

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**Producción de Lechuga Aeropónica Ecosostenible Empleando Biol como
Solución Nutritiva, Acondicionado en Invernadero en el Altiplano
Peruano**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autores:

Ronald Cutipa Zapana

Lizbeyka Baneza Vilca Quispe

Asesor:

Mtro. Bernardino Tapia Aguilar

Juliaca, octubre del 2025

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Mtro. Bernardino Tapia Aguilar, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“PRODUCCIÓN DE LECHUGA AEROPÓNICA ECOSOSTENIBLE EMPLEANDO BIOL COMO SOLUCIÓN NUTRITIVA, ACONDICIONADO EN INVERNADERO EN EL ALTIPLANO PERUANO”** de los autores; **Ronald Cutipa Zapana** y **Lizbeyka Baneza Vilca Quispe**, tiene un índice de similitud de 12% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 16 días del mes de marzo del año 2026.



Mtro. Bernardino Tapia Aguilar

Asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 03 día(s) del mes de octubre del año 2025 siendo 12:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del



de la presidente(a):

Ing. Enrique Hamani Guela el (la) secretario(a): Msc. Miguel Angel Salcedo Brizquez y los demás miembros: Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera Msc. Rose Melina Gallata Echara y el (la) asesor(a) Mtro. Bernardino Tapia Aguilar

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado:

"Producción de Lechuga Aeropónica Ecosostenible Empleando Biol como Solución Nutritiva, Acondicionado en Invernadero en el Altiplano Peruano"

- del(los) bachiller(es): a) Ronald Gutija Zapana
- b) Lizbeyka Baneza Vilca Quique
- c) _____

conducente a la obtención del título profesional de:

Ingeniero Ambiental
(Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Ronald Gutija Zapana

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>15</u>	<u>B-</u>	<u>Bueno</u>	<u>Muy Bueno</u>

Bachiller (b): Lizbeyka Baneza Vilca Quique

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>15</u>	<u>B-</u>	<u>Bueno</u>	<u>Muy Bueno</u>

Bachiller (c): _____

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

Después de la parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

[Firma]
Presidente/a

[Firma]
Asesor/a

[Firma]
Bachiller (a)

[Firma]
Miembro

[Firma]
Bachiller (b)

[Firma]
Secretario/a

[Firma]
Miembro

Bachiller (c)

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, damos gracias a Dios, fuente de sabiduría y fortaleza, quien ha guiado cada paso de nuestra vida académica y personal. A Él sea toda la gloria y honra por haberme sostenido en los momentos de dificultad y por permitirme culminar esta etapa tan importante.

A nuestros amados padres, cuyo esfuerzo, sacrificio y amor incondicional han sido el pilar fundamental de nuestra formación. Ellos nos enseñaron a perseverar con fe y humildad, y este logro también les pertenece.

Expresamos nuestro más sincero reconocimiento al Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera, por su orientación, paciencia y apoyo constante durante el desarrollo de esta investigación, siendo un ejemplo de compromiso profesional y dedicación.

A la Universidad Peruana Unión, mi alma máter, por acogernos en un entorno de formación académica integral donde los principios cristianos se entrelazan con el quehacer científico, preparándonos no solo como profesionales competentes, sino también como siervos de Dios para la sociedad.

Con profunda gratitud, cerramos esta etapa convencidos de que cada logro es fruto de la fe, la familia y la guía divina.

INDICE GENERAL

INDICE GENERAL	V
ÍNDICE DE TABLAS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
I. INTRODUCCIÓN.....	11
II. MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
3.1 Condiciones fisicoquímicas del sistema aeropónico	22
3.2 Eficiencia hídrica y energética del sistema.....	22
3.3 Respuesta morfológica de la lechuga al uso de biol.....	24
3.4 Calidad fisicoquímica del tejido vegetal	27
3.5 Inocuidad microbiológica (Escherichia coli).....	30
3.6 Contenido nutricional y absorción mineral	32
3.7 Análisis de rentabilidad económica.....	34
IV. CONCLUSIONES	37
V. LITERATURA CITADA	38
VI. ANEXOS	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Concentración de nutrientes solución La Molina en ppm.	17
Tabla 2 Contenido nutricional del biol obtenido en la UPEU-Juliaca.....	18
Tabla 3 Uso eficiente del agua en lechuga aeropónica vertical altoandino vs. evidencia internacional.	23
Tabla 4 Análisis comparativo del consumo y costo mensual de sistemas de bombeo.	24
Tabla 6 Comparación de las características fisicoquímicas entre tratamientos y variedades.	28
Tabla 7 Análisis nutricional foliar.	33
Tabla 8 Presupuesto para la producción de lechuga aeropónica ecosostenible.	34
Tabla 9 Rentabilidad económica del sistema aeropónico con uso de biol en el altiplano peruano (producción de lechuga, 360 plantas en dos meses, área de 16 m ²).	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Materiales utilizados en el ensamblaje del sistema aeropónico.	14
Figura 2	Sistema recirculante aeropónico en 3D.	15
Figura 3	Flujograma del proceso de germinación y trasplante al sistema aeropónico vertical. ..	16
Figura 4	Efectos de la aplicación de biofertilizante sobre los parámetros morfológicos de crecimiento de la lechuga: desarrollo radicular, altura de la planta, número de hojas y peso fresco.....	25
Figura 5	Efecto de la dosificación y altura de corte en la densidad de colonias microbiana.....	30

GLOSARIO

Aeroponía: Técnica de cultivo sin suelo donde las raíces de las plantas permanecen suspendidas en el aire y se alimentan mediante nebulización de solución nutritiva.

Biol: Fertilizante líquido orgánico obtenido mediante la fermentación anaeróbica, estiércol bovino en biodigestores.

Conductividad eléctrica (CE): Medida de la concentración de sales disueltas en la solución nutritiva, expresada en mS cm^{-1} .

Eficiencia en el uso del agua (WUE): Relación entre la biomasa producida y el volumen de agua consumido, expresada en L kg^{-1} .

Escherichia coli (E. coli): Bacteria indicadora de contaminación fecal utilizada para evaluar la inocuidad del cultivo.

Gradiente vertical: Variación de las condiciones ambientales (luz, oxígeno y temperatura) a lo largo de la altura de los módulos aeropónicos.

Inocuidad microbiológica: Ausencia de microorganismos patógenos que representen riesgo para la salud humana en el producto final.

Oxígeno disuelto (OD): Cantidad de oxígeno disponible en la solución nutritiva, esencial para la respiración radicular.

pH: Medida de acidez o alcalinidad de la solución nutritiva, mantenida en el rango óptimo de 5,5 a 6,5.

**Producción de Lechuga Aeropónica Ecosostenible Empleando Biol como Solución
Nutritiva, Acondicionado en Invernadero en el Altiplano Peruano**

RESUMEN

La producción de lechuga en sistema aeropónico en el altiplano peruano fue evaluada con el objetivo de analizar el efecto del biol como solución nutritiva alternativa a la fertilización convencional. Se ensayaron tres concentraciones de biol (40%, 60% y 80%) y una solución estándar como control en diferentes cultivares. Los resultados mostraron que la concentración de 60% presentó el mejor desempeño agronómico, destacando la variedad White Boston. El sistema alcanzó un rendimiento hídrico de 9.19 L kg^{-1} , considerablemente inferior al de la agricultura tradicional. Asimismo, se observó un incremento en la absorción de nutrientes esenciales como Ca, P, K y Zn. No obstante, se detectó la presencia de *Escherichia coli*, lo que evidencia la necesidad de optimizar el manejo del biol para garantizar la inocuidad del cultivo. Se concluye que el sistema aeropónico con biol constituye una alternativa sostenible y eficiente para zonas con escasez hídrica, aunque requiere mejoras en el control sanitario.

Palabras clave: (aeroponía; lechuga; biol; altiplano peruano; ecosostenibilidad).

**Produção de Alface Aeropônica Ecosustentável Empregando Biol como Solução Nutritiva,
Acondicionada em Estufa no Altiplano Peruano**

RESUMO

A produção de alface em sistema aeropônico no altiplano peruano foi avaliada com o objetivo de analisar o efeito do biol como solução nutritiva alternativa à fertilização convencional. Foram testadas três concentrações de biol (40%, 60% e 80%) e uma solução padrão como controle, utilizando diferentes cultivares de alface. Os resultados indicaram que a concentração de 60% apresentou o melhor desempenho agrônômico, destacando-se a cultivar White Boston. O sistema alcançou um rendimento hídrico de 9,19 L kg⁻¹, significativamente inferior ao da agricultura convencional. Além disso, observou-se aumento na absorção de nutrientes essenciais, como Ca, P, K e Zn. No entanto, foi detectada a presença de *Escherichia coli*, evidenciando a necessidade de aprimorar o manejo do biol para garantir a inocuidade do produto. Conclui-se que o sistema aeropônico com uso de biol constitui uma alternativa sustentável e eficiente para regiões com escassez hídrica, embora requeira melhorias no controle sanitário.

Palavras-chave: aeroponia; alface; biol; altiplano peruano; ecosustentabilidade.

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento global de la demanda agrícola ha impulsado un aumento del 30% en el uso de plaguicidas y fertilizantes por hectárea entre 2002 y 2018, según la ONU (2022). En el departamento de Puno, Perú, se refleja esta tendencia, enfrentando desafíos adicionales debido a condiciones climáticas extremas. Así lo menciona Reny Diaz (2013), La variabilidad térmica, con temperaturas máximas entre 17,7 °C y 15,1 °C, y mínimas entre -5,3 °C y 2,8 °C, estos por su ubicación a más de 3800 msnm, junto con un periodo de precipitaciones concentrado entre diciembre y febrero (representando más del 55% de la precipitación anual), evidencia la presión sobre la agricultura y la seguridad alimentaria en la región. La sequía, agravada por el cambio climático, afecta los rendimientos de los cultivos y la disponibilidad de agua para riego, impactando en la salud y nutrición de las comunidades rurales, especialmente indígenas. Además, las bajas temperaturas generan pérdidas por heladas, subrayando la necesidad urgente de medidas para promover prácticas agrícolas resilientes y fortalecer los sistemas de alerta temprana, según el SENAMHI (2021).

