



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA

CARRERA DE BIOTECNOLOGÍA

Tema: Uso de los residuos de cultivo *in vitro* de plantas como potencial fertilizante para Tomate riñón (*Solanum lycopersicum*) y Tomate de árbol (*Solanum betaceum*)

Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, previo a la obtención del Título de Ingenieros Biotecnólogos, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato, a través de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Autores: Mayte Carolina Jiménez Robles

Carlos Sebastián Pérez Guerra

Tutora: Mg. Manoella Alejandra Sánchez Gamica

Ambato - Ecuador

Enero – 2026

APROBACIÓN DEL TUTOR

Mg. Manoella Alejandra Sánchez Garnica

CERTIFICA:

Que el presente Informe Final del Trabajo de Titulación ha sido prolijamente revisado. Por lo tanto, autorizo la presentación de este Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, el mismo que corresponde a las normas establecidas en el Reglamento de Títulos y Grados de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Ambato, 11 de Diciembre de 2025.



Mg. Manoella Alejandra Sánchez Garnica

0604079871

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Mayte Carolina Jiménez Robles y Carlos Sebastián Pérez Guerra, manifestamos que los resultados obtenidos en el Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, previo a la obtención del título de Ingenieros Biotecnólogos, son absolutamente originales, auténticos y personales; a excepción de las citas bibliográficas.



Mayte Carolina Jiménez Robles

1850411636



Carlos Sebastián Pérez Guerra

1805231329

AUTORES

DERECHOS DE AUTOR

Autorizamos a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Informe Final del Trabajo de Titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedemos los Derechos en línea patrimoniales de nuestro Informe Final del Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además aprobamos la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando nuestros derechos de autor.



Mayte Carolina Jiménez Robles

1850411636



Carlos Sebastián Pérez Guerra

1805231329

AUTORES

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los suscritos Profesores Calificadores, aprueban el presente Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, el mismo que ha sido elaborado de conformidad con las disposiciones emitidas por la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato.

Para constancia firman:



Presidente del Tribunal



Mg. Gabriela Elena Vizuite Fiallos

1715956213



Dra. Helena De la Torre Olvera

1309651998

Ambato, 06 de Enero de 2026.

DEDICATORIA

“A quien me dio sabiduría daré gloria” Eclesiastés 51:17

*A **DIOS**, por ser mi guía y escritor principal de esta historia, a mi **Virgencita del Cisne** por darme la sabiduría y fortaleza para seguir siempre adelante, por poner en mi corazón el deseo de crecer y aprender, y por ser mi refugio en los momentos de duda.*

*A **mis padres, José y Edilma**, por ser los pilares fundamentales de mi vida, por enseñarme a nunca rendirme, por mostrarme que la fuerza y la perseverancia nacen en el corazón y no en las circunstancias. Ustedes han sido mis ángeles en la tierra, siempre apoyándome y abrazándome, incluso cuando mis fuerzas desmayaban. Gracias por creer en mí, aun cuando yo misma dudaba de mis capacidades.*

*A **mi pequeño, Joel**, mi hermano, por enseñarme el verdadero significado de ser hermana mayor, por alegrarme con sus ocurrencias y por darme motivos para sonreír en los momentos más oscuros. Él es la luz en mi vida, siempre recordándome que la vida es hermosa, incluso cuando parece difícil.*

*A **mi Ángel**, que está en el cielo, por confiar ciegamente en mí, por ser la inspiración que me impulsó a ser valiente desde pequeña, y por enseñarme a enfrentar miedos. Tu partida dejó un vacío que nunca se llenará, pero tu amor me sigue guiando.*

*A **mis Abuelitos**, porque con sus cálidos abrazos y palabras sabias me dieron las energías necesarias para seguir adelante, por ser la fuente de mi fortaleza cuando más lo necesitaba.*

*A **mis tíos, tías, primos y primas**, por siempre estar presentes, por cada palabra de aliento, cada gesto de cariño, por ser parte de mi vida y aportarme ese granito de arena que, sumado a los demás, ha construido este sueño hecho realidad.*

*A **mis amigos Los Pepos**, por ser mi abrigo y refugio, por ser esa segunda familia que me ha abrazado cuando más lo necesitaba, por ayudarme a sanar, por mostrarme lo que es el verdadero apoyo incondicional y por estar conmigo en los momentos más difíciles.*

*A **mis bebés peluditas**, por ser mi compañía en cada noche de desvelo, por ofrecerme su amor sin pedir nada a cambio. Son mi consuelo y mi razón para seguir adelante. A **mi mordelón**, por ser parte de este proceso. Tu compañía durante los días de estudio me dio fuerza y paz. Siempre te recordaré como ese silencio que me reconfortaba y tu amor incondicional que nunca faltó.*

Este logro no es solo mío, sino de cada uno de ustedes, quienes me apoyaron incondicionalmente en todo momento, sin escatimar recursos ni tiempo. Este es un logro construido con amor, sacrificio y fe. Gracias por ser parte de mi vida y de mi historia.

Con todo mi cariño y gratitud, May

DEDICATORIA

“Seguir cuando crees que no puedes más te hace diferente a los demás”

A mis padres, porque siempre me han apoyado sin importar la circunstancia. Por su ejemplo y gracias a sus esfuerzos que han sido fundamentales para este logro.

A mi mamá, por apoyarme y guiarme siempre, por los valores y sobre todo el amor infinito e incondicional, mi gratitud y respeto hacia quien siempre será mi mayor inspiración.

A mis tíos, que siempre han estado al pendiente y me han brindado su apoyo, por enseñarme a ser mejor cada día. Son parte de mi diario vivir; sin duda, un ejemplo a seguir.

A mis hermanos y abuelita, por estar en cada uno de los momentos de mi vida, con risas y tristezas, han sido la mejor compañía en este recorrido.

