calzada, J.-P. (2006). Gene trapping and its applications in seed floricultural biotechnology. En J. A. Teixeira da Silva (Ed.), *Floriculture, ornamental and plant biotechnology* (pp. 470-475). Global Science Books.
- Benetoli, L. O., de Souza, C. M., da Silva, K. L., de Souza Jr, I. G., de Santana, H., Paesano Jr, A., ... & Zaia, D. A. (2007). Amino acid interaction with and adsorption on clays: FT-IR and Mössbauer spectroscopy and X-ray diffractometry investigations. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 37(6), 479-493. <https://doi.org/10.1007/s11084-007-9072-7>
- Bland, J. M., & Altman, D. G. (1995). Multiple significance tests: the Bonferroni method. *BMJ*, 310(6973), 170. <https://doi.org/10.1136/bmj.310.6973.170>
- Bergaya, F., & Lagaly, G. (Eds.). (2013). *Handbook of clay science* (2nd ed.). Elsevier.
- Bolland, M. D. A., & Gilkes, R. J. (1998). The influence of previous phosphorus applications on the effectiveness of phosphorus sources for plants. *Fertilizer Research*, 53(3), 211-221. <https://doi.org/10.1071/SR00025>
- Bondarev, A., Zhilyakova, E. T., Avtina, N., Demina, N., & Razmakhnin, K. (2024). Ultrasonic Activation of Mineral Sorbents. *Drug development & registration*, 13. <https://doi.org/10.33380/2305-2066-2024-13-1-1630>
- Borah, D., Nath, H., & Saikia, H. (2022). Modification of bentonite clay & its applications: A review. *Reviews in Inorganic Chemistry*, 42(3), 265-282. <https://doi.org/10.1515/revic-2021-0030>
- Bunt, A. C. (1988). *Media and mixes for container-grown plants*. Unwin Hyman.
- Calicioglu, O., Flammini, A., Bracco, S., Bellù, L., & Sims, R. (2019). The Future Challenges of Food and Agriculture: An Integrated Analysis of Trends and Solutions. *Sustainability*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/su11010222>
- Chang, J., Clay, D., Arnall, B., Reicks, G., Clay, D., Clay, S., & Bruggeman, S. (2017). *Essential Plant Nutrients, Fertilizer Sources, and Application Rates Calculations*. <https://doi.org/10.2134/practicalmath2017.0026>
- Churchman, G. J., Gates, W. P., Theng, B. K. G., & Yuan, G. (2006). Clays and clay minerals for pollution control. *Developments in Clay Science*, 1, 625-675. [https://doi.org/10.1016/S1572-4352\(05\)01020-2](https://doi.org/10.1016/S1572-4352(05)01020-2)