Frente a este panorama a producción sostenible de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en sistemas sin suelo como la aeroponía se presenta como una alternativa viable frente al crecimiento poblacional, la degradación de los suelos y las variaciones climáticas, al reducir el uso de fertilizantes sintéticos y minimizar el impacto ambiental (Ma et al., 2023; Monsees et al., 2019); el empleo de soluciones nutritivas orgánicas provenientes de residuos, como biol o lodos de acuicultura, ha demostrado rendimientos y calidad comparables a los sistemas convencionales, con ventajas en mitigación de emisiones y ahorro de recursos (Ezziddine et al., 2021; Monsees et al., 2019); en Perú, específicamente en el altiplano, el uso de biol como solución nutritiva en sistemas aeropónicos representa una estrategia innovadora que optimiza agua y nutrientes, mejora la calidad

del cultivo y fomenta la economía circular, contribuyendo así a la seguridad alimentaria y la transformación hacia prácticas agrícolas más sostenibles sostenible y resiliente (Ezziddine et al., 2021; Gartmann et al., 2023)

Los sistemas de cultivo sin suelo son una alternativa altamente efectiva para maximizar la utilización de agua, nutrientes, especialmente en zonas con condiciones ambientales difíciles o recursos limitados (Alizaeh et al., 2025; Massa et al., 2020; Michelon et al., 2020) Sin embargo, es importante tener en cuenta que el uso de soluciones nutritivas sintéticas, si no se maneja adecuadamente, puede generar drenajes que representan un riesgo de contaminación ambiental (Mielcarek et al., 2023; Savvas et al., 2023) . Ante este panorama, el uso de biofertilizantes líquidos como el biol obtenidos a partir de la digestión anaeróbica de materiales orgánicos se plantea como una alternativa ecológica y eficiente en sistemas hidropónicos. Investigaciones recientes evidencian que estos insumos pueden optimizar la eficiencia y la calidad de la producción agrícola, reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos y mitigar el impacto ambiental, gracias a su aporte de nutrientes y sus propiedades bioestimulantes (Cao et al., 2023; Karapetyan, 2024; Masmoudi et al., 2024; Singh et al., 2023; Zhang et al., 2024)

El propósito de este estudio fue analizar el impacto del biol en sistemas de cultivo vertical para el altiplano peruano. Estos sistemas producen alimentos resilientes con menor uso de agua, tierra y agroquímicos, fortaleciendo la seguridad alimentaria (Erekath et al., 2024; van Delden et al., 2021; Van Gerrewey et al., 2022). Innovaciones tecnológicas y microorganismos mejoran eficiencia y resiliencia, aunque persisten retos energéticos y sociales (Erekath et al., 2024; Kabir et al., 2023)

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto del biol (aplicado a tres concentraciones: 40 %, 60 % y 80 %) como solución nutritiva en un sistema aeropónico vertical

implementado en invernadero, utilizando tres variedades de lechugas (White Boston, Alface Verananda y Lollo Rossa). Para ello se realizaron cuatro tratamientos (tres con biol y uno con solución nutritiva convencional como control) bajo un diseño experimental manera totalmente aleatoria con tres repeticiones. Se analizaron variables agronómicas, nutricionales y microbiológicas para validar alternativas sostenibles que puedan ser implementadas en los entornos andinos, así como promover una agricultura resiliente, eficiente y responsable con el medio ambiente.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

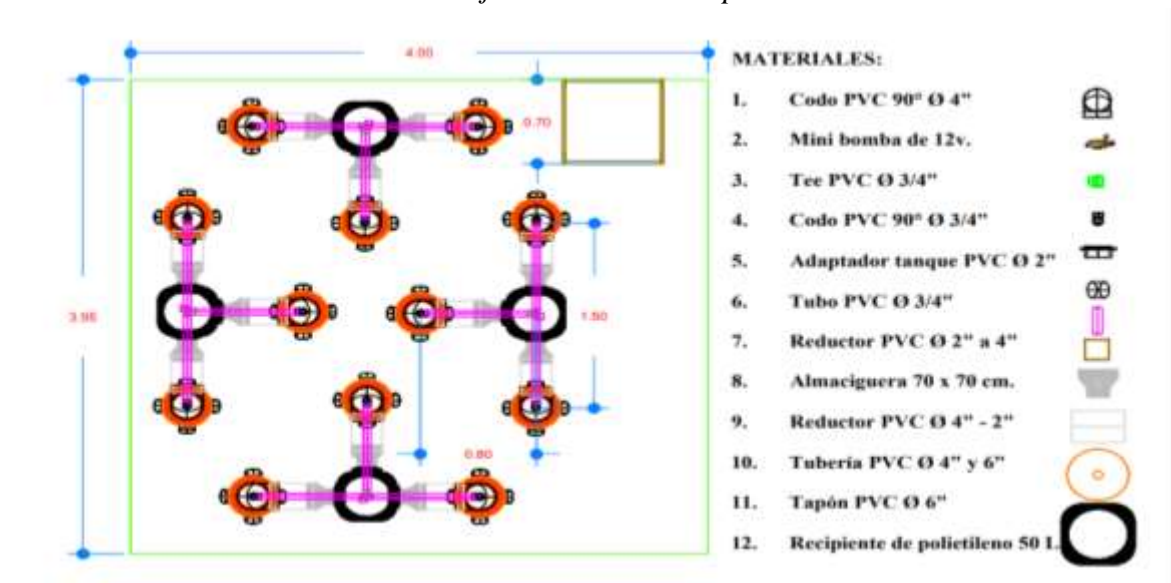
El estudio se llevó a cabo en Juliaca, en la región de Puno, Perú, a 3,825 metros sobre el nivel del mar. Esta ciudad, una de las más altas del mundo, presenta grandes desafíos para la agricultura debido a su ubicación geográfica (Angulo & Pereira Filho, 2023). El clima local es riguroso, con temperaturas bajas, marcadas variaciones térmicas durante el día, frecuentes heladas y alta radiación solar, lo que genera condiciones difíciles para el desarrollo de los cultivos (Cayambe et al., 2023). Para enfrentar estas dificultades, se utilizó un invernadero experimental con cubierta plástica resistente, sistemas de riego y monitoreo, además de módulos aeropónicos inteligentes que mejoran el uso de agua y nutrientes, aumentando así la productividad (Padilla-Medina et al., 2022). La investigación se realizó durante la campaña agrícola 2024 agosto a setiembre, cubriendo tanto la época de helada como la de sequía, permitiendo observar cómo se adaptan los cultivos al clima (Tito et al., 2018).

El sistema aeropónico vertical se construyó inspirándose en la propuesta de (Chilloce Prado, 2023), aunque fue adaptado con mejoras durante la fase experimental. Para ello se elaboraron 12 columnas verticales con tubos de PVC de 6” de diámetro y 2.20 m de altura, perforados cada 20 cm según lo recomendado por (Sharma et al., 2018), lo que permitió aprovechar

mejor la luz solar y el espacio de crecimiento. Cada sistema incorporó 90 orificios distribuidos de manera uniforme, junto con accesorios como tubos de 4", 2" y 3/4", codos de 90° (4" y 2"), tee de 3/4", adaptador de tanque de 2", reductor de 4" a 2", tapón de 6" y un recipiente de polietileno de 50 L. El flujo fue impulsado con una mini bomba de 24 V, y todas las uniones, con un grosor de 0.5 cm, redujeron fugas y mejoraron la estabilidad del sistema (Figura 1). El riego funcionó en circuito cerrado con recirculación continua, lo que permitió ahorrar agua y nutrientes. Una bomba de 12 V DC, conectada al depósito de 50 L, impulsaba la solución nutritiva por un tubo de PVC de 2" y 2 m de altura, distribuyéndola mediante una conexión en "T" hacia los módulos de cultivo. Finalmente, en la parte superior de cada tubo se instalaron difusores tipo plato que rociaban finamente las raíces, garantizando una hidratación uniforme y constante, tal como se aprecia en la Figura 2.

Figura 1

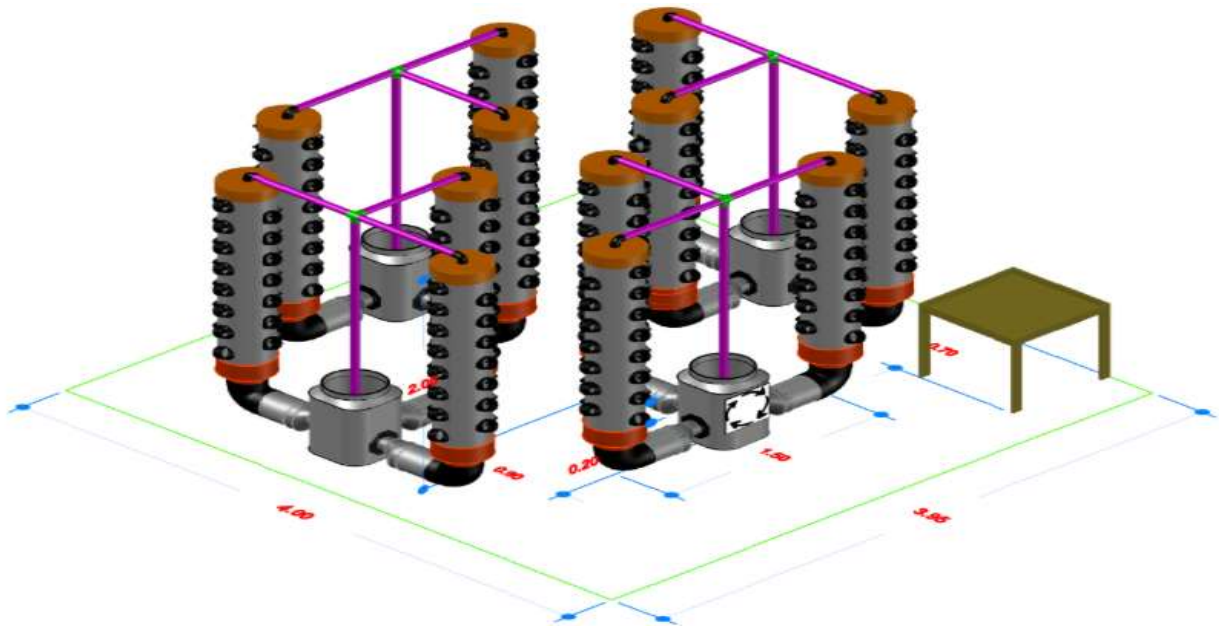
Materiales utilizados en el ensamblaje del sistema aeropónico.



Nota. Especificaciones técnicas de los componentes mostrados en la Figura 1. Elaboración propia.

Figura 2

Sistema recirculante aeropónico en 3D.



Nota. Representación tridimensional del diseño de los módulos de cultivo aeropónico. Elaboración propia.

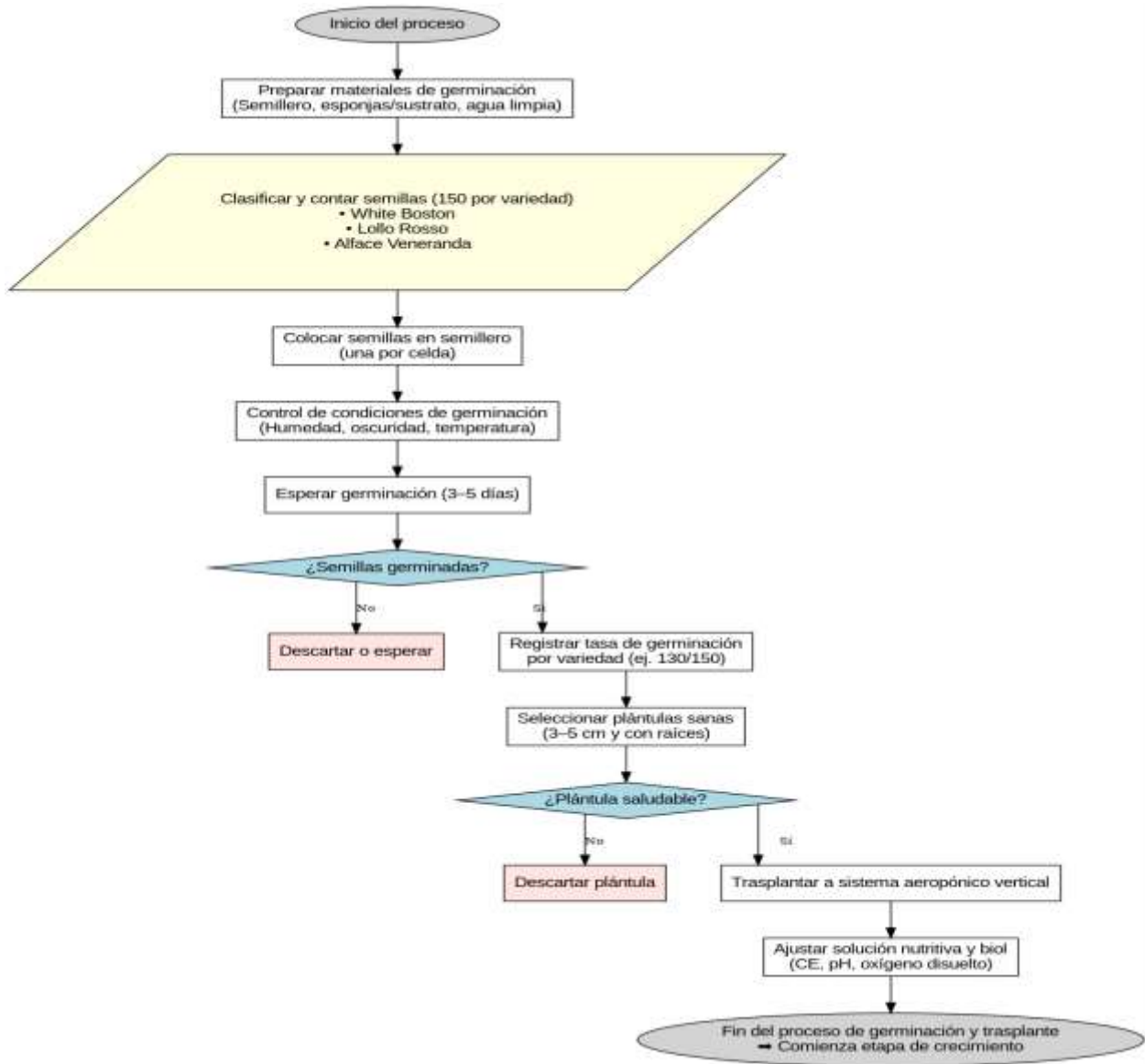
El estudio utilizó tres variedades de lechuga de interés agrícola: White Boston, Lollo Rossa y Alface Veneranda, elegidas por su calidad y adaptabilidad a sistemas de cultivo sin suelo en condiciones del altiplano.