A nombre de mis amigos que ya se encuentran en un lugar mejor; siempre fueron la razón para no desertar y conseguir este logro.

¡¡Esto fue por y para todos ustedes!!!

Para ustedes que siguen creyendo en mí y en cada uno de mis objetivos.

Con toda mi gratitud, amor y respeto.

Sebastián Pérez.

AGRADECIMIENTO

“Sanarás y volverás cien veces más fuerte” Joel 3:10

*En primero lugar a **DIOS** mi guía, mi fortaleza y mi luz. A mi **Virgencita del Cisne** gracias por ser mi refugio en los momentos de oscuridad, por sostenerme cuando sentí que ya no podía más, por hablarme en silencio cuando el mundo hacía ruido, por mostrarme que cada caída era parte del camino y que detrás de cada una había un milagro esperándome. Gracias por abrazar mis miedos, transformar mis dudas en fe y recordarme, una y otra vez, que no camino sola.*

*A **mi papi**, el hombre que siempre ha sido mi ejemplo de fortaleza y dedicación. Gracias por darme todo lo que no tuviste, por ser el motor de nuestra familia, por ser mi pilar en cada paso, en cada lucha. A **mi mami**, mi constante compañera, que en las noches de desvelo se sentaba a mi lado, preguntándome cómo me sentía, brindándome su amor y su apoyo incondicional, gracias por sostener mi vida incluso cuando la tuya temblaba, por no soltarme nunca y por creer en mí aun cuando yo dudaba.*

*A **mi ñaño**, esa luz que Dios puso en mi vida para no dejarme caer. Gracias por secarme las lágrimas con tus bromas, por las risas que compartimos hasta altas horas de la madrugada, por enseñarme a ver el lado positivo de la vida. Eres mi inspiración, mi compañero de vida y el pilar que me ha permitido mantenerme firme.*

*A **mi Ángel**, en el cielo, porque, aunque ya no estés aquí, tu presencia sigue guiando mis pasos. Gracias por ser esa sombra luminosa que me acompaña en silencio, por enviarme señales que solo mi corazón entiende, y por recordarme que el amor verdadero nunca se despide, solo cambia de forma.*

*A **mis Abuelitos, Úrsula, Ángela y Alfonso** por ser raíces profundas que me sostienen aun en la distancia del tiempo. Gracias por su sabiduría, por sus historias que hoy me acompañan como tesoros, y por el amor inmenso que sembraron en mi vida desde que era pequeña.*

*A **mis tíos, tías, primos y primas** por cada palabra de aliento, por cada gesto que llenó mis días de calidez y me mostró que la familia es mucho más que sangre: es presencia, es apoyo, es cariño compartido sin pedir nada a cambio. Gracias por acompañarme en este camino sin saber que sus palabras a veces me salvaron.*

*A **mis pepos, Less, Yadi, Jenny y Jony** por regalarme risas que curan el alma, consejos improvisados que siempre llegaron a tiempo y una compañía que se convirtió en refugio cálido. Gracias por hacer los días de estudio más felices y demostrarme que la amistad también es una forma de amor.*

*A **mis cómplices de tesis Sebas y Yadi**, por caminar conmigo en este proceso lleno de dudas, desvelos y retos, convirtiéndolo en una experiencia menos pesada y más alegre, porque las risas nunca faltaron. Gracias por su paciencia, por su dedicación y por demostrar que trabajar juntos también puede ser un abrazo.*

*A **mi pequeña traviesa, Tefa** por enseñarme que la vida se mira mejor con ojos de niña y que la fe se fortalece en los corazones más pequeños. Gracias por recordarme que Dios actúa incluso en los detalles, y que siempre hay razones para sonreír. A **Doña Enma y Don Guido** por abrirme las puertas de su hogar y de su cariño, por preocuparse por mí como si fuera una hija más, y por recordarme que la bondad existe en formas sencillas pero profundas. Gracias por su apoyo constante y genuino.*

*A **mi tutora Ale**, por su paciencia y dedicación, por inspirarnos con su sencillez y entrega, y por demostrar que un buen guía siempre deja huellas profundas en quienes acompaña. Gracias por compartir su experiencia con humildad, por orientarnos y por recordarnos que la excelencia nace del ejemplo y del corazón con el que se enseña. A la **Ing. Sammy** por acompañarnos con paciencia, por guiarnos con claridad y por enseñarnos a ser mejor.*

*A la empresa Andeans SuperFoods por abrirme las puertas y darme un espacio para aprender y crecer. Y en especial al **Ing. Andrés**, por ser más que un guía: un amigo, un ejemplo y una luz en los momentos en que necesitaba dirección.*

*A **mis bebés peluditas**, que con su mirada y sus patitas inquietas lograron sanar rincones de mi corazón que ni yo sabía que dolían. Gracias por acompañarme en mis noches de estudio sin quejarse, por dormir a mis pies cuando sentían mi cansancio, por mover la colita incluso en mis días más grises. A **mi mordelón**, con su amor inocente y su compañía silenciosa, fueron el abrazo que necesitaba cuando todo se hacía pesado. Gracias por regalarme paz sin decir una palabra y por enseñarme que a veces los ángeles también tienen cuatro patas y un corazón que late solo para amar.*

A cada uno de ustedes, gracias desde lo más profundo de mi corazón. Cada palabra, cada abrazo, cada gesto de apoyo ha sido una fuerza invisible que me trajo hasta aquí. Este logro no es solo mío; es de todos quienes pusieron un pedacito de su alma para que yo pudiera cumplir mi meta.

Att: May ♥

AGRADECIMIENTO

“El fracaso es la oportunidad de empezar de nuevo, pero con más inteligencia”

A mi familia, punto de partida y guía fundamental en mi vida, gracias por ser un pilar en el día a día, por nunca dudar de mí y siempre darme aliento para seguir cumpliendo mis objetivos. Gracias por cada valor inculcado con amor y respeto, por darme un ejemplo a seguir y sobre todo por nunca dejarme librar mis malos momentos solo, son mi motivación y mi regalo más grande.