### Informe final de Proyecto de Investigación

- De Boodt, M. A. V. O., & Verdonck, O. (1971, June). The physical properties of the substrates in horticulture. In *III Symposium on Peat in Horticulture* 26 (pp. 37-44). <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1972.26.5>
- Delacre, M., Lakens, D., & Leys, C. (2019). Why psychologists should by default use Welch's t-test instead of Student's t-test. *International Review of Social Psychology*, 32(1), 12. <https://doi.org/10.5334/irsp.82>
- Di Noia, J. (2014). Defining Powerhouse Fruits and Vegetables: A Nutrient Density Approach. *Preventing Chronic Disease*, 11, E95. <https://doi.org/10.5888/pcd11.130390>
- Ditta, A., & Arshad, M. (2016). Applications and perspectives of using nanomaterials for sustainable plant nutrition. *Nanotechnology Reviews*, 5(2), 209-229. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2015-0060>
- Estrada-Palencia, E. G., Chanta-Bautista, W. O. y Rivera-Tello, R. R. (2022). *Evaluación de adsorción-desorción de fósforo empleando arcillas modificadas con aminoácidos y desarrollo de modelo matemático que describa su comportamiento*. Dirección General de Investigación de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Estrada-Palencia, E. G., Rivera-Tello, M. V., Ubeda-Contreras, A. C., Pérez-Gómez, S. A., Lux-Barrera, J. D., y Figueroa-Estrada, M. F. (2024). *Análisis de la viabilidad de las organoarcillas como posibles agentes de remediación de fosfatos en agua contaminada proveniente del lago de Amatitlán*. Dirección General de Investigación de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Faizy, H. S., Esmail, L. S., & Mahdi, H. S. (2021). Phytochemicals Analysis in Watercress (*Nasturtium Officinale*) Plant Extracts. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, 761(1), 012042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/761/1/012042>
- Fan, T., Wang, M., Wang, X., Chen, Y., Wang, S., Zhan, H., ... & Zha, S. (2021). Experimental study of the adsorption of nitrogen and phosphorus by natural clay minerals. *Adsorption Science & Technology*, 2021, 4158151. <https://doi.org/10.1155/2021/4158151>
- Field, A. (2018). *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics* (5th ed.). Sage Publications.
- Filippelli, G. M. (2002). The global phosphorus cycle. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 48(1), 391-425. <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.48.10>
- Going, B., Simpson, J., & Even, T. (2008). The influence of light on the growth of watercress (*Nasturtium officinale* R. Br.). *Hydrobiologia*, 607(1), 75-85. <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9368-2>
- Grattan, S. R., & Grieve, C. M. (1998). Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops. *Scientia horticulturae*, 78(1-4), 127-157. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(98\)00192-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(98)00192-7)
- Gupta, P., Sharma, V., & Nagpal, G. (2025). A comprehensive review of nano clay: From development and applications to research opportunities. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 44(6), e70055. <https://doi.org/10.1002/ep.70055>
- Hafez, I. H., Osman, A. R., Sewedan, E. A., & Berber, M. R. (2018). Tailoring of a Potential Nanoformulated Form of Gibberellic Acid: Synthesis, Characterization, and Field Applications on Vegetation and Flowering. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(31), 8237-8245. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b02761>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2016). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* (8th ed.). Pearson.



## Informe final de Proyecto de Investigación

- Helfenstein, J., Ringeval, B., Tamburini, F., Mulder, V. L., Goll, D. S., He, X., ... & Frossard, E. (2024). Understanding soil phosphorus cycling for sustainable development: A review. *One Earth*, 7(10), 1727-1740. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.07.020>
- Hibbert, L., & Taylor, G. (2022). Improving phosphate use efficiency in the aquatic crop watercress (*Nasturtium officinale*). *Horticulture Research*, 9, uhac011. <https://doi.org/10.1093/hr/uhac011>
- Hibbert, L. E., Qian, Y., Smith, H. K., Milner, S., Katz, E., Kliebenstein, D. J., & Taylor, G. (2023). Making watercress (*Nasturtium officinale*) cropping sustainable: Genomic insights into enhanced phosphorus use efficiency in an aquatic crop. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1279823. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1279823>
- Hou, E., Chen, C., Luo, Y., Zhou, G., Kuang, Y., Zhang, Y., ... & Wen, D. (2018). Effects of climate on soil phosphorus cycle and availability in natural terrestrial ecosystems. *Global change biology*, 24(8), 3344-3356. <https://doi.org/10.1111/gcb.14093>
- Ismadji, S., Soetaredjo, F. E., & Ayucitra, A. (2015). *Clay materials for environmental remediation* (Vol. 1). Springer International Publishing AG.
- Jones, J. B., Jr. (2016). *Hydroponics: A practical guide for the soilless grower* (3rd ed.). CRC Press.
- Kasprzhitskii, A., Lazorenko, G., Kharytonau, D. S., Osipenko, M. A., Kasach, A. A., & Kurilo, I. I. (2022). Adsorption mechanism of aliphatic amino acids on kaolinite surfaces. *Applied Clay Science*, 226, 106566. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106566>
- Klimek-Szczykutowicz, M., Szopa, A., & Ekiert, H. (2018). Chemical composition, traditional and professional use in medicine, application in environmental protection, position in food and cosmetics industries, and biotechnological studies of *Nasturtium officinale* (watercress) – a review. *Fitoterapia*, 129, 283-292. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2018.05.031>
- Klimek-Szczykutowicz, M., Dziurka, M., Blažević, I., Đulović, A., Granica, S., KoronaGłowniak, I., Ekiert, H., & Szopa, A. (2020). Phytochemical and Biological Activity Studies on *Nasturtium officinale* (Watercress) Microshoot Cultures Grown in RITA® Temporary Immersion Systems. *Molecules*, 25(22), Article 22. <https://doi.org/10.3390/molecules25225257>
- Kopittke, P. M., Lombi, E., Wang, P., Schjoerring, J. K., & Husted, S. (2019). Nanomaterials as fertilizers for improving plant mineral nutrition and environmental outcomes. *Environmental Science: Nano*, 6(12), 3513-3524. <https://doi.org/10.1039/C9EN00971J>
- Kuehl, R. O. (2000). *Design of experiments: Statistical principles of research design and analysis* (2nd ed.). Duxbury Press.
- Lam, V. P., Choi, J., & Park, J. (2021). Enhancing growth and glucosinolate accumulation in watercress (*Nasturtium officinale* L.) by regulating light intensity and photoperiod in plant factories. *Agriculture*, 11(8), 723. <https://doi.org/10.3390/agriculture11080723>
- Liu, W., Li, F., & Li, Y. (2020). Development and Future Trends of Internet of Things. En *Cyber Security Intelligence and Analytics* (Vol. 928). Springer International Publishing AG.
- Marschner, P. (Ed.). (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.
- Merino, D., Iglesias, M., Mansilla, Y., Casalongué, C., & Alvarez, V. (2021). Fighting Against Plant Saline Stress: Development of a Novel Bioactive Composite Based on Bentonite and L-Proline. *Clays and Clay Minerals*, 69. <https://doi.org/10.1007/s42860-021-00120-1>