La germinación se realizó en bandejas de semillero, usando almohadillas de algodón de 3 × 3 cm y una profundidad de siembra de 1.5 cm, de acuerdo con lo propuesto por (Ingar de la Cruz et al., 2023). Para asegurar un buen establecimiento, se sembraron 150 semillas por variedad, considerando posibles pérdidas en la fase inicial. Durante esta etapa temprana, las plántulas recibieron únicamente riego con agua mediante aspersión, lo que permitió mantener la humedad adecuada para su desarrollo. Después de 28 días de siembra, siguiendo el proceso ilustrado en el

flujograma de la Figura 3 y con las plántulas en condiciones óptimas, se procedió al trasplante hacia los módulos aeropónicos verticales.

Figura 3

Flujograma del proceso de germinación y trasplante al sistema aeropónico vertical.



Nota. El diagrama detalla las etapas desde la preparación de materiales hasta el ajuste de la solución nutritiva y biol. Elaboración propia.

En el estudio se emplearon dos tipos de soluciones nutritivas: una solución estándar comercial (La Molina) y un biol líquido de origen orgánico. La primera fue adquirida de la empresa RyB Agronomía y su composición nutricional se detalla en la Tabla 1, la cual constituye un referente ampliamente utilizado en cultivos hidropónicos de hortalizas.

El biol, en cambio, fue obtenido a partir de un biodigestor tubular anaerobio instalado en la Universidad Peruana Unión, alimentado diariamente con una mezcla de 210 L de agua y 70 kg de estiércol bovino fresco en proporción 1:3. Una vez extraído, el biol fue diluido con agua para alcanzar las concentraciones requeridas en los tratamientos. Su composición nutricional, determinada mediante análisis de laboratorio, se presenta en la Tabla 2. Durante todo el ensayo, el pH y la conductividad eléctrica (CE) de las soluciones nutritivas se monitorearon dos veces al día (mañana y tarde) con un medidor digital portátil. Según (Freire Solis Edison Vladimir, 2020)

Tabla 1

Concentración de nutrientes solución La Molina en ppm.

Elementos	unidad	Concentración de nutrientes
Potasio (K)	ppm	210
Nitrógeno (N)	ppm	190
Calcio (Ca)	ppm	150
Magnesio (Mg)	ppm	45
Fósforo (P)	ppm	35
Azufre (S)	ppm	70
Hierro (Fe)	ppm	1
Manganeso (Mn)	ppm	0.5
Boro (B)	ppm	0.5
Zinc (Zn)	ppm	0.15
Cobre (Cu)	ppm	0.1
Molibdeno (Mo)	ppm	0.05

Nota. Contenido nutricional estándar para hortalizas de la Solución Nutritiva La Molina (SNL).

Adaptado de Freire Solís (2020).

Tabla 2

Contenido nutricional del biol obtenido en la UPEU-Juliaca.

Elementos analizados	Unidad	Abono líquido- biol
Nitrógeno	%	2.9 t
Materia orgánica	%	8.8
Fósforo	%	2.02
Potasio	%	1.08
Calcio	%	0.4
Magnesio	%	0.11
Zinc	%	0.01
CE	mS/cm	2.92
pH	-	6.5

Nota. Análisis realizado por el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA, 2024). Elaboración propia.

Eficiencia hídrica (al final de cosecha). Con 360 plantas en 4 módulos, se registró agua consumida total (incluye riego por nebulización y reposiciones) y producción total de masa fresca (kg). Se calcularon dos métricas complementarias:

Rendimiento hídrico (RH, L·kg⁻¹):

$$RH = \frac{\text{Consumo total de agua (L)}}{\text{Producción total (kg)}}$$

Eficiencia hídrica (EH, kg·L⁻¹):

$$EH = \frac{\text{Producción total (kg)}}{\text{Consumo total de agua (L)}}$$

El enfoque se fundamenta en los principios de uso eficiente del agua, desarrollados por (Briggs & Shantz, 1913), y en los criterios modernos para evaluar y reportar la productividad hídrica, establecidos por la (FAO, 2018).

La eficiencia energética se obtuvo con el consumo eléctrico total, aplicando:

$$IE = \frac{\text{Energía (kWh)}}{\text{Producción (kg)}}, \quad PE = \frac{\text{Producción (kg)}}{\text{Energía (kWh)}}$$

El sistema operó con red de 220 V, cuatro bombas DC de 24 V y una bomba de 0.5 HP usada 15 min/día. Con tarifa de S/ 0.80/kWh, el consumo se estimó según guías nacionales (Ministerio de Energía y Minas, 2020; Osinergmin, 2022).

$$Cd = \sum(\text{Potencia (kW)} \times \text{Horas/día}), Cm = Cd \times 30$$

Estos valores permitieron calcular el costo mensual y las métricas IE y PE

Para el análisis de la rentabilidad económica del sistema aeropónico, se tomó como partida la construcción del invernadero hidropónico a los costes de operación y mantenimiento, proyectada para 5 años con una tasa de descuento (TD) del 15 % el cual se considera como una rentabilidad mínima en proyectos de alto riesgo, así mismo se evaluó el valor Actual Neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR).

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{Ft}{(1+r)^t} - C$$

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{Ft}{(1+r)^t} - C$$

Donde:

Ft – Flujo de efectividad en el tiempo

r – Tasa de descuento al (%)

t – Periodo de tiempo (años)

C – Inversión Inicial (s/.)

El experimento se organizó bajo un diseño de bloques completamente al azar (DBCA), lo que permitió minimizar la variabilidad ambiental y lograr resultados más consistentes. Se

establecieron tres repeticiones por tratamiento, asegurando un número suficiente de grados de libertad para un análisis estadístico sólido.

Se evaluaron cuatro dosificaciones: D0 (solución nutritiva estándar – testigo), D1 (40% biol), D2 (60% biol) y D3 (80% biol). Cada uno fue aplicado a tres variedades de lechuga: White Boston (V1), Lollo Rossa (V2) y Alface Veneranda (V3).

Las variables analizadas incluyeron tanto aspectos morfológicos (altura de planta, longitud de raíz y peso fresco) como de eficiencia (uso de agua y energía) y calidad (nutrientes foliares, humedad, cenizas, hidrógeno y presencia de *Escherichia coli*). La cosecha se realizó cuando las plantas alcanzaron su estado fisiológico óptimo; en esa etapa fueron lavadas con agua destilada y procesadas para los diferentes análisis morfológicos, fisicoquímicos, microbiológicos y nutricionales.

Los datos obtenidos se analizaron con un ANOVA de dos vías con interacción, seguido de pruebas de Tukey y Dunnett al 5% de significancia, lo que permitió identificar diferencias claras entre tratamientos y variedades.

El sistema aeropónico evaluado demostró ser una alternativa económica, de bajo consumo hídrico y energético, y de fácil implementación, lo que lo clasifica como una alternativa sostenible y accesible para productores de menor escala en el altiplano, promoviendo además el uso de bio-insumos como el biol.

Al finalizar la cosecha, las plantas fueron retiradas con cuidado de los módulos, lavadas con agua destilada y preparadas para los análisis correspondientes. Las variables morfológicas — altura de planta, longitud de raíz, peso fresco y tamaño de hoja; se registraron siguiendo métodos aplicados en sistemas hidropónicos y aeropónicos (Chowdhury et al., 2024a). Los parámetros fisicoquímicos y nutricionales, como humedad, cenizas y nutrientes foliares, se evaluaron con

protocolos de referencia que aseguran uniformidad y confiabilidad en los resultados (Chowdhury et al., 2024b).

La evaluación microbiológica se realizó con placas 3M Petrifilm EC, reconocidas por su sencillez y precisión en el recuento de coliformes y *E. coli* (3M, n.d.). Todas las mediciones se efectuaron al finalizar la cosecha. Para asegurar resultados confiables, se recomienda un cronograma ordenado, iniciando con los análisis morfológicos y fisicoquímicos y continuando con los microbiológicos, lo que garantiza que cada muestra reciba un tratamiento uniforme y se procese sin retrasos.

El análisis de los datos fue realizado utilizando el software R 2024, que permitió organizar y procesar la información de manera precisa. Se aplicó un ANOVA de dos vías con interacción, considerando como factores la concentración de biol utilizada y la variedad de lechuga cultivada.

Las variables morfológicas (altura de planta, longitud de raíz, peso fresco), nutricionales (contenido de humedad, cenizas y nutrientes foliares) y microbiológicas (*Escherichia coli*) fueron evaluadas bajo este modelo estadístico.

Cuando se identificaron diferencias entre tratamientos, se aplicaron pruebas post-hoc de Tukey y Dunnett, con un nivel de significancia de $p < 0.05$. Esta metodología permitió interpretar de manera clara los efectos de cada tratamiento y variedad, estableciendo vínculos sólidos entre la aplicación de biol, el rendimiento agronómico y la calidad final de las plantas.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Condiciones fisicoquímicas del sistema aeropónico

Durante 8 semanas mantuvimos el pH en rango indicado 5.5 a 6.5, aunque los tratamientos con biol tendieron a una ligera acidificación frente a la estabilidad del control. La conductividad eléctrica (CE) fue mayor con biol (2.2–2.8 mS/cm), a mayor dosificación. que en el control (1.5–1.8 mS/cm), reflejando su aporte de nutrientes. El oxígeno disuelto (OD) disminuyó con la altura, de 6.5 mg/L en la base a 5.2 mg/L en la parte superior. La temperatura de la solución se mantuvo entre 18–22 °C, atenuando la baja humedad ambiental, los picos de calor hacia el mediodía y las bajas temperaturas nocturnas propias del altiplano. En conjunto, estos resultados evidencian un manejo técnico adecuado y condiciones favorables para el crecimiento de la lechuga.