A mi tutora Msc. Alejandra Sánchez. Gracias por darme la oportunidad de ser parte de este proyecto innovador que me permitió conocer facetas nuevas de mi vida para seguir creciendo como persona. Por su guía y apoyo, a su dedicación en cada una de las etapas de este proceso.

A mis compañeros y compañeras de tesis y carrera, que son amigos fuera de las aulas, que siempre saben que decir o hacer para que nunca nadie se quede fuera, son importantes para mí y no tengo palabras para agradecer todo su apoyo a lo largo de este trayecto.

A todos quienes me aportaron con su granito de arena, con un mensaje de aliento, una simple sonrisa o abrazo, les doy las gracias porque me ha permitido llegar a este punto de mi vida que lo llevaré siempre presente en mi mente y corazón.

Sebastián Pérez.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTO	viii
AGRADECIMIENTO	x
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvi
ÍNDICE DE ECUACIONES	xvii
RESUMEN EJECUTIVO.....	xviii
ABSTRACT	xix
CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO	1
1.1 Antecedentes investigativos.....	1
1.1.1 Justificación	1
1.1.2 Medios de cultivo <i>in vitro</i> de plantas.....	2
1.1.2.1 Composición de los medios de cultivo <i>in vitro</i>	2
1.1.3 Rol del agar en la micropropagación.....	3
1.1.4 Residuos del cultivo <i>in vitro</i> de plantas	4
1.1.4.1 Impacto Ambiental.....	4
1.1.5 Tomate riñón (<i>S. lycopersicum</i>).....	5
1.1.5.1 Origen.....	5
1.1.5.2 Clasificación taxonómica.....	6
1.1.5.3 Condiciones de crecimiento	7
1.1.5.4 Importancia económica y nutricional.....	8
1.1.6 Tomate de árbol (<i>S. betaceum</i>).....	9
1.1.6.1 Origen.....	9
1.1.6.2 Clasificación taxonómica.....	10
1.1.6.3 Condiciones de crecimiento	11
1.1.6.4 Importancia económica y nutricional	12

1.1.7	Fertilizante	13
1.1.7.1	Definición y clasificación de fertilizantes	13
1.1.7.2	Caracterización del fertilizante	14
1.1.7.3	Ventajas frente a los fertilizantes químicos	15
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo General	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
2	CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA	17
2.1	Recursos materiales	17
2.2	Métodos	19
2.2.1	Obtención de un fertilizante líquido a partir de residuos de cultivo <i>in vitro</i>	19
2.2.1.1	Diseño experimental	19
2.2.1.2	Recolección de residuos de cultivo <i>in vitro</i>	19
2.2.1.3	Tratamiento de los residuos de cultivo <i>in vitro</i>	20
2.2.1.4	Preparación del fertilizante líquido	20
2.2.2	Caracterización del fertilizante líquido obtenido mediante la cuantificación de macro y micronutrientes	20
2.2.2.1	Nitrógeno Total	20
2.2.2.2	Fósforo Total	21
2.2.2.3	Potasio	22
2.2.2.4	Calcio	22
2.2.2.5	Magnesio	22
2.2.2.6	Azufre (sulfatos)	23
2.2.2.7	Hierro	23
2.2.2.8	Zinc	23
2.2.2.9	Manganeso	24
2.2.2.10	Cobre	24
2.2.2.11	Molibdeno	24
2.2.3	Estimación del efecto fertilizante en plantas de tomate riñón (<i>S. lycopersicum</i>) y tomate de árbol (<i>S. betaceum</i>)	24
2.2.3.1	Preparación del sustrato y siembra de plantas	24
2.2.3.2	Desinfección de semillas	25
2.2.3.3	Aplicación del fertilizante	25
2.2.3.4	Monitoreo del crecimiento vegetativo	25
3	CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
3.1	Fertilizante líquido a partir de residuos de cultivo <i>in vitro</i>	27

3.2	Plantas de tomate riñón (<i>S. lycopersicum</i>) a nivel de invernadero.	29
3.3	Germinación de tomate riñón (<i>S. lycopersicum</i>)	31
3.4	Plantas de tomate de árbol (<i>S. betaceum</i>) a nivel de invernadero.....	43
3.5	Germinación de tomate de árbol (<i>S. betaceum</i>).....	45
4	CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
4.1	Conclusiones.....	57
4.2	Recomendaciones	57
5	MATERIAL DE REFERENCIA	58
	Referencias Bibliográficas	58
	ANEXOS.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Clasificación taxonómica del tomate riñón (<i>S. lycopersicum</i>)</i>	7
Tabla 2 <i>Clasificación taxonómica del tomate de árbol (<i>S. betaceum</i>)</i>	10
Tabla 3 <i>Lista de reactivos, material fungible, materiales adicionales y equipos</i>	17
Tabla 4 <i>Tratamientos estudiados</i>	19
Tabla 5 <i>Composición del Fertilizante líquido obtenido a partir de residuos de agar del cultivo in vitro de plantas</i>	28
Tabla 6 <i>Porcentaje de germinación de tomate riñón (<i>S. lycopersicum</i>)</i>	32
Tabla 7 <i>Porcentaje de germinación de tomate de árbol (<i>S. betaceum</i>)</i>	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Representación gráfica de la variedad de tomate riñón (<i>S. lycopersicum</i>)	6
Figura 2 Representación gráfica de la variedad de tomate de árbol (<i>S. betaceum</i>)	9
Figura 3 Crecimiento del cultivo de tomate riñón (<i>S. lycopersicum</i>) a nivel de invernadero	30
Figura 4 Diferenciación foliar de plántulas de tomate riñón (<i>S. lycopersicum</i>) bajo diferentes tratamientos	33
Figura 5 Diferenciación radicular de tomate riñón (<i>S. lycopersicum</i>)	35
Figura 6 Gráfico de cajas de la altura final del tomate riñón (<i>S. lycopersicum</i>) por cada tratamiento	37
Figura 7 Gráfico de cajas del peso fresco aéreo del tomate riñón (<i>S. lycopersicum</i>) por cada tratamiento	38
Figura 8 Gráfico de cajas del peso fresco de la raíz del tomate riñón (<i>S. lycopersicum</i>) por cada tratamiento	40
Figura 9 Gráfico de cajas del número de hojas del tomate riñón (<i>S. lycopersicum</i>) por cada tratamiento	41
Figura 10 Crecimiento del cultivo de tomate de árbol (<i>S. betaceum</i>) a nivel de invernadero	43
Figura 11 Desarrollo foliar de plántulas de tomate de árbol (<i>S. betaceum</i>) bajo diferentes tratamientos	46
Figura 12 Diferenciación radicular de tomate de árbol (<i>S. betaceum</i>)	48
Figura 13 Gráfico de cajas de la altura final del tomate de árbol (<i>S. betaceum</i>) por cada tratamiento	50
Figura 14 Gráfico de cajas del peso fresco aéreo del tomate de árbol (<i>S. betaceum</i>) por cada tratamiento	51
Figura 15 Gráfico de cajas del peso fresco de la raíz del tomate de árbol (<i>S. betaceum</i>) por cada tratamiento	53
Figura 16 Gráfico de cajas del número de hojas del tomate de árbol (<i>S. betaceum</i>) por cada tratamiento	55