## Informe final de Proyecto de Investigación

- Modu, F., Adam, A., Aliyu, F., Mabu, A., & Alhaji Musa, M. (2020). A Survey of Smart Hydroponic Systems. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 5, 233-248. <https://doi.org/10.25046/aj050130>
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Mort, H., Metson, G. S., Neset, T.-S., Rodriguez, C., Martin-Ortega, J., Chapman, P. J., & Stutter, M. (2024). *Phosphorus, Eutrophication and the Importance of Scales: A Place-Based Transdisciplinary Analysis of Scalar Dynamics* (SSRN Scholarly Paper 4769535). <https://doi.org/10.2139/ssrn.4769535>
- Mukhopadhyay, R., & De, N. (2014). Nano clay polymer composite: synthesis, characterization, properties and application in rainfed agriculture. *Global J Bio Biotechnol*, 3(2), 133-138.
- Murray, H. H. (2000). Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview. *Applied Clay Science*, 17(5-6), 207-221. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(00\)00016-8](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(00)00016-8)
- Nascimento, R. D. S., Fortes, A. D. S., Abreu, I. R. D., Torres, F. D. P. M., Vieira, I. N. D. S., Barbosa, R., & Alves, T. S. (2026). Development of Activated Carbon-Modified Polymer Composites for Application in Hydroponic Systems. *Materials Research*, 29, e20250441. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2025-0441>
- Pandey, S., & Ramontja, J. (2016). Recent modifications of bentonite clay for adsorption applications. *Focus on Sciences*, 2(4), 1-10. <https://doi.org/10.21859/focsci-020455>
- Parolo, M. E., Pettinari, G. R., Musso, T. B., Sánchez-Izquierdo, M. P., & Fernández, L. G. (2014). Characterization of organo-modified bentonite sorbents: The effect of modification conditions on adsorption performance. *Applied Surface Science*, 320, 356-363. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.09.105>
- Pérez-Rodríguez, J. L., Pascual, J., Franco, F., Jiménez de Haro, M. C., Duran, A., Ramírez del Valle, V., & Pérez-Maqueda, L. A. (2006). The influence of ultrasound on the thermal behavior of clay minerals. *Journal of the European Ceramic Society*, 26(4), 747-753. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2005.07.015>
- Pulimi, M., & Subramanian, S. (2016). Nanomaterials for Soil Fertilisation and Contaminant Removal. En S. Ranjan, N. Dasgupta, & E. Lichtfouse (Eds.), *Nanoscience in Food and Agriculture*, 1, 229-246. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-39303-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-39303-2_8)
- Preethi-Rajan, P. R., Lada, R. R., & MacDonald, M. T. (2019). Advancement in indoor vertical farming for microgreen production. *American Journal of Plant Sciences*, 10(8), 1397-1408. <https://doi.org/10.4236/ajps.2019.108100>
- Quinn, G. P., & Keough, M. J. (2002). *Experimental design and data analysis for biologists*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511806384>
- Ranganathan, J., Waite, R., Searchinger, T., & Hanson, C. (2018). How to Sustainably Feed 10 Billion People by 2050, in *21 Charts*. <https://www.wri.org/insights/how-sustainably-feed-10-billion-people-2050-21-charts>
- Raviv, M., Lieth, J. H., & Bar-Tal, A. (Eds.). (2019). *Soilless culture: Theory and practice* (2nd ed.). Academic Press.
- Resh, H. M. (2013). *Hydroponic food production: A definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower* (7th ed.). CRC Press.