3.2 Eficiencia hídrica y energética del sistema

El sistema aeropónico altoandino alcanzó un rendimiento hídrico de 9.19 L/kg (800 kg·m⁻³), lo que confirma una eficiencia sobresaliente en el uso del agua. Este valor es comparable con los mejores reportes internacionales: en India, un sistema aeropónico solar registró 14.93 L/kg (Nigadi et al., 2024), mientras que, en Italia, bajo condiciones de vertical farming, se obtuvo 18.9 L/kg (Carotti et al., 2023). A nivel global, se ha estimado que la aeroponía puede reducir más del 90 % del consumo hídrico frente a sistemas convencionales (Regmi et al., 2024).

En contraste, la agricultura tradicional puede requerir hasta 250 L/kg (Pomoni et al., 2023). Así lo muestra la tabla 3. Estas diferencias muestran que la aeroponía no solo mejora la eficiencia hídrica, sino que también ofrece una alternativa sostenible para enfrentar la escasez de agua en regiones altoandinas como el altiplano peruano.

Tabla 3*Uso eficiente del agua en lechuga aeropónica vertical altoandino vs. evidencia internacional.*

Estudio / sistema (país)	Cultivo	Parámetro clave / Nota	WUE reportada ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Rendimiento hídrico ($\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Referencia (DOI o fuente)
Este estudio – Altoandino (Perú)	Lechuga	Sistema aeropónico vertical (este estudio)	800	9.19 (800 ÷ 87.2)	(datos originales)
Solar-aeropónico (India)	Lechuga	Comparativo aeropónico vs convencional	67	14.93 (1000 ÷ 67.0)	(Nigadi et al., 2024)
Vertical farming vs ebb-and-flow (Italia)	Lechuga	Vertical aeroponics vs sustrato (ciclo)	52.9 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ = 52.9 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	18.9 (1000 ÷ 52.9)	(Carotti et al., 2023)
Agricultura Convencional	Lechuga	Campo abierto	—	250	(Pomoni et al., 2023)

Nota. WUE corresponde a la eficiencia en el uso del agua. Elaboración propia.

Tras evaluar la eficiencia hídrica, se analizó el componente energético, igualmente determinante en la sostenibilidad aeropónica. De acuerdo con la Tabla 4, las 4 bombas de 24 V DC (50 W cada una, ciclo de 24 h) consumieron 82,9 kWh/mes, y la periférica de 0,5 HP consumió 4,1 kWh/mes (tarifa de S/0,80/kWh). Este resultado coincide con lo reportado por (Barbosa et al., 2015), quienes identifican a las bombas como principales responsables del gasto eléctrico en sistemas verticales. Otros autores señalan que la eficiencia energética es tan importante como el ahorro de agua: (Durlinger et al., 2012) destacan la necesidad de optimizar tiempos de operación, y (Graamans et al., 2018) proponen integrar energías renovables. Así, mientras el ahorro hídrico supera el 90 % frente a la agricultura convencional, el análisis energético evidencia un campo clave de mejora.

Tabla 4

Análisis comparativo del consumo y costo mensual de sistemas de bombeo.

Sistema de Bombeo	Consumo Diario (kWh/día)	Consumo Mensual (kWh/mes)	Costo Mensual (S/.)
Bombas 24 V DC (4 unidades)	2.764	82.94	66.35
Bomba periférica (0.5 HP)	0.138	4.13	3.30

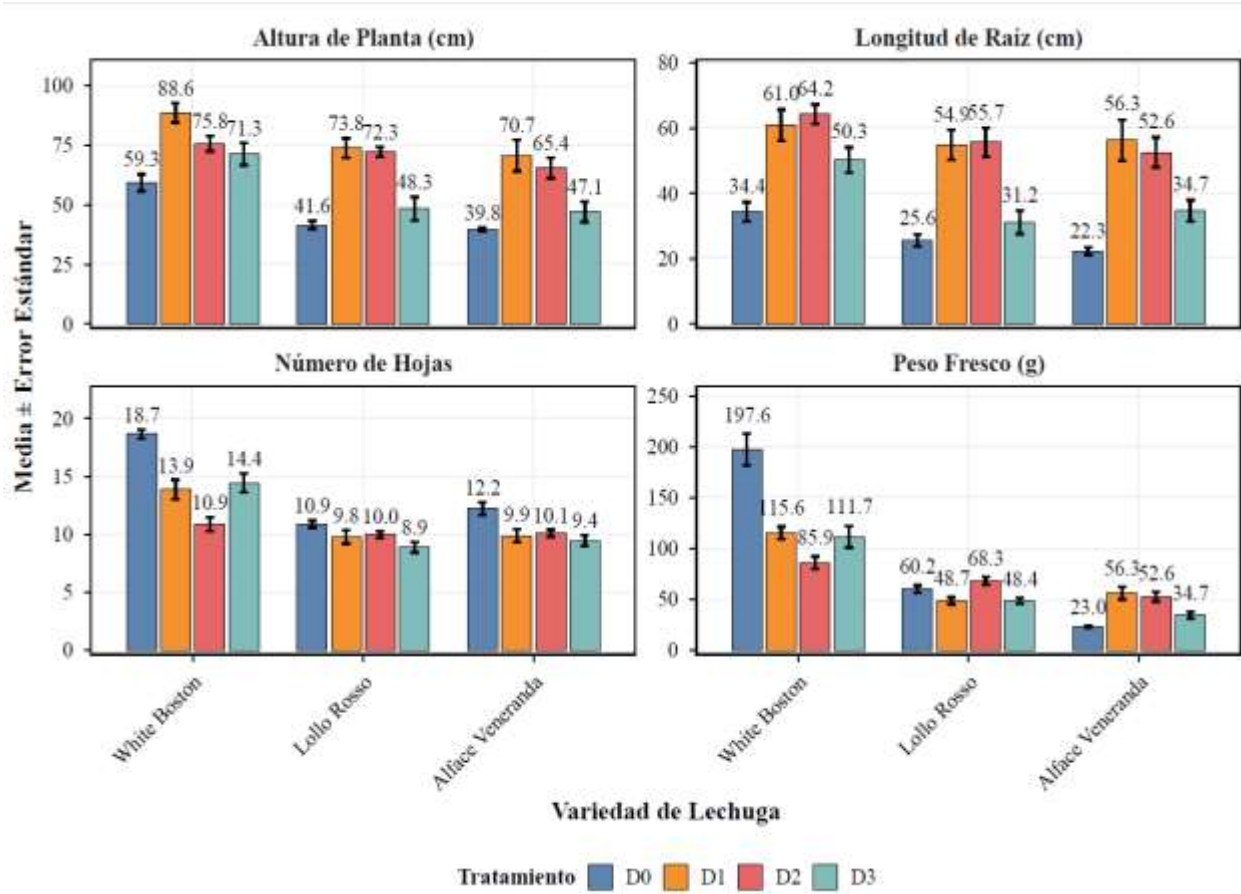
Nota. Los cálculos se basan en una tarifa de S/ 0.80/kWh. Datos obtenidos de Osinergmin (2022) y fórmulas técnicas del Ministerio de Energía y Minas (2020). Elaboración propia.

3.3 Respuesta morfológica de la lechuga al uso de biol

Las características morfológicas de las plantas fueron registradas al final del ciclo de cultivo, considerando la altura de la columna en los módulos aeropónicos. Se evaluaron la altura de planta, longitud de raíz, número de hojas y peso fresco en las tres variedades de lechuga bajo las cuatro dosificaciones aplicadas. En la figura 4 observamos que esta información permite describir el comportamiento del cultivo en función del gradiente vertical y de las diferencias entre variedades.

Figura 4

Efectos de la aplicación de biofertilizante sobre los parámetros morfológicos de crecimiento de la lechuga: desarrollo radicular, altura de la planta, número de hojas y peso fresco.



Nota. Las barras representan la media \pm error estándar ($n=12$). Los gráficos comparan cuatro parámetros clave en tres variedades de lechuga (White Boston, Lollo Rossa y Alfaca Veneranda) bajo cuatro dosis de biol. Elaboración propia.

Verificamos supuestos (Shapiro–Wilk, $p > 0,05$) y homogeneidad de varianzas (Bartlett, $p > 0,05$), permitiendo el análisis mediante ANOVA y prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$). Se registraron diferencias estadísticamente significativas en longitud radicular entre tratamientos ($F = 38,156$; $p < 0,001$), mientras que no se detectaron efectos significativos en altura de planta ($F = 0,352$; $p =$

0,789), número de hojas ($F = 2,352$; $p = 0,172$) ni peso fresco total ($F = 0,892$; $p = 0,492$). Según la Figura 1a, los tratamientos con biol incrementaron significativamente la longitud radicular comparado con el testigo ($35,13 \pm 5,21$ cm), alcanzando valores de $59,02 \pm 8,34$ cm (Biol 40%), $63,45 \pm 6,92$ cm (Biol 60%) y $55,77 \pm 7,15$ cm (Biol 80%), representando aumentos de 68,0%, 80,6% y 58,8% respectivamente ($p < 0,01$), sin diferencias estadísticas entre concentraciones de biol ($p > 0,05$).

Por el contrario, las Figuras 1b–1d evidencian que la altura de planta ($62,67 \pm 12,34$; $92,67 \pm 8,45$; $76,54 \pm 9,12$; $70,12 \pm 10,23$ cm para testigo y 40–80%), el número de hojas ($18,22 \pm 1,45$; $14,33 \pm 2,12$; $10,56 \pm 0,89$; $10,11 \pm 1,34$) y el peso fresco ($177,8 \pm 45,6$; $118,4 \pm 32,1$; $80,53 \pm 25,4$; $78,20 \pm 28,7$ g) no presentaron diferencias estadísticas entre tratamientos ($p > 0,05$), mostrando considerable variabilidad, particularmente en peso fresco (Figura 4).

El biol alargó raíces hasta 81% sin aumentar el peso aéreo, posiblemente por CE 2,2–2,8 mS/cm y OD decreciente que limitaron la conversión a biomasa. Esto coincide con el efecto bioestimulante documentado para bioles/digestatos y compuestos húmicos, los cuales pueden exhibir "actividad similar a auxinas/citoquininas", promoviendo rizogénesis, incrementando la densidad de raíces finas y potenciando la capacidad de absorción (activación de H^{+} -ATPasa), además de conferir mayor tolerancia al estrés abiótico (Calvo et al., 2014; Canellas & Olivares, 2014; du Jardin, 2015; Jindo et al., 2020; Trevisan et al., 2010). La ausencia de respuesta en órganos aéreos sugiere, primero, que el estímulo radicular no se reflejó en mayor fijación de carbono durante el período experimental y, segundo, que la **conductividad eléctrica (CE)** efectiva y el **oxígeno disuelto (OD)** del sistema pudieron constituir factores limitantes: en lechuga hidropónica, CE elevadas reducen considerablemente la biomasa comercial cuando no se mantienen dentro de rangos óptimos (Kappel et al., 2021), y concentraciones insuficientes de OD

afectan el crecimiento y respiración radicular (Goto et al., 1996). Adicionalmente, la variabilidad en la composición del biol (compuestos nitrogenados, K, micronutrientes y fracciones orgánicas) y su grado de madurez influyen en CE, pH y demanda bioquímica de oxígeno de la solución, condicionando la respuesta aérea cuando el insumo carece de estandarización (Möller & Müller, 2012).