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 <i>Obtención de los residuos de agar provenientes de la micropropagación in vitro</i>	69
Anexo 2 <i>Mezcla de turba con perlita en proporción 3:1 y fertilizante líquido obtenido tras esterilización</i>	69
Anexo 3 <i>Plantas de tomate riñón (<i>S. lycopersicum</i>) y tomate de árbol (<i>S. betaceum</i>) en condiciones de invernadero</i>	70
Anexo 4 <i>Colocación de la mezcla de turba: perlita en los vasos para armar el sistema de siembra</i>	70
Anexo 5 <i>Tabla de datos de la altura final del tomate riñón (<i>S. lycopersicum</i>) relacionados al ANOVA</i>	71
Anexo 6 <i>Tabla de datos del peso fresco aéreo del tomate riñón (<i>S. lycopersicum</i>) relacionados al ANOVA</i>	71
Anexo 7 <i>Tabla de datos del peso fresco radicular del tomate riñón (<i>S. lycopersicum</i>) relacionados al ANOVA</i>	71
Anexo 8 <i>Tabla de datos del número de hojas del tomate riñón (<i>S. lycopersicum</i>) relacionados al ANOVA</i>	72
Anexo 9 <i>Tabla de datos de la altura final del tomate de árbol (<i>S. betaceum</i>) relacionados al ANOVA</i>	72
Anexo 10 <i>Tabla de datos del peso fresco aéreo del tomate de árbol (<i>S. betaceum</i>) relacionados al ANOVA</i>	72
Anexo 11 <i>Tabla de datos del peso fresco radicular del tomate de árbol (<i>S. betaceum</i>) relacionados al ANOVA</i>	73
Anexo 12 <i>Tabla de datos del número de hojas del tomate de árbol (<i>S. betaceum</i>) al ANOVA</i>	73

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 <i>Porcentaje de germinación</i>	25
--	----

RESUMEN EJECUTIVO

Los laboratorios de cultivo *in vitro* son herramientas clave para la propagación masiva de plantas; no obstante, generan grandes cantidades de residuos ricos en agar, nutrientes y reguladores de crecimiento que, pese a su potencial agronómico, generalmente se descartan como residuos biológicos. Frente a esta problemática, el presente trabajo tiene como propósito evaluar el uso de residuos de cultivo *in vitro* como fertilizante líquido potencial para Tomate riñón (*Solanum lycopersicum*) y Tomate de árbol (*Solanum betaceum*). Para ello, se recolectaron residuos de agar provenientes de procesos de micropropagación, los cuales fueron tratados, diluidos, esterilizados y envasados para producir el fertilizante líquido. Posteriormente, se caracterizó su composición mediante fotometría, técnica que permite cuantificar compuestos químicos mediante la medición de absorbancia, y se evaluó su efecto en plantas bajo condiciones de invernadero. Los análisis revelaron concentraciones elevadas de fósforo, azufre en forma de sulfatos, manganeso y zinc, en comparación con fertilizantes comerciales. Además, las semillas y plantas tratadas mostraron mayores porcentajes de germinación, mayor número de hojas verdaderas, uniformidad en el crecimiento foliar y mejor desarrollo radicular. Estos resultados demuestran el gran potencial de los residuos de cultivo *in vitro* como una alternativa sostenible para la nutrición vegetal, ofreciendo una opción viable y ecológica para el manejo de residuos agrícolas. Además, la reutilización de estos desechos no solo reduce su impacto ambiental, sino que también contribuye al desarrollo de prácticas agrícolas más sostenibles.

Palabras clave: Residuos de cultivo *in vitro*; fertilizante líquido; agar; Tomate riñón (*Solanum lycopersicum*); Tomate de árbol (*Solanum betaceum*); macro y micronutrientes.