## Informe final de Proyecto de Investigación

- Romero-Mendez, M., & Rojas-Velázquez, Á. (2022). Comportamiento de un fertilizante de liberación lenta a base de organobentonita-fosfato en plantas de lechuga. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 44, 51. <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.1.51>
- Samulewski, R. B., Guimarães, R. T. D., & Zaia, D. A. M. (2021). Histidine adsorption onto modified montmorillonite under prebiotic chemistry conditions: A thermodynamic and kinetic study. *International Journal of Astrobiology*, 20(1), 81-92. <https://doi.org/10.1017/S1473550420000373>
- Savvas, D., & Gruda, N. (2018). Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry—A review. *Eur. J. Hortic. Sci*, 83(5), 280-293. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.5.2>
- Sesan. (2019, diciembre 11). ¿Qué es Seguridad Alimentaria y Nutricional -SAN-? SESAN Guatemala. <https://portal.sesan.gob.gt/2019/12/11/que-es-seguridadalimentaria-y-nutricional-san>
- Shannon, M. C., & Grieve, C. M. (1998). Tolerance of vegetable crops to salinity. *Scientia Horticulturae*, 78(1-4), 5–38. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(98\)00189-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(98)00189-7)
- Silva, I. A., Silva, D. S., Sousa, M. U., Menezes, R. R., Ferreira, H. S., & Neves, G. A. (2020). Encapsulation of nitrogen fertilizers in mixtures with organoclays for controlled release. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22(10), 2163-2176. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01967-z>
- Situación SAN. (s. f.). Recuperado 25 de marzo de 2024, de <https://portal.siinsan.gob.gt/situacion-san/>
- Sonneveld, C., & Voogt, W. (2009). Plant nutrition in future greenhouse production. In *Plant nutrition of greenhouse crops* (pp. 393-403). Dordrecht: Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2532-6\\_17](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2532-6_17)
- Steel, R. G. D., & Torrie, J. H. (1981). *Principles and procedures of statistics, a biometrical approach* (Ed. 2, p. 633).
- Sun, S.-W., Lin, Y.-C., Weng, Y.-M., & Chen, M.-J. (2006). Efficiency improvements on ninhydrin method for amino acid quantification. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19(2), 112-117. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2005.04.006>
- Tyagi, B., Chudasama, C. D., & Jasra, R. V. (2006). Characterization of surface acidity of an acid montmorillonite activated with hydrothermal, ultrasonic and microwave techniques. *Applied Clay Science*, 31(1), 16-28. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2005.07.001>
- United Nations for Food and Agriculture Organization (FAO)). (s. f.). *How to Feed the World in 2050*. [https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert\\_paper/How\\_to\\_Feed\\_the\\_World\\_in\\_2050.pdf](https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf)
- Unuabonah, E. I., Agunbiade, F. O., Alfred, M. O., Adewumi, T. A., Okoli, C. P., Omorogie, M. O., Akanbi, M. O., Ofomaja, A. E., & Taubert, A. (2017). Facile synthesis of new amino-functionalized agro-genic hybrid composite clay adsorbents for phosphate capture and recovery from water. *Journal of Cleaner Production*, 164, 652-663. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.160>
- USDA Plants Database. (s. f.). Recuperado 25 de marzo de 2024, de <https://plants.usda.gov/home/plantProfile?symbol=NAOF>