Desde la perspectiva del manejo agronómico, los resultados respaldan el uso de biol en concentraciones **moderadas (40–60%)** cuando el objetivo es estimular el vigor radicular (producción de plántulas, trasplante o condiciones de estrés hídrico/salino), y combinarlo con **optimización de la solución nutritiva** (equilibrio N–P–K, Ca, Mg; control de CE/pH; aireación/OD) para transformar el mayor desarrollo radicular en **biomasa comercial**. La literatura sobre bioestimulantes sustenta estrategias integradas —biol estandarizado más nutrición mineral— para maximizar productividad y resiliencia del cultivo (Calvo et al., 2014; Canellas & Olivares, 2014; du Jardin, 2015). En conclusión, bajo las condiciones experimentales evaluadas, el biol fortalece la arquitectura radicular (Figura 1a), pero no asegura por sí mismo mejoras en crecimiento aéreo o peso fresco (Figuras 1b–1d); su implementación debe ajustarse a objetivos específicos del sistema productivo y a un control riguroso del ambiente de cultivo.

3.4 Calidad fisicoquímica del tejido vegetal

En cuanto a la calidad fisicoquímicas se muestra las diferencias significativas en ceniza, hidrógeno y humedad entre tratamientos y variedades. D1 y D3 presentaron menores cantidades de ceniza que el control, especialmente en V1. En hidrógeno, D1, D2 y D3 registraron valores significativamente menores que D0, con V2 mostrando mayor retención de este elemento. La humedad fue menor en D1 comparado con el control, y V1 presentó los valores más bajos de humedad.

Tabla 5

Comparación de las características fisicoquímicas entre tratamientos y variedades.

Dosificación	Variedad	Ceniza (media ± DE)	Grupo (Tukey)	vs. Control (Dunnett)	Cantidad de H (media ± DE)	Grupo Tukey	vs. Control (Dunnett)	Humedad (media ± DE)	Grupo (Dunnett)	vs. Control (Dunnett)
D0 (Control)	V1	0.32 ± 0.02	a	–	0.47 ± 0.05	A	–	35.50 ± 1.20	a	–
	V2	0.58 ± 0.04	a	–	1.13 ± 0.10	A	–	40.00 ± 2.50	a	–
	V3	0.41 ± 0.03	a	–	0.72 ± 0.07	A	–	37.00 ± 1.80	a	–
D1	V1	0.23 ± 0.01	b	*	0.27 ± 0.04	B	*	32.00 ± 2.00	b	**
	V2	0.50 ± 0.05	ac	*	0.88 ± 0.12	Ac	*	38.50 ± 2.00	ab	**
	V3	0.38 ± 0.02	b	*	0.50 ± 0.09	Bc	*	35.50 ± 1.50	ab	**
D2	V1	0.28 ± 0.02	bc	**	0.38 ± 0.06	Bc	**	33.00 ± 2.50	b	*
	V2	0.47 ± 0.06	ac	**	1.02 ± 0.11	Ac	**	39.00 ± 3.00	ab	**
	V3	0.36 ± 0.03	bc	–	0.61 ± 0.08	Bc	–	36.00 ± 1.50	ab	*
D3	V1	0.31 ± 0.02	b	–	0.41 ± 0.06	B	–	31.50 ± 1.50	b	*
	V2	0.54 ± 0.04	ac	*	1.03 ± 0.12	Ac	*	37.50 ± 2.00	ab	**
	V3	0.40 ± 0.03	bc	*	0.55 ± 0.07	Bc	*	34.50 ± 1.80	ab	**

Nota. La tabla 2 compara las características fisicoquímicas entre tratamientos y variedades.

Los valores expresan la media ± desviación estándar (DE) para cada combinación de tratamiento y variedad. Letras diferentes dentro de una misma columna indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos según la prueba de comparaciones múltiples de Tukey (para ceniza y cantidad de hidrógeno) o la prueba de Dunn (para humedad) con un nivel de significancia de $p < 0.05$. En la columna “vs. Control”, los símbolos * y ** indican diferencias significativas ($p < 0.05$) y altamente significativas ($p < 0.01$) frente a la dosificación control (D0), según la prueba de Dunnett.

Los resultados ofrecen una visión valiosa sobre cómo diferentes dosificaciones afectan las propiedades orgánicas de las muestras, especialmente en lo que respecta a la ceniza, la cantidad de hidrógeno (H) y la humedad. Estos hallazgos se han puesto en contexto con la literatura científica

actual, lo que permite comparar lo que encontramos con lo que se ha reportado en investigaciones anteriores sobre el uso de fertilizantes orgánicos y bioles en sistemas hidropónicos.

En cuanto a la ceniza, las dosificaciones D1 y D3 mostraron una reducción notable en comparación con el tratamiento de control (D0). Este patrón coincide con lo que encontraron (Szekely et al., 2023; Zhu et al., 2023), quienes notaron que el uso de residuos orgánicos, como los digestatos de biogás y los lodos de acuicultura, puede disminuir la acumulación de ceniza en los sustratos hidropónicos. Según (Weimers et al., 2022), el uso de biol en sistemas hidropónicos ha demostrado ser efectivo para reducir los residuos inorgánicos, lo que se alinea con los efectos que observamos en este estudio. Estos resultados sugieren que aplicar tratamientos orgánicos puede mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes, lo que podría traducirse en una menor acumulación de ceniza en las plantas.

En cambio, la cantidad de hidrógeno (H), las dosificaciones D1, D2 y D3 mostraron concentraciones más bajas de hidrógeno en comparación con el control (D0). Este resultado podría estar vinculado a cambios en los procesos microbiológicos y bioquímicos de los materiales orgánicos, que a su vez afectan la retención de hidrógeno en el sustrato. (Weimers et al., 2022), en su investigación sobre digestatos anaeróbicos, señalaron que los nutrientes disponibles en estos digestatos podrían sustituir de manera efectiva a las soluciones minerales tradicionales, lo que podría alterar la composición química del sustrato, incluyendo la reducción de componentes como el hidrógeno. Además, (Takemura et al., 2017) indicaron que el proceso de nitrificación en el biol mejora la absorción de nutrientes y puede influir en la disminución de ciertos compuestos, como el hidrógeno, en los cultivos, lo cual se alinea con los hallazgos de este estudio.

En lo que respecta a la humedad, las dosificaciones D1, D2 y D3 lograron reducir significativamente el contenido de humedad en las muestras en comparación con la dosificación

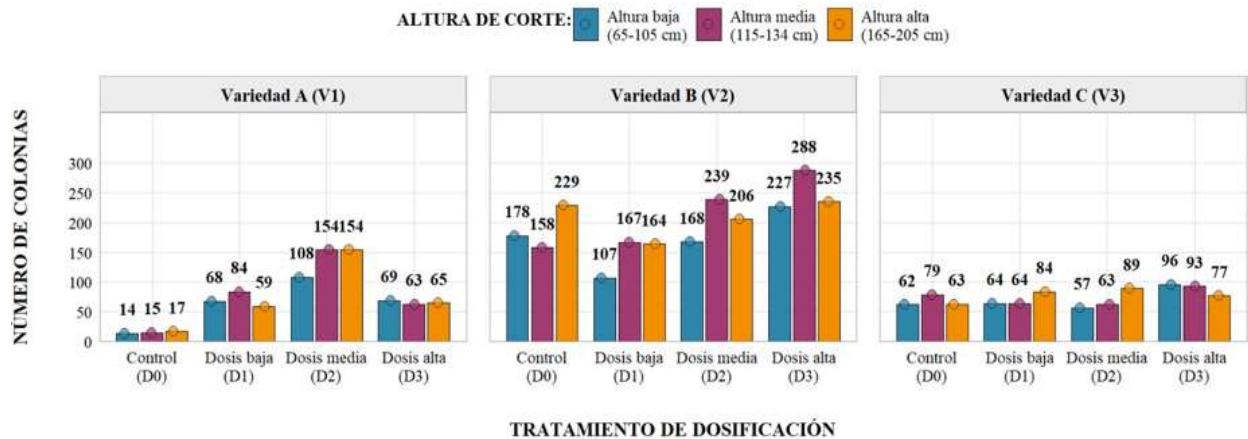
de control. Este fenómeno puede explicarse por la capacidad de las dosificaciones aplicados para modificar la estructura del sustrato, facilitando así la liberación de agua. Este comportamiento es respaldado por los estudios de (Medina Vásquez et al., 2022), quienes encontraron que el uso de bioabonos en cultivos hidropónicos de lechuga tuvo un impacto significativo en el crecimiento y desarrollo de las plantas, al modificar la retención de agua. De manera similar, (Cando & Malca, 2015), demostraron que los abonos orgánicos, como el biol, influyen en la regulación de la humedad en los cultivos hidropónicos, sugiriendo que el tipo de fertilizante utilizado es crucial para modificar las propiedades fisicoquímicas del sustrato.

3.5 Inocuidad microbiológica (*Escherichia coli*)

Los resultados mostraron que la calidad del agua y el uso de biol influyen directamente en la inocuidad del producto final. En la figura 5. se observa la variación en el crecimiento de *E. coli* bajo diferentes dosis de biol, variedades de lechuga y posiciones dentro del módulo aeropónico.

Figura 5

Efecto de la dosificación y altura de corte en la densidad de colonias microbiana.



Nota. Unidades Formadoras de Colonias (UFC) según variedad y altura de corte. Se observe mayor carga en niveles bajos (65-105 cm). Elaboración propia.

Trabajamos con 36 muestras (cuatro dosificaciones y tres variedades), usando la altura de columna como bloque y representando los datos en escala log₁₀ para evitar sesgos por valores extremos. El análisis mostró efectos significativos de la dosificación, la variedad y su interacción ($p < 0,05$), lo que indica que la respuesta del recuento de *E. coli* depende del genotipo. Cuando se agrupan las tres variedades, el panel (a) exhibe un solapamiento amplio entre D0–D3; sin embargo, al separar por variedad en el panel (b) aparece el patrón que realmente importa: Lollo Rosso (V2) mantuvo los recuentos más altos y aumentó con 80% de biol (D3); White Boston (V1) mostró un máximo con 60% (D2) y luego disminuyó en D3; Alface Veneranda (V3) permaneció estable entre D0–D3. El bloqueo por Altura controló variación ambiental sin modificar estas tendencias. En términos prácticos, no hay un gradiente dosis–respuesta universal; el efecto del biol orgánico (proveniente de un biodigestor anaerobio tubular) es variedad-dependiente, en línea con la evidencia de que la colonización de *E. coli* en lechuga está condicionada por el genotipo y la activación de defensas (Jacob & Melotto, 2020). En la producción primaria, los recuentos suelen responder a vías de contaminación y al microambiente del hospedero, por lo que los efectos de “más o menos dosis” rara vez son lineales o uniformes entre cultivares (Franz & Van Bruggen, 2008); además, superficie foliar, humedad, temperatura y carga inicial explican gran parte de la variación observada (Beuchat, 1996). A esto se suma que *E. coli* O157:H7 puede internalizarse desde agua o estiércol contaminados, limitando el impacto de intervenciones posteriores y obligándonos a reforzar buenas prácticas desde la producción (Solomon et al., 2002). En sistemas controlados, combinar cultivares menos susceptibles con medidas preventivas (p. ej., fotodesinfección UV) ayuda a reducir la contaminación, lo que coincide con la lectura de nuestra figura (Kong et al., 2024).

3.6 Contenido nutricional y absorción mineral

La concentración de diversos nutrientes y elementos minerales en muestras sometidas a tres tratamientos biológicos (D1, D2 y D3) y una dosificación control (D0) en tres variedades (V1, V2 y V3). Los resultados de las concentraciones de cloruro, azufre, boro, calcio, cobre, fósforo, hierro, magnesio, manganeso, potasio, sodio, zinc y nitrógeno total se resumen en la Tabla 4.