ABSTRACT

In vitro culture laboratories are key tools for the mass propagation of plants; however, they generate large amounts of waste rich in agar, nutrients, and growth regulators that, despite their agronomic potential, are typically discarded as biological waste. In response to this issue, the present study aims to evaluate the use of *in vitro* culture waste as a potential liquid fertilizer for kidney tomato (*Solanum lycopersicum*) and tree tomato (*Solanum betaceum*). To this end, agar waste from micropropagation processes was collected, treated, diluted, sterilized, and packaged to produce the liquid fertilizer. Subsequently, its composition was characterized using photometry, a technique that quantifies chemical compounds through absorbance measurement, and its effect on plants was evaluated under greenhouse conditions. The analysis revealed high concentrations of phosphorus, sulfur in the form of sulfates, manganese, and zinc compared to commercial fertilizers. Additionally, treated seeds and plants exhibited higher germination percentages, greater numbers of true leaves, uniform leaf growth, and improved root development. These results demonstrate the significant potential of *in vitro* culture waste as a sustainable alternative for plant nutrition, offering a viable and ecological option for agricultural waste management. Furthermore, the reuse of these wastes not only reduces their environmental impact but also contributes to the development of more sustainable agricultural practices.

Keywords: *In vitro* culture waste; liquid fertilizer; agar; kidney tomato (*Solanum lycopersicum*); tree tomato (*Solanum betaceum*); macro and micronutrients.

CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes investigativos

1.1.1 Justificación

Los laboratorios de cultivo *in vitro* son fundamentales en la propagación masiva de plantas de interés agrícola, ornamental y forestal, debido a su capacidad para generar material vegetal uniforme, libre de patógenos y con alta tasa de multiplicación. No obstante, el uso de esta biotecnología también ha generado un problema poco explorado: la acumulación de residuos derivados de los medios de cultivo, que incluyen agar, nutrientes minerales, vitaminas y reguladores de crecimiento. Estos residuos, al ser descartados tras su uso, no solo representan un desafío ambiental, sino también una pérdida significativa de compuestos con valor agronómico, los cuales podrían ser aprovechados dentro del marco de una agricultura sostenible. El aprovechamiento de estos residuos como fertilizantes o enmiendas orgánicas podría contribuir a la reducción de impactos negativos en el medio ambiente, así como a la mejora de los rendimientos agrícolas (Yulistian et al., 2025).

Un laboratorio de micropropagación de tamaño medio puede generar entre 80 y 120 kg mensuales de estos residuos (Li et al., 2022), lo que representa un problema creciente. Estos residuos aún contienen entre 30% y 45% de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg) y de 40% a 60% de micronutrientes (Fe, Zn, Mn, Cu), así como reguladores de crecimiento, vitaminas y oligosacáridos. Sin embargo, su destino habitual es la esterilización y el descarte como desecho biológico, lo que implica una pérdida de recursos valiosos que podrían ser reutilizados en aplicaciones agrícolas sostenibles. (Wang et al., 2024).

Recientes investigaciones han explorado el aprovechamiento de estos residuos, demostrando que los residuos de agar pueden funcionar como bioestimulantes vegetales (Soni et al., 2024). Este aprovechamiento se basa en su contenido de nutrientes biodisponibles, capacidad de retención de agua, presencia de microorganismos promotores del crecimiento y trazas de reguladores vegetales (Zhou et al., 2022).

En América Latina, y particularmente en Ecuador, los avances en el uso de residuos orgánicos como insumos agrícolas se han orientado principalmente hacia la producción de compost, bioles y fertilizantes elaborados a partir de restos vegetales, estiércol o subproductos agroindustriales (Chakravarty & Mandavgane, 2021). Por ejemplo, se han formulado bioles con mezclas de desechos orgánicos que mostraron contenidos adecuados de nitrógeno, fósforo y potasio, junto con un pH cercano

a la neutralidad, lo que evidencia su viabilidad como insumo para mejorar la fertilidad del suelo (Zambrano y Mendoza et al., 2021).

Asimismo, estudios nacionales han reportado resultados favorables en el rendimiento de cultivos como maíz y hortalizas mediante la aplicación de fertilizantes líquidos obtenidos con microorganismos de montaña, confirmando la importancia de explorar alternativas locales que reduzcan la dependencia de fertilizantes químicos (Abreu et al., 2020).

Sin embargo, a pesar de estos avances, aún existe un vacío significativo en la investigación sobre el aprovechamiento de residuos de medios de cultivo *in vitro*, especialmente aquellos con agar, como insumo directo para la elaboración de fertilizantes. No se han desarrollado protocolos estandarizados que permitan procesar y caracterizar adecuadamente estos residuos, y menos aún se ha evaluado de forma sistemática su efecto en cultivos de relevancia económica para Ecuador, como el tomate riñón (*S. lycopersicum*) y el tomate de árbol (*S. betaceum*). La falta de información sobre la composición química precisa, la estabilidad del producto elaborado y su eficacia agronómica en condiciones locales representa una limitación que impide dimensionar el verdadero potencial de estos desechos como recurso agrícola (Riddech et al., 2025).

Tomando en cuenta los antecedentes anteriores, esta investigación plantea el aprovechamiento de los residuos de agar generados en los cultivos *in vitro* para el desarrollo de un fertilizante líquido. Este producto será evaluado en su aplicación sobre plantas de tomate riñón (*S. lycopersicum*) y tomate de árbol (*S. betaceum*), con el fin de determinar su efecto en el crecimiento vegetal y su viabilidad como alternativa sostenible frente a la fertilización convencional. De esta manera, la tesis no solo busca aportar al desarrollo de prácticas agrícolas más sostenibles, sino también contribuir a la reducción de los residuos de laboratorio y al diseño de estrategias que promuevan una economía circular en el sector agrícola y biotecnológico ecuatoriano.

1.1.2 Medios de cultivo *in vitro* de plantas

1.1.2.1 Composición de los medios de cultivo *in vitro*

Los medios de cultivo *in vitro* constituyen el soporte esencial para la propagación de tejidos vegetales, ya que suministran los nutrientes minerales, las fuentes de energía y los reguladores de crecimiento necesarios para mantener la viabilidad y promover la diferenciación celular. Entre ellos, el medio de Murashige y Skoog (MS) y sus modificaciones representan la formulación más empleada debido a su equilibrio de macronutrientes y micronutrientes, que favorece la proliferación de una amplia gama de especies. (Murashige y Skoog, 1962; Neumann et al., 2020).