### Informe final de Proyecto de Investigación

- Utah State University. (s. f.). *How to Grow Watercress in Your Garden*. Recuperado 25 de marzo de 2024, de <https://extension.usu.edu/yardandgarden/research/watercress-in-the-garden>
- Velazquez-Gonzalez, R. S., Garcia-Garcia, A. L., Ventura-Zapata, E., BarceinasSanchez, 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), Article 5. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050646>
- Verma, Y., Datta, S. C., Mandal, I. K., & Sarkar, D. (2016). Effect of phosphorus loaded organically modified nanoclay-polymer composite on release and fixation of phosphorus and its uptake by wheat (*Triticum aestivum* L.). *J Pure Appl Microbiol*, 10(3), 2299-2306. <https://doi.org/10.22207/JPAM.10.3.71>
- Verma, Y., Datta, S. C., Mandzhieva, S. S., Jatav, S. S., Perelomov, L., Burachevskaya, M., & Rajput, V. D. (2023). Release behavior of phosphorus from bentonite clay-polymer composites with varying cross-linker levels, and neutralization degree. *Eurasian Soil Science*, 56(Suppl 2), S214-S226. <https://doi.org/10.1134/S1064229323601476>
- Wang, W. S., Chen, H. S., Wu, Y. W., Tsai, T. Y., & Chen-Yang, Y. W. (2008). Properties of novel epoxy/clay nanocomposites prepared with a reactive phosphorus-containing organoclay. *Polymer*, 49(22), 4826-4836. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.08.019>
- Welch, B. L. (1951). On the comparison of several mean values: An alternative approach. *Biometrika*, 38(3-4), 330-336. <https://doi.org/10.1093/biomet/38.3-4.330>
- Younis, A., Ahsan, M., Akram, A., Lim, K. B., Zulfiqar, F., & Tariq, U. (2022). Use of organic substrates in sustainable horticulture. *Biostimulants for crop production and sustainable agriculture*. CAB International, 122-138.
- Zafar, R., Zahoor, M., Shah, A., & Majid, F. (2017). Determination of antioxidants and antibacterial activities, total phenolic, polyphenol and pigment contents in *Nasturtium officinale*. *Pharmacologyonline*, 1, 11-18
- Zar, J. H. (2013). *Biostatistical analysis* (5th ed.). Pearson.
- Zeb, A. (2015). Phenolic profile and antioxidant potential of wild watercress (*Nasturtium officinale* L.). *SpringerPlus*, 4(1), 714. <https://doi.org/10.1186/s40064-015-1514-5>

## Informe final de Proyecto de Investigación

### Apéndice

Figura 26. Prueba de arcilla.



*Nota:* Datos experimentales obtenidos en la Ciudad Universitaria zona 12, edificio T-10, tercer nivel, Unidad de Análisis Instrumental (UAI).

Figura 27. Pruebas de llenado en sistemas hidropónicos.



*Nota:* Datos experimentales obtenidos en la Ciudad Universitaria zona 12, edificio T-10, tercer nivel, Unidad de Análisis Instrumental (UAI).

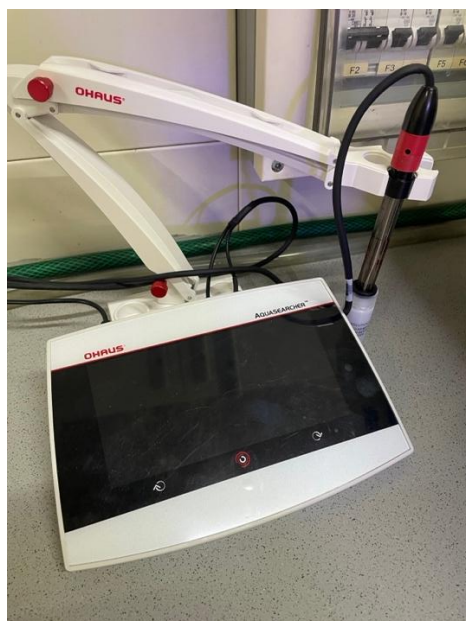
## Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 28. Semillas de berro utilizadas.



*Nota:* Datos experimentales obtenidos en la Ciudad Universitaria zona 12, edificio T-10, tercer nivel, Unidad de Análisis Instrumental (UAI).