Las dosificaciones biológicas generaron incrementos significativos en la mayoría de los nutrientes analizados en comparación con la dosificación control. El ion cloruro mostró un aumento notable con concentraciones máximas de hasta 43,986.36 mg/kg (D3 V2), en contraste con 2,099.35 mg/kg en el control para la misma variedad. Este aumento sugiere una mayor capacidad de absorción o acumulación facilitada por los tratamientos biológicos.

Los nutrientes macronutrientes calcio, fósforo y magnesio también presentaron incrementos evidentes en las dosificaciones biológicas, particularmente en D2 y D3, indicando mejoras en la nutrición mineral clave para el desarrollo estructural y metabólico de las plantas. Por ejemplo, el calcio alcanzó 2.124% en D2 V2, comparado con 1.342% en el control.

Respecto a los micronutrientes, el zinc mostró una tendencia al aumento bajo tratamientos biológicos, mientras que el hierro presentó variaciones dependientes de la variedad, aunque con valores globalmente inferiores en los tratamientos biológicos en comparación con el control. El potasio y sodio se incrementaron consistentemente en las dosificaciones biológicas, con potasio alcanzando hasta 7.296 mg/kg en D3 V3, elementos fundamentales para el equilibrio osmótico y la nutrición.

El nitrógeno total osciló entre 1.75% y 2.02%, manteniéndose en rangos adecuados y ligeramente superiores en dosificaciones biológicas, lo que refleja un aporte sostenido de este nutriente esencial.

En síntesis, estos resultados evidencian que las dosificaciones biológicas optimizan la absorción y concentración de la mayoría de los nutrientes minerales en las plantas frente a la dosificación control, lo cual puede derivar en un mejor desempeño agronómico y mayor resistencia a estrés.

Tabla 6

Análisis nutricional foliar.

Dosificación	Varietal	Cloruro	Azufre	Boro	Calcio	Cobre	Fosforo	Hierro	Magnesio	Manganeso	Potasio	Sodio	Zinc	Nitrógeno Total
D0 (Control)	V1	1947.44 8	0.858	43.6 5	1.04 1	5.90	1.154	223.2 2	0.469	110.5	5.038	2709. 01	96.2 2	1.83
	V2	2099.34 9	0.413	45.3 9	1.34 2	5.40	1.158	149.7 7	0.518	121.28	7.167	2282. 59	93.4 8	1.80
	V3	1349.58 2	0.546	45.8 4	1.17 8	5.94	1.026	332.7 3	0.516	139.82	4.982	2357. 73	105. 59	1.83
D1	V1	11996.2 8	0.233	50.5 8	1.29 9	1.08	1.213	30.58	0.394	68.84	2.652	3042. 8	33.1 1	2.02
	V2	23492.7 15	0.284	58.5 1	1.79 5	1.66	0.807	42.94	0.534	104.06	3.066	3362. 42	57.2 4	1.92
	V3	13245.8 93	0.266	50.2 9	1.24 8	1.32	1.008	28.67	0.398	78.57	2.657	3048. 38	45.0 8	2.02
D2	V1	17726.7 71	0.261	65.6 8	1.36 6	1.40	1.401	81.65	0.48	124.17	3.327	3536. 99	58.3 3	1.96
	V2	30990.3 90	0.396	68.0 1	2.12 4	3.46	1.124	132.6 4	0.783	201.4	4.456	4612. 64	78.2 4	1.79
	V3	14715.9 96	0.268	48.5	1.26 9	1.88	1.064	37.43	0.425	91.35	3.906	3867. 17	47.8 5	1.99
D3	V1	33739.5 38	0.491	72.0 9	1.30 7	2.90	1.307	65.35	0.616	149.66	5.654	5963. 19	88.8	1.83
	V2	43986.3 60	0.469	73.5 3	1.24 2	3.35	1.212	75.68	0.845	161.1	5.687	6225. 68	77.5 4	1.84
	V3	39867.9 96	0.518	62.3 1	1.06 0	4.49	1.396	79.42	0.661	153.73	7.296	6030. 23	100. 85	1.75

Nota. El incremento progresivo de las dosis (D1–D3) elevó de manera significativa las concentraciones de cloruros y sodio en comparación con el control (D0). Las variedades V1, V2 y V3 presentaron respuestas contrastantes en la acumulación de micronutrientes (Zn, Fe, B, Mn), lo que evidencia la influencia genotípica en la absorción, translocación y regulación mineral. El comportamiento observado concuerda con estudios que reconocen al cloruro como un macronutriente beneficioso, esencial para mejorar la fotosíntesis, la eficiencia en el uso del nitrógeno y la tolerancia al déficit hídrico (Franco-Navarro et al., 2019, 2021) En contraste, el sodio mostró un papel dual: puede sustituir parcialmente funciones fisiológicas

del potasio en procesos estomáticos y enzimáticos, pero en concentraciones elevadas actúa como elemento tóxico, con efectos modulados por la genética de cada variedad (Kronzucker et al., 2013; Wakeel et al., 2011).

En conjunto, estos hallazgos reafirman que la interacción entre dosis y variedad condicionan el equilibrio nutricional y la eficiencia en el uso de fertilizantes, resaltando la necesidad de ajustar estrategias de manejo nutrimental considerando tanto la composición de la solución nutritiva como la capacidad diferencial de respuesta varietal.

3.7 Análisis de rentabilidad económica

La implementación del sistema aeropónico integral en el altiplano peruano requiere una inversión inicial moderada de S/ 12,150.00 para una superficie de 32 m² (8 × 4). Este monto se distribuye estratégicamente en gastos mínimos y específicos, optimizando recursos para asegurar la operatividad del sistema en condiciones climáticas extremas.

Tabla 7

Presupuesto para la producción de lechuga aeropónica ecosostenible.

Ítem	Descripción	Costo (S/)
Estructura del invernadero	Perfil metálico, cobertura plástica UV	3 200,00
Sistema aeropónico vertical	12 tubos PVC de 6", estructura soporte	2 000,00
Sistema de riego recirculante	Bomba hidráulica, difusores, tuberías, tanque	1 800,00
Semilleros y bandejas	Para germinación controlada	250,00
Sistema de control de pH y CE	Medidor digital de pH y conductividad	1800,00
Sombra térmica y mallas	Para regulación de radiación	400,00
Mano de obra inicial	Instalación y puesta en marcha	1 500,00
Misceláneos	Conectores, selladores, herramientas menores	1 200,00
Total		12 150,00

Nota. Costos estimados para la implementación del sistema aeropónico ecosostenible en moneda nacional (S/). Elaboración propia.

El análisis de viabilidad económica realizado para el sistema aeropónico integral en el altiplano peruano, que incorpora biol como fertilizante biológico, reflejó indicadores financieros favorables. El Valor Actual Neto (VAN) calculado fue de aproximadamente S/ 9 614.42, con una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 58.20% y un índice beneficio/costo (B/C) de 1.79, utilizando una tasa de descuento del 15%. Estos valores evidencian la rentabilidad y atractivo financiero del proyecto para futuras inversiones agrícolas en la región.

Durante la fase piloto se cultivaron 120, sin embargo, el sistema tiene una capacidad proyectada de 360 plantas en dos meses, utilizando sólo una porción del espacio disponible en el invernadero (16 m²). Considerando esta producción parcial, los resultados sugieren que una ampliación a la totalidad del invernadero o a un área mayor permitiría incrementar proporcionalmente la cantidad de plantas cultivadas y la generación de ingresos. Esto también conllevaría a una optimización en costos fijos, mejorando la rentabilidad global.

La ausencia de gastos significativos en soluciones nutritivas químicas, debido al uso eficiente de biol producido localmente, contribuye a reducir los costos operativos y a mantener la sostenibilidad económica del sistema.

Tabla 8

Rentabilidad económica del sistema aeropónico con uso de biol en el altiplano peruano

(producción de lechuga, 360 plantas en dos meses, área de 16 m²).

Detalle	Valor
Tasa de Descuento	15%
Valor Actual Neto (VAN)	S/ 9,614.42
Tasa Interna de Retorno (TIR)	58.20%
Índice Beneficio/Costo (B/C)	1.79
Plantas cosechadas (2 meses)	360
Horizonte de evaluación	3 años

Detalle	Valor
Área utilizada	16 m ²
Solución nutritiva	Biol (sin costo significativo)

Nota. Evaluación económica para un horizonte de 3 años con una tasa de descuento del 15%. Elaboración propia.

Esta tabla sintetiza la viabilidad económica y productiva de tu sistema: muestra que, con una producción de 360 plantas en dos meses, uso eficiente del espacio, y aprovechamiento de biol local, el proyecto alcanza indicadores financieros positivos, reafirmando su atractivo para su escalabilidad y replicación en el altiplano peruano.

Esta investigación genera importantes beneficios sociales al reducir la dependencia de insumos químicos importados, permitiendo que agricultores locales aprovechen residuos orgánicos para la elaboración de biol, fomentando así la economía circular y la autosuficiencia tecnológica. Al democratizar tecnologías eficientes y de bajo costo, se fortalecen las capacidades productivas campesinas, mejorando la seguridad alimentaria y propiciando empleos verdes en el altiplano. Además, la adopción de técnicas más limpias y sostenibles promueve comunidades más resilientes y saludables, disminuye el riesgo de contaminación ambiental y facilita el acceso a alimentos inocuos y nutritivos, impactando directamente en la calidad de vida de la población.

IV. CONCLUSIONES

El uso de biol como solución nutritiva en el sistema aeropónico favoreció significativamente el desarrollo radicular de la lechuga; sin embargo, no se evidenciaron mejoras significativas en variables como altura de planta, número de hojas y peso fresco. El sistema demostró alta eficiencia hídrica, con un rendimiento de 9.19 L kg⁻¹, posicionándose como una alternativa viable para zonas con escasez de agua como el altiplano peruano. Asimismo, el biol incrementó la absorción de nutrientes esenciales, confirmando su potencial como fertilizante orgánico; no obstante, su uso requiere manejo técnico adecuado para optimizar el crecimiento vegetal. La detección de *Escherichia coli* evidencia la necesidad de implementar controles sanitarios y tratamientos previos del biol para garantizar la inocuidad del producto. Finalmente, el sistema presenta rentabilidad económica y potencial de escalabilidad, aunque requiere optimización en el control microbiológico y en los parámetros fisicoquímicos para maximizar su eficiencia productiva.