La composición básica de los medios incluye macronutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre, indispensables para los procesos de división y elongación celular. Los micronutrientes, como hierro, manganeso, zinc, cobre y molibdeno, cumplen funciones catalíticas, enzimáticas y de transporte de electrones. Asimismo, se incorporan vitaminas como tiamina, piridoxina y ácido nicotínico, que actúan como cofactores metabólicos y mejoran la estabilidad de los cultivos **(Ikeuchi et al., 2016)**.

Como fuente de energía, se utiliza generalmente sacarosa en concentraciones entre el 2 y el 3 %, lo que permite suplir la limitada capacidad fotosintética de los explantes en condiciones *in vitro* **(Thorpe, 2012)**. Para proporcionar soporte físico, se emplea agar, un polisacárido extraído de algas rojas, que confiere consistencia semisólida al medio y facilita el anclaje de los tejidos. Adicionalmente, en ciertas formulaciones se incluyen proteínas hidrolizadas, como peptonas, que funcionan como fuentes alternativas de nitrógeno orgánico **(George et al., 2008)**.

La regulación del pH, generalmente en un rango de 5,6 a 5,8, se consigue mediante soluciones buffer, lo que asegura la disponibilidad de nutrientes y la estabilidad del medio durante el periodo de cultivo **(Karalija & Paric, 2017)**. Asimismo, para inducir respuestas morfogénicas específicas, se incorporan fitohormonas en distintas concentraciones, principalmente auxinas, citoquininas y giberelinas, cuya proporción relativa determina procesos como la organogénesis, la embriogénesis somática o el enraizamiento. En algunos casos, se añaden antioxidantes para reducir el pardeamiento de los tejidos y antibióticos o fungicidas para minimizar contaminaciones.

La composición del medio puede ser modificada de acuerdo con los requerimientos fisiológicos de cada especie y etapa del cultivo. Por ejemplo, ajustes en la concentración de nitrógeno, fósforo y potasio influyen directamente en la proliferación de meristemos y en la formación de raíces, lo que repercute en la eficiencia del proceso de micropropagación **(González et al., 2021)**. Esta flexibilidad en la formulación ha convertido a los medios de cultivo *in vitro* en una herramienta versátil para la propagación masiva y conservación de germoplasma vegetal.

1.1.3 Rol del agar en la micropropagación

El agar desempeña un papel fundamental en los medios de cultivo *in vitro* de plantas, actuando como agente gelificante que proporciona soporte físico a los explantes y facilita su desarrollo. Este polisacárido, derivado de algas rojas, se utiliza ampliamente debido a sus propiedades, que permiten la formación de una matriz semisólida estable, esencial para el crecimiento controlado de tejidos vegetales. **(González et al., 2021)**.

Una de las características destacadas del agar es su capacidad para formar geles firmes a temperaturas cercanas a los 45 °C, lo que lo convierte en un medio ideal para mantener la estabilidad estructural en condiciones de cultivo *in vitro*. Además, su solubilidad en agua caliente y su capacidad para solidificarse a temperaturas relativamente bajas permiten una manipulación eficiente en la preparación de medios de cultivo. **(Zambrano-Mendoza et al., 2021).**

La concentración de agar en los medios de cultivo varía según las necesidades específicas de cada especie vegetal y el tipo de cultivo. Las concentraciones típicas oscilan entre 6 y 8 g/L, proporcionando la consistencia adecuada para el desarrollo de explantes sin comprometer la disponibilidad de nutrientes. Es importante destacar que la calidad del agar utilizado puede influir en la transparencia del medio, lo que es crucial para la observación y la evaluación del crecimiento de los tejidos **(Riseh et al., 2024)**. Además de su función estructural, el agar permite la liberación controlada de nutrientes y reguladores de crecimiento, creando un entorno favorable para la proliferación celular y el establecimiento de cultivos. Su uso en combinación con otros componentes, como fitohormonas y vitaminas, contribuye a la optimización de los procesos de micropropagación y regeneración de plantas. **(Allouzi et al., 2022).**

1.1.4 Residuos del cultivo *in vitro* de plantas

1.1.4.1 Impacto Ambiental

El cultivo *in vitro* de plantas es una técnica que, si bien resulta fundamental para la propagación masiva y conservación de especies, conlleva la generación de residuos con un notable potencial contaminante. Los principales desechos provienen de los medios de cultivo sólidos o semisólidos preparados con agar, los cuales contienen altas concentraciones de compuestos orgánicos y minerales. En particular, la presencia de sacarosa como fuente de carbono y de sales minerales con nitrógeno y fósforo convierte a estos medios en un riesgo ambiental cuando se eliminan sin tratamiento, ya que tales compuestos son responsables de fenómenos de eutrofización y deterioro de la calidad del agua **(Zheng et al., 2025)**.

Los residuos líquidos y gelificados con agar poseen una elevada carga de materia orgánica, que, al entrar en contacto con cuerpos de agua, incrementa la demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Estudios sobre medios de cultivo similares han reportado valores de DQO (Demanda Química de Oxígeno) que alcanzan entre 500 y 3000 mg/L, cifras suficientes para generar hipoxia y afectar de forma crítica la fauna acuática **(Wang et al., 2024)**. Estos valores superan ampliamente los límites establecidos para aguas residuales domésticas, lo que evidencia que un vertido sin tratamiento desde laboratorios de

micropropagación constituye un factor de presión ambiental comparable al de pequeñas industrias agroalimentarias.

Otro aspecto relevante es la concentración de nutrientes. En medios con composición tipo MS, el nitrógeno total puede superar los 50 mg/L, mientras que el fósforo disponible puede encontrarse en rangos de 10 a 20 mg/L. Estas cantidades, aunque parecen bajas en escala de laboratorio, se vuelven significativas cuando se consideran volúmenes acumulados de decenas o cientos de litros al año en centros de micropropagación. El vertido de este tipo de efluentes puede favorecer floraciones algales nocivas, alterar el equilibrio microbiano natural y comprometer la potabilidad de aguas subterráneas. **(Hernández y Silva, 2023).**

A estos impactos químicos se suma el riesgo biológico. Cuando los frascos y medios con agar contienen cultivos contaminados por bacterias u hongos, el desecho sin esterilización representa una posible vía de diseminación de patógenos hacia ecosistemas agrícolas o naturales. Dichos microorganismos, al encontrar nutrientes disponibles en el residuo, pueden multiplicarse y afectar la sanidad vegetal de áreas cercanas **(Nekrasova et al., 2022)**. Su contenido orgánico y mineral, junto con el riesgo microbiológico asociado, exige la implementación de estrategias de neutralización, valorización o tratamiento especializado antes de su disposición final, con el fin de reducir significativamente la carga contaminante y avanzar hacia una micropropagación más sostenible.

1.1.5 Tomate riñón (*S. lycopersicum*)

1.1.5.1 Origen

Tomate riñón (*S. lycopersicum*) **(Figura 1)** es originario de la región andina de Sudamérica, especialmente de Perú, Ecuador y el norte de Chile. En estas zonas se han identificado poblaciones silvestres y semidomesticadas que constituyen la base genética del cultivo actual. Investigaciones de biología molecular han demostrado que las especies silvestres del género *Solanum* presentes en la región andina fueron determinantes en el proceso de domesticación del tomate moderno **(Lin et al., 2022)**.

Figura 1

*Representación gráfica de la variedad de tomate riñón (*S. lycopersicum*)*



Nota. Una de las variedades más cultivadas en la zona andina del Ecuador (INIAP, 2025).

El tomate se expandió hacia Mesoamérica, donde experimentó una diversificación notable en su morfología y genética. En este territorio, y especialmente en México, se consolidó un segundo centro de domesticación, en el cual se seleccionaron rasgos asociados al incremento del tamaño del fruto y a la mejora del sabor. Estos procesos explican la amplia variabilidad que caracteriza a las variedades cultivadas en la actualidad (Razifard et al., 2020). Con la llegada de los colonizadores españoles en el siglo XVI, el tomate fue introducido en Europa y, desde allí, se difundió rápidamente a otras regiones del mundo, adaptándose a una gran diversidad de ambientes agroecológicos (Bai & Lindhout, 2022).

1.1.5.2 Clasificación taxonómica

El tomate riñón, pertenece a la familia Solanaceae, género *Solanum*, y especie *lycopersicum* (Tabla 1). Este cultivo, también denominado tomate de palo, tomate cimarrón, sachatomate, tomatillo, contragallinazo o mango nórdico, se desarrolla en altitudes que oscilan entre los 1000 y 3000 m.s.n.m.

Tabla 1

Clasificación Taxonómica del tomate riñón (S. lycopersicum)

Categoría taxonómica	Clasificación
Reino:	Plantae
División:	Espermatofita
Subdivisión:	Angiospermas
Clase:	Magnoliopsida
Orden:	Solanales
Familia:	Solanaceae
Género:	<i>Solanum</i>
Especie	<i>Tomate riñón (S. lycopersicum)</i>

Fuente: (INIAP, 2025; Peñaherrera y Valverde, 2016)

La familia Solanaceae se caracteriza por plantas herbáceas, arbustivas o trepadoras, muchas de las cuales producen frutos comestibles o compuestos bioactivos. El género *Solanum* es uno de los más extensos dentro de Solanaceae, con más de 1,500 especies descritas, y el tomate es una de las especies cultivadas más relevantes a nivel mundial debido a su valor nutricional y versatilidad culinaria. (Facundo-Angel et al., 2024)

1.1.5.3 Condiciones de crecimiento

El cultivo de tomate riñón (*S. lycopersicum*) es muy importante en Ecuador gracias a su adaptabilidad a diversas condiciones agroecológicas, lo que le permite crecer desde el nivel del mar hasta los 3200 msnm, como en las provincias de Carchi, Imbabura, Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua, Chimborazo, Bolívar, Cañar, Azuay y Loja, donde se adapta bien a temperaturas entre 18°C y 27°C. Las zonas andinas y la costa (como la provincia de Santa Elena) son productoras gracias a su clima templado y la implementación de invernaderos para controlar la temperatura. Temperaturas inferiores a 10°C pueden afectar negativamente la floración, mientras que valores superiores a 30°C tienden a reducir la productividad del cultivo.

La luz es otro factor esencial para el cultivo del tomate riñón (*S. lycopersicum*). Esta variedad requiere una exposición luminosa de al menos 10 a 12 horas diarias con intensidad adecuada para favorecer la fotosíntesis y la calidad del fruto. La humedad relativa óptima está entre 60% y 70%,

controlando el riego para prevenir enfermedades y estrés hídrico (Feng et al., 2024). Prefiere suelos bien drenados, con textura franco-arenosa a franco-arcillosa y pH entre 6.0 y 7.0, ricos en materia orgánica. Finalmente, requiere un manejo nutricional balanceado, con suministro adecuado de macro y micronutrientes, ajustado según las etapas fenológicas para maximizar desarrollo, floración y calidad del fruto (Colimba-Limaico et al., 2022).

1.1.5.4 Importancia económica y nutricional

El tomate riñón (*S. lycopersicum*) representa un cultivo de gran relevancia tanto en el ámbito económico como nutricional a nivel mundial gracias a sus características organolépticas, como sabor dulce, textura firme y tamaño adecuado para consumo fresco y procesamiento industrial. Además, es un producto estratégico en la cadena agroalimentaria, utilizado en la elaboración de salsas, jugos y conservas, lo que amplía su valor agregado y su impacto en la economía agrícola.

El tomate riñón (*S. lycopersicum*) presenta rendimientos competitivos que pueden superar las 50 toneladas por hectárea bajo condiciones óptimas, lo que lo posiciona como una opción rentable para los agricultores. La creciente demanda de alimentos frescos y saludables impulsa su cultivo, generando empleo y dinamizando economías locales. Asimismo, la exportación de esta variedad contribuye a la balanza comercial de países productores, fortaleciendo su posición en los mercados internacionales (García & Pérez, 2023).

Mientras que, en el ámbito nutricional, este cultivo es una fuente importante de compuestos bioactivos que aportan beneficios para la salud humana. Contiene altos niveles de licopeno, un carotenoide con propiedades antioxidantes que ayuda a reducir el riesgo de enfermedades cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer (Rodríguez et al., 2024). Además, es rico en vitaminas C y A, potasio, fibra dietética y otros micronutrientes esenciales que contribuyen al fortalecimiento del sistema inmunológico, la regulación de la presión arterial y la mejora de la digestión. Su consumo regular está asociado con efectos positivos en la prevención de enfermedades crónicas y el mantenimiento de una dieta equilibrada.

Promover su producción sostenible y su consumo puede contribuir a mejorar la calidad de vida de las poblaciones, especialmente en zonas donde la desnutrición y las enfermedades relacionadas con la dieta son prevalentes. Por ello, la investigación y desarrollo de tecnologías que optimizan su cultivo y preservan sus propiedades nutricionales son áreas prioritarias en la agricultura moderna (López et al., 2024).

1.1.6 Tomate de árbol (*S. betaceum*)

1.1.6.1 Origen

El tomate de árbol (*S. betaceum*), conocido también como tamarillo (**Figura 2**), es una fruta originaria de la región andina de Sudamérica, principalmente de los actuales territorios de Ecuador, Perú y Bolivia, donde ha sido cultivada desde tiempos precolombinos como parte de la dieta y la cultura agrícola de los pueblos originarios. Diversos registros etnobotánicos indican que las comunidades andinas lo empleaban no solo como alimento, sino también con fines medicinales, debido a sus propiedades energéticas y su capacidad de mejorar el estado general de salud (**Singh y Kumari, 2024**). Con la expansión agrícola en la región, la especie se consolidó como un cultivo de importancia local, aunque su explotación comercial se mantuvo limitada frente a otros frutales.

Figura 2

*Representación gráfica de la variedad de tomate de árbol (*S. betaceum*)*



Nota. Una de las variedades preferidas por los consumidores en Ecuador (**INIAP, 2023**).

Durante el siglo XX, el tomate de árbol (*S. betaceum*) empezó a difundirse a nivel internacional, especialmente en Nueva Zelanda, país que fomentó su producción a gran escala y lo introdujo en mercados europeos y asiáticos bajo el nombre de tamarillo, buscando diferenciarlo de otras especies del género *Solanum*. Actualmente, el cultivo se encuentra distribuido en distintas regiones subtropicales y templadas del mundo, con mayor presencia en América Latina, África oriental y Asia, gracias a su adaptabilidad y a la creciente demanda de frutas exóticas ricas en antioxidantes y compuestos funcionales (**Coyago-Cruz et al., 2023**).

El origen y posterior dispersión del tomate de árbol (*S. betaceum*) demuestran su relevancia como recurso fitogenético subutilizado, con potencial de expansión en el contexto de una agricultura sostenible. Esta especie no solo representa un legado cultural de las comunidades andinas, sino también una alternativa para diversificar los sistemas productivos y ofrecer nuevas oportunidades en el mercado de frutas frescas y procesadas (Viera et al., 2022).

Además de su origen andino, es importante destacar que el tomate de árbol (*S. betaceum*) ha sido tradicionalmente parte de los sistemas de agricultura de subsistencia, cultivado en huertos familiares junto a especies como el maíz, la papa o el frijol. Este contexto cultural explica su amplia variabilidad genética y la existencia de ecotipos locales con características morfológicas y organolépticas diferenciadas, que van desde frutos rojos intensos hasta variedades anaranjadas o amarillentas (Viera et al., 2022). En la actualidad, esa diversidad constituye un recurso estratégico para programas de mejoramiento genético orientados a la adaptación a nuevas condiciones climáticas y a la demanda de productos diferenciados en mercados internacionales.

1.1.6.2 Clasificación taxonómica

El tomate de árbol (*S. betaceum*) pertenece a la familia *Solanaceae*, una de las más diversas del reino vegetal, que incluye especies de gran relevancia económica como el tomate riñón (*S. lycopersicum*), la papa (*Solanum tuberosum*) y el ají (*Capsicum* spp.). De acuerdo con las bases de datos internacionales de referencia, como *Plants of the World Online* (Royal Botanic Gardens, Kew, 2023), *GRIN-Global Taxonomy* (USDA, 2023) y NCBI (2023), la clasificación taxonómica de tomate de árbol (*S. betaceum*) es la siguiente:

Tabla 2

*Clasificación taxonómica del tomate de árbol (*S. betaceum*)*

Categoría taxonómica	Clasificación
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Solanales
Familia	Solanaceae

Género	<i>Solanum</i>
Especie	Tomate de árbol (<i>S. betaceum</i>)

Esta clasificación ubica a la especie dentro de un grupo caracterizado por su diversidad de metabolitos secundarios, los cuales otorgan propiedades organolépticas y nutraceuticas relevantes. Además, al compartir el género *Solanum* con otros cultivos estratégicos, el tomate de árbol (*S. betaceum*) ofrece ventajas en cuanto a estudios de mejoramiento genético y biotecnológico, que permiten extrapolar conocimientos y técnicas empleadas en especies como el tomate y la papa (USDA, 2023).

La pertenencia del tomate de árbol (*S. betaceum*) al género *Solanum* ha generado un