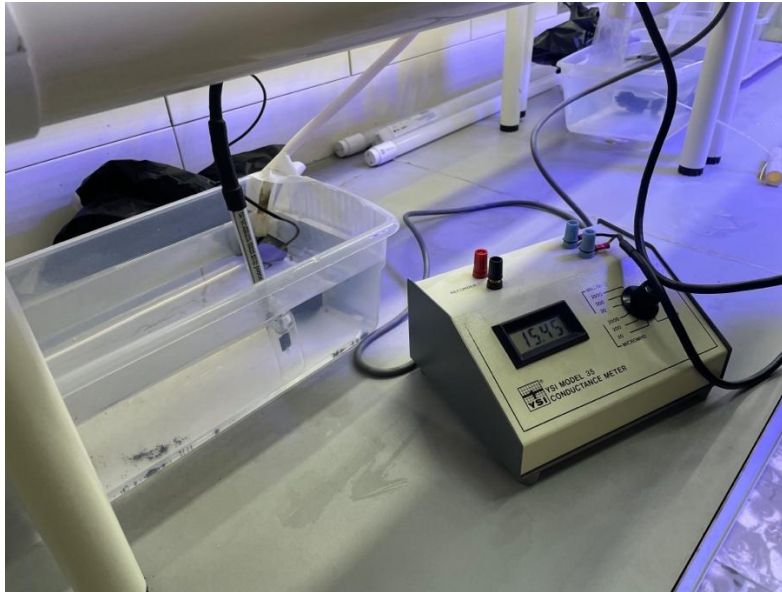
Figura 29. Potenciómetro para la medición de pH de soluciones nutritivas para su monitoreo diario.



*Nota:* Datos experimentales obtenidos en la Ciudad Universitaria zona 12, edificio T-10, tercer nivel, Unidad de Análisis Instrumental (UAI).

## Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 30. Medición de conductividad eléctrica en soluciones nutritivas para su monitoreo diario.



*Nota:* Datos experimentales obtenidos en la Ciudad Universitaria zona 12, edificio T-10, tercer nivel, Unidad de Análisis Instrumental (UAI).

## Informe final de Proyecto de Investigación

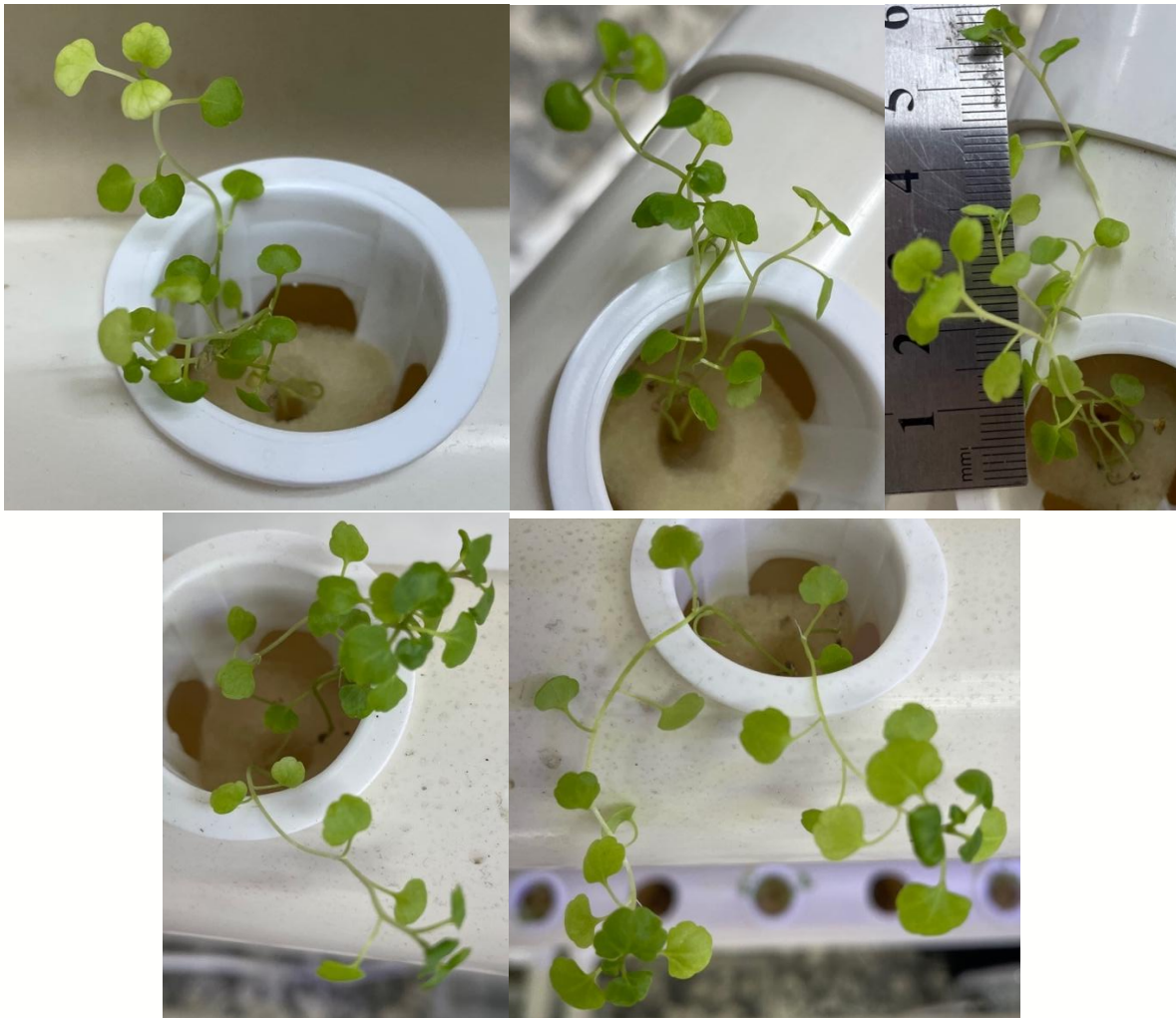
Figura 31. Sistemas hidropónicos bajo sistema de iluminación instalado para su crecimiento.