V. LITERATURA CITADA

Alizaeh, P., Sodaiezade, H., Arani, A. M., & Hakimzadeh, M. A. (2025). Comparing yield, nutrient uptake and water use efficiency of *Nasturtium officinale* cultivated in aquaponic, hydroponic, and soil systems. *Heliyon*, *11*(3), 42339.

https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2025.E42339/ASSET/F95EFE93-A136-43A8-A95B-70240416081E/MAIN.ASSETS/GR4_LRG.JPG

Angulo, E. C., & Pereira Filho, A. J. (2023). Extreme Droughts and Their Relationship with the Interdecadal Pacific Oscillation in the Peruvian Altiplano Region over the Last 100 Years. *Atmosphere* 2023, Vol. 14, Page 1233, *14*(8), 1233. <https://doi.org/10.3390/ATMOS14081233>

Barbosa, G. L., Almeida Gadelha, F. D., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., Wohlleb, G. M., & Halden, R. U. (2015). Comparison of Land, Water, and Energy Requirements of Lettuce Grown Using Hydroponic vs. Conventional Agricultural Methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2015, Vol. 12, Pages 6879-6891, *12*(6), 6879–6891. <https://doi.org/10.3390/IJERPH120606879>

Beuchat, L. R. (1996). Pathogenic Microorganisms Associated with Fresh Produce. *Journal of Food Protection*, *59*(2), 204–216. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-59.2.204>

Briggs, L. J., & Shantz, H. L. (1913). *The water requirement of plants. II. A review of the literature.* 285, 1–96. https://www.mendeley.com/catalogue/11031ecb-fda3-38f2-bd5f-26e4467287bd/?utm_source=desktop&utm_medium=1.19.8&utm_campaign=open_catalog&userDocumentId=%7Bb22816d5-6adc-4ada-90a7-516d9b6b78f9%7D

- Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383(1–2), 3–41. <https://doi.org/10.1007/S11104-014-2131-8/TABLES/1>
- Cando, S., & Malca, L. (2015). Influencia de un abono orgánico líquido tipo biol en el rendimiento de la lechuga (*Lactuca sativa* L) cultivada en sistemas hidropónicos. *Manglar: Revista de Investigación Científica*, ISSN-e 2414-1046, ISSN 1816-7667, Vol. 12, Nº. 2, 2015 (Ejemplar Dedicado a: Julio-Diciembre), Págs. 31-38, 12(2), 31–38. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8104242&info=resumen&idioma=SPA>
- Canellas, L. P., & Olivares, F. L. (2014). Physiological responses to humic substances as plant growth promoter. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 1(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/2196-5641-1-3/FIGURES/9>
- Cao, T. N. D., Mukhtar, H., Le, L. T., Tran, D. P. H., Ngo, M. T. T., Pham, M. D. T., Nguyen, T. B., Vo, T. K. Q., & Bui, X. T. (2023). Roles of microalgae-based biofertilizer in sustainability of green agriculture and food-water-energy security nexus. *Science of The Total Environment*, 870, 161927. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.161927>
- Carotti, L., Pistillo, A., Zauli, I., Meneghello, D., Martin, M., Pennisi, G., Gianquinto, G., & Orsini, F. (2023). Improving water use efficiency in vertical farming: Effects of growing systems, far-red radiation and planting density on lettuce cultivation. *Agricultural Water Management*, 285. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2023.108365>

- Cayambe, J., Heredia-R, M., Torres, E., Puhl, L., Torres, B., Barreto, D., Heredia, B. N., Vaca-Lucero, A., & Diaz-Ambrona, C. G. H. (2023). Evaluation of sustainability in strawberry crops production under greenhouse and open-field systems in the Andes. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 21(1). <https://doi.org/10.1080/14735903.2023.2255449>
- Chillcce Prado, J. H. (2023). *Construcción y evaluación de un sistema aerónico vertical asistido por la plataforma Arduino en la producción de lechuga, Ayacucho, 2022*. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/6030>
- Chowdhury, M., Samarakoon, U. C., & Altland, J. E. (2024a). Evaluation of hydroponic systems for organic lettuce production in controlled environment. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1401089. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2024.1401089/BIBTEX>
- Chowdhury, M., Samarakoon, U. C., & Altland, J. E. (2024b). Evaluation of hydroponic systems for organic lettuce production in controlled environment. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1401089. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2024.1401089/BIBTEX>
- du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2015.09.021>
- Durlinger, B., Reinders, A., & Toxopeus, M. (2012). A comparative life cycle analysis of low power PV lighting products for rural areas in South East Asia. *Renewable Energy*, 41, 96–104. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2011.10.006>
- Erekath, S., Seidlitz, H., Schreiner, M., & Dreyer, C. (2024). Food for future: Exploring cutting-edge technology and practices in vertical farm. *Sustainable Cities and Society*, 106, 105357. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2024.105357>

- Ezziddine, M., Liltved, H., & Seljåsen, R. (2021). Hydroponic Lettuce Cultivation Using Organic Nutrient Solution from Aerobic Digested Aquacultural Sludge. *Agronomy* 2021, Vol. 11, Page 1484, 11(8), 1484. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11081484>
- FAO. (2018). *Progress on Water-use Efficiency*. <http://www.fao.org/3/CA1588EN/ca1588en.pdf>
- Franco-Navarro, J. D., Díaz-Rueda, P., Rivero-Núñez, C. M., Brumós, J., Rubio-Casal, A. E., De Cires, A., Colmenero-Flores, J. M., & Rosales, M. A. (2021). Chloride nutrition improves drought resistance by enhancing water deficit avoidance and tolerance mechanisms. *Journal of Experimental Botany*, 72(14), 5246–5261. <https://doi.org/10.1093/JXB/ERAB143>
- Franco-Navarro, J. D., Rosales, M. A., Cubero-Font, P., Calvo, P., Álvarez, R., Diaz-Espejo, A., & Colmenero-Flores, J. M. (2019). Chloride as a macronutrient increases water-use efficiency by anatomically driven reduced stomatal conductance and increased mesophyll diffusion to CO₂. *The Plant Journal*, 99(5), 815–831. <https://doi.org/10.1111/TPJ.14423>
- Franz, E., & Van Bruggen, A. H. C. (2008). Ecology of E. coli O157:H7 and Salmonella enterica in the Primary Vegetable Production Chain. *Critical Reviews in Microbiology*, 34(3–4), 143–161. <https://doi.org/10.1080/10408410802357432>
- Freire Solis Edison Vladimir, P. E. D. M. (2020). *"Diseño E Implementación De Un Sistema De Monitoreo Para El Control De Nutrientes"*.
- Gartmann, F., Hügly, J., Krähenbühl, N., Brinkmann, N., Schmautz, Z., Smits, T. H. M., & Junge, R. (2023). Bioponics—An Organic Closed-Loop Soilless Cultivation System:

- Yields and Characteristics Compared to Hydroponics and Soil Cultivation. *Agronomy*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY13061436/S1>
- Goto, E., Both, A. J., Albright, L. D., Langhans, R. W., & Leed, A. R. (1996). Effect of dissolved oxygen concentration on lettuce growth in floating hydroponics. *Acta Horticulturae*, 440, 205–210. <https://doi.org/10.17660/ACTAHORTIC.1996.440.36>
- Graamans, L., Baeza, E., van den Dobbelen, A., Tsafaras, I., & Stanghellini, C. (2018). Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. *Agricultural Systems*, 160, 31–43. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2017.11.003>
- Ingar de la Cruz, L. M., Toledo Choquehuanca, J. J. M., Quispe Condori, A., Andrés Orizano, J. Á., Ortiz Morera, N. C., Ramírez Rojas, M. A., Macavilca Villar, P. M., Solórzano Acosta, R. A., & Cruz Luis, J. A. (2023). *Guía técnica de cultivos hidropónicos*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <https://hdl.handle.net/20.500.12955/2406>
- Jacob, C., & Melotto, M. (2020). Human Pathogen Colonization of Lettuce Dependent Upon Plant Genotype and Defense Response Activation. *Frontiers in Plant Science*, 10, 491866. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2019.01769/BIBTEX>
- Jindo, K., Olivares, F. L., Malcher, D. J. da P., Sánchez-Monedero, M. A., Kempenaar, C., & Canellas, L. P. (2020). From Lab to Field: Role of Humic Substances Under Open-Field and Greenhouse Conditions as Biostimulant and Biocontrol Agent. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2020.00426>
- Kabir, M. S. N., Reza, M. N., Chowdhury, M., Ali, M., Samsuzzaman, Ali, M. R., Lee, K. Y., & Chung, S. O. (2023). Technological Trends and Engineering Issues on Vertical Farms: A Review. *Horticulturae* 2023, Vol. 9, Page 1229, 9(11), 1229. <https://doi.org/10.3390/HORTICULTURAE9111229>

- Kappel, N., Boros, I. F., Ravelombola, F. S., & Sipos, L. (2021). EC Sensitivity of Hydroponically-Grown Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Types in Terms of Nitrate Accumulation. *Agriculture* 2021, Vol. 11, Page 315, 11(4), 315. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE11040315>
- Karapetyan, A. (2024). Application of biofertilizers in hydroponics: a review. *Journal of Plant Nutrition*, 47(5), 822–836. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2280159>
- Kong, Y., Deering, A. J., & Nemali, K. (2024). Minimizing *Escherichia coli* O157:H7 contamination in indoor farming: effects of cultivar type and ultra-violet light quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(7), 4218–4225. <https://doi.org/10.1002/JSFA.13303>
- Kronzucker, H. J., Coskun, D., Schulze, L. M., Wong, J. R., & Britto, D. T. (2013). Sodium as nutrient and toxicant. *Plant and Soil* 2013 369:1, 369(1), 1–23. <https://doi.org/10.1007/S11104-013-1801-2>
- Ma, Z., Liu, S., Song, J., Zhang, H., Zhai, L., & Huan, X. (2023). Early Millet Use and Its Environmental Impact Factors in Northern Shaanxi, Northwest China. *Agronomy* 2023, Vol. 13, Page 1272, 13(5), 1272. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY13051272>
- Masmoudi, F., Saadaoui, I., Ben Khedher, S., & Tounsi, S. (2024). *Bacillus Spizizenii* FMH45-based biofertilizer enhances growth and halotolerance of cherry tomato plants under hydroponic cultivation systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8. <https://doi.org/10.3389/FSUFS.2024.1520444>

- Massa, D., Magán, J. J., Montesano, F. F., & Tzortzakis, N. (2020). Minimizing water and nutrient losses from soilless cropping in southern Europe. *Agricultural Water Management*, 241. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2020.106395>
- Medina Vásquez, K. M. E., Leiva Cabrera, F. A., Rodríguez Salvatierra, Á. D., Gil Ramírez, L. A., Bardales Vásquez, C. B., León Torres, C. A., Medina Vásquez, K. M. E., Leiva Cabrera, F. A., Rodríguez Salvatierra, Á. D., Gil Ramírez, L. A., Bardales Vásquez, C. B., & León Torres, C. A. (2022). Influencia de las concentraciones del bioabono “biol” en el cultivo hidropónico de *Lactuca sativa* var. *longifolia* (Asteraceae). *Arnaldoa*, 29(1), 137–148. <https://doi.org/10.22497/ARNALDOA.291.29108>
- Michelon, N., Pennisi, G., Myint, N. O., Dall’Olio, G., Batista, L. P., Salviano, A. A. C., Gruda, N. S., Orsini, F., & Gianquinto, G. (2020). Strategies for Improved Yield and Water Use Efficiency of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) through Simplified Soilless Cultivation under Semi-Arid Climate. *Agronomy* 2020, Vol. 10, Page 1379, 10(9), 1379. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10091379>
- Mielcarek, A., Kłobukowska, K., Rodziewicz, J., Janczukowicz, W., & Bryszewski, K. Ł. (2023). Water Nutrient Management in Soilless Plant Cultivation versus Sustainability. *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 152, 16(1), 152. <https://doi.org/10.3390/SU16010152>
- Ministerio de Energía y Minas. (2020). Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético. *Dirección General de Eficiencia Energética*, 2(143), 1–2. http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/11_guia_agroindustria_DGEE.pdf

- Möller, K., & Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences*, 12(3), 242–257. <https://doi.org/10.1002/ELSC.201100085>
- Monsees, H., Suhl, J., Paul, M., Kloas, W., Dannehl, D., & Würtz, S. (2019). Lettuce (*Lactuca sativa*, variety Salanova) production in decoupled aquaponic systems: Same yield and similar quality as in conventional hydroponic systems but drastically reduced greenhouse gas emissions by saving inorganic fertilizer. *PLOS ONE*, 14(6), e0218368. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0218368>
- Nigadi, R., Ramalingannavar, N., Kumari, N., Bhagwat, S., Rawat, G., Kadam, G., Khadatare, M., Keskar, P., & Jagtap, D. (2024). Assessment of water use efficiency and fertilizer use efficiency of solar-powered aeroponic system. *International Journal of Research in Agronomy*, 7(6), 220–223. <https://doi.org/10.33545/2618060x.2024.v7.i6d.844>
- Osinermin. (2022). *Informe Técnico que Sustenta la Fijación de Precios en Barra*. 2026(511), 90–91. <https://www.osinermin.gob.pe/Resoluciones/pdf/2019/Informe-Tecnico-090-2019-GRT.pdf>
- Padilla-Medina, H. A. ;, Martínez-Nolasco, J. A. ;, Martínez-Nolasco, C. ;, Barranco-Gutiérrez, J. J. ;, Gaitan, N. C., Méndez-Guzmán, H. A., Padilla-Medina, J. A., Martínez-Nolasco, C., Martínez-Nolasco, J. J., Barranco-Gutiérrez, A. I., Contreras-Medina, L. M., & Leon-Rodríguez, M. (2022). IoT-Based Monitoring System Applied to Aeroponics Greenhouse. *Sensors* 2022, Vol. 22, Page 5646, 22(15), 5646. <https://doi.org/10.3390/S22155646>

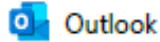
- Pomoni, D. I., Koukou, M. K., Vrachopoulos, M. G., & Vasiliadis, L. (2023). A Review of Hydroponics and Conventional Agriculture Based on Energy and Water Consumption, Environmental Impact, and Land Use. *Energies* 2023, Vol. 16, Page 1690, 16(4), 1690. <https://doi.org/10.3390/EN16041690>
- Savvas, D., Giannothanasis, E., Ntanasi, T., Karavidas, I., & Ntatsi, G. (2023). State of the Art and New Technologies to Recycle the Fertigation Effluents in Closed Soilless Cropping Systems Aiming to Maximise Water and Nutrient Use Efficiency in Greenhouse Crops. *Agronomy* 2024, Vol. 14, Page 61, 14(1), 61. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY14010061>
- Sharma, U., Barupal, M., Shekhawat, N., & Kataria, V. (2018). Aeroponics for propagation of horticultural plants: an approach for vertical farming. *Horticulture International Journal*, Volume 2(Issue 6). <https://doi.org/10.15406/HIJ.2018.02.00093>
- Seguridad alimentaria 3M. (2017). *Guía de interpretación: Placas 3M Petrifilm para recuento de E. coli y Coliformes totales [Folleto]*. <https://www.3M.com/microbiology>
- Singh, K., Guleria, V., Kaushal, S., & Shubham. (2023). Utilización de Biofertilizantes a Promotores del Crecimiento Vegetal en Sistemas de Producción Hidropónica. *Revista Actual de Ciencia Aplicada y Tecnología*, 42(37), 13–23. <https://doi.org/10.9734/cjast/2023/v42i374243>
- Solomon, E. B., Yaron, S., & Matthews, K. R. (2002). Transmission of Escherichia coli O157:H7 from Contaminated Manure and Irrigation Water to Lettuce Plant Tissue and Its Subsequent Internalization. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(1), 397–400. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.1.397-400.2002>

- Szekely, I., Zeaiter, Z., & Jijakli, M. H. (2023). Development of a Simple Bioponic Method Using Manure and Offering Comparable Lettuce Yield than Hydroponics. *Water* 2023, Vol. 15, Page 2335, 15(13), 2335. <https://doi.org/10.3390/W15132335>
- Takemura, K., Endo, R., Shibuya, T., & Kitaya, Y. (2017). Growth performances and changes of macronutrient ion concentrations in the culture medium when *Euglena gracilis* was cultured with nitrified digestate. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 38(18), 2273–2279. <https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1256438>;JOURNAL:JOURNAL:TENT19
- Tito, R., Vasconcelos, H. L., & Feeley, K. J. (2018). Global climate change increases risk of crop yield losses and food insecurity in the tropical Andes. *Global Change Biology*, 24(2), e592–e602. <https://doi.org/10.1111/GCB.13959>;CTYPE:STRING:JOURNAL
- Trevisan, S., Francioso, O., Quaggiotti, S., & Nardi, S. (2010). Humic substances biological activity at the plant-soil interface: From environmental aspects to molecular factors. *Plant Signaling & Behavior*, 5(6), 635. <https://doi.org/10.4161/PSB.5.6.11211>
- van Delden, S. H., SharathKumar, M., Butturini, M., Graamans, L. J. A., Heuvelink, E., Kacira, M., Kaiser, E., Klamer, R. S., Klerkx, L., Kootstra, G., Loeber, A., Schouten, R. E., Stanghellini, C., van Ieperen, W., Verdonk, J. C., Violet-Chabrand, S., Woltering, E. J., van de Zedde, R., Zhang, Y., & Marcelis, L. F. M. (2021). Current status and future challenges in implementing and upscaling vertical farming systems. *Nature Food* 2021 2:12, 2(12), 944–956. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00402-w>
- Van Gerrewey, T., Boon, N., & Geelen, D. (2022). Vertical farming: The only way is up? *Agronomy*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY12010002>

- Wakeel, A., Farooq, M., Qadir, M., & Schubert, S. (2011). Potassium substitution by sodium in plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 30(4), 401–413. <https://doi.org/10.1080/07352689.2011.587728>
- Weimers, K., Bergstrand, K. J., Hultberg, M., & Asp, H. (2022). Liquid Anaerobic Digestate as Sole Nutrient Source in Soilless Horticulture—Or Spiked With Mineral Nutrients for Improved Plant Growth. *Frontiers in Plant Science*, 13, 770179. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2022.770179/BIBTEX>
- Zhang, Z., Xu, M., Fan, Y., Zhang, L., & Wang, H. (2024). Using microalgae to reduce the use of conventional fertilizers in hydroponics and soil-based cultivation. *Science of the Total Environment*, 912. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169424>
- Zhu, Z., Yogev, U., Keesman, K. J., Rachmilevitch, S., & Gross, A. (2023). Integrated hydroponics systems with anaerobic supernatant and aquaculture effluent in desert regions: Nutrient recovery and benefit analysis. *Science of The Total Environment*, 904, 166867. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.166867>

VI. ANEXOS

a) Anexo 1. Evidencia de sumisión del artículo.



RV: [RICA] Envío recibido

Desde Juan Eduardo Vigo Rivera <eduardo.vigo@upeu.edu.pe>

Fecha Mié 23/07/2025 15:15

Para shakira.canaza <shakira.canaza@upeu.edu.pe>

De: Claudio M. Amescua Garcia via Revista Internacional de Contaminación Ambiental <rica@atmosfera.unam.mx>

Enviado: miércoles, 23 de julio de 2025 15:14

Para: Juan Eduardo Vigo Rivera <eduardo.vigo@upeu.edu.pe>

Asunto: [RICA] Envío recibido

vigo.rivera:

Gracias por enviarnos su manuscrito "Evaluación del comportamiento térmico del biodigestor tubular operado en el altiplano peruano" a Revista Internacional de Contaminación Ambiental. Gracias al sistema de gestión de revistas online que usamos podrá seguir su progreso a través del proceso editorial identificándose en el sitio web de la revista:

URL del manuscrito:

<https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/authorDashboard/submission/55672>

Nombre de usuario/o: jevr72

Si tiene cualquier pregunta no dude en contactar con nosotros/as. Gracias por tener en cuenta esta revista para difundir su trabajo.

Claudio M. Amescua Garcia

Revista Internacional de Contaminación Ambiental <https://www.revistascca.unam.mx/rica>

b) Anexo 2. Resolución de inscripción de perfil del proyecto de tesis en formato artículo aprobado por el consejo de facultad correspondiente.



"AÑO DEL BICENTENARIO, DE LA CONSOLIDACIÓN DE NUESTRA INDEPENDENCIA, Y DE LA CONMEMORACIÓN DE LAS HEROICAS BATALLAS DE JUNÍN Y AYACUCHO"

RESOLUCIÓN N° 0278-2024/UPeU-FIA-CF-T

Lima, Ñaña 07 de mayo de 2024

VISTO:

El expediente de Ronald Cutipa Zapana, identificado(a) con Código Universitario N° 201910209 y Lizbeyka Baneza Vilca Quispe identificado(a) con Código Universitario N° 201911784, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la aprobación e inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo y la designación o nombramiento del asesor para la obtención del título profesional;

Que Ronald Cutipa Zapana y Lizbeyka Baneza Vilca Quispe, han solicitado: la inscripción del perfil de proyecto de tesis titulado "Producción de la lechuga Aeroponica Ecosostenible Empleando Biol como Solución

Nutritiva, Acondicionado en Invernadero en el Altiplano Peruano" y la designación del Asesor, encargado de orientar y asesorar la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo;


Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 07 de mayo de 2024, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:


Aprobar el perfil de proyecto de tesis en formato artículo titulado "Producción de la lechuga Aeroponica Ecosostenible Empleando Biol como Solución Nutritiva, Acondicionado en Invernadero en el Altiplano Peruano" y disponer su inscripción en el registro correspondiente, designar a MSc. Bernardino Tapia Aguilar como ASESOR para que oriente y asesore la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo el cual fue dictaminado por: Mg. Rose Adeline Callata Chura y Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución.

Regístrese, comuníquese y archívese.




Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA




Ph.D. Silvia Pilco Quesada
SECRETARIA ACADÉMICA

cc:
-Interesado
-Asesor
-Dirección General de Investigación
-Archivo

c) Anexo 3. Resolución de sustentación del perfil del proyecto de tesis en formato artículo.



“AÑO DE LA RECUPERACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE LA ECONOMÍA PERUANA”

RESOLUCIÓN N° 0563-2025/UPeU-FIA-CF

Lima, Ñaña, 16 de setiembre de 2025

VISTO:

El expediente de los (las) bachilleres **Ronald Cutipa Zapana** identificado(a) con código universitario N° 201910209 y **Lizbeyka Baneza Vilca Quispe** identificado(a) con código universitario N° 201911784, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO:

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la sustentación de la tesis en formato artículo;

Que el Comité Dictaminador ha emitido su dictamen aprobando el informe de tesis titulado "Producción de Lechuga Aeropónica Ecosostenible Empleando Biol como Solución Nutritiva, Acondicionado en Invernadero en el Altiplano Peruano", presentado por los (las) bachilleres **Ronald Cutipa Zapana** y **Lizbeyka Baneza Vilca Quispe**, reumiendo de esta manera las condiciones previas para la declaratoria de expedito para la programación de la sustentación;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 16 de setiembre de 2025, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

1. Declarar expedito a los (las) bachilleres **Ronald Cutipa Zapana** y **Lizbeyka Baneza Vilca Quispe**, para que sustenten la tesis en formato artículo titulada "Producción de Lechuga Aeropónica Ecosostenible Empleando Biol como Solución Nutritiva, Acondicionado en Invernadero en el Altiplano Peruano", conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Ambiental, el 03 de octubre a las 12:00 horas, en la modalidad presencial, en el Salón de Actos Wellesley Muir.
2. Designar el Jurado de Sustentación, encargado de gestionar la sustentación respectiva, el mismo que queda constituido por los siguientes miembros:

Presidente: Ing. Enrique Mamani Cuela
Secretario: MSc. Miguel Angel Salcedo Enriquez
Asesor: Mtro. Bernardino Tapia Aguilar
Vocal 1: Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera
Vocal 2: MSc. Rose Adeline Callata Chura

Regístrese, comuníquese y archívese.




Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA

cc:
-Interado
-Jurado (04)
-Secretaría General
-Archivo




Lic. Gina Marita Tito Tolentino
SECRETARIA ACADÉMICA