*Nota:* Datos experimentales obtenidos en la Ciudad Universitaria zona 12, edificio T-10, tercer nivel, Unidad de Análisis Instrumental (UAI).

### Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 32. Plantas de berro en sistemas hidropónicos.



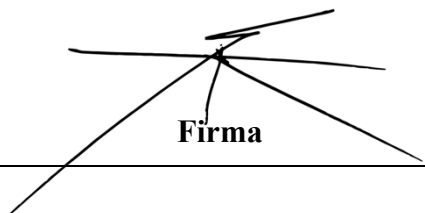
*Nota:* Datos experimentales obtenidos en la Ciudad Universitaria zona 12, edificio T-10, tercer nivel, Unidad de Análisis Instrumental (UAI).



## Informe final de Proyecto de Investigación

### Declaración del coordinador (a) del proyecto de investigación

El coordinador (a) de proyecto de investigación con base en el Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación cofinanciados por medio del Fondo de Investigación, artículo 20, elaboró este informe en función de los datos recabados en el proyecto.

|                                             |                                                                                                     |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>MSc. Erick Giovanni Estrada Palencia</b> | <br><b>Firma</b> |
| Fecha: 27/02/2026                           |                                                                                                     |

### Aval del director (a) del instituto, centro, unidad o departamento de investigación o coordinador de investigación del centro regional universitario

De conformidad con el artículo 19 del Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación cofinanciados por medio del Fondo de Investigación otorgo el aval al presente informe final de las actividades realizadas en el proyecto “Evaluación del aprovechamiento y uso del fósforo absorbido en organoarcillas por plantas de berro (*Nasturtium officinale*) en cultivos hidropónicos” en mi calidad de Directora del Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas, mismo que ha sido revisado y cumple su ejecución de acuerdo a lo planificado.

|                                                                                                                                   |                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Vo.Bo. Dra. María Eunice Enríquez Cotton</b><br><b>Directora del Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas -IIQB-</b> | <br><b>Firma</b> |
| Fecha: 27/02/2026                                                                                                                 |                                                                                                       |



### Recepción de la Dirección General de Investigación

|                                                                                                                                                         |                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Vo.Bo. Inga. Liuba Cabrera de Villagrán</b><br><b>Coordinadora del Programa Universitario de Investigación en Alimentación y Nutrición (PRUNIAN)</b> | <br><b>Firma</b> |
| Fecha: 27/02/2026                                                                                                                                       |                                                                                                       |

/Digi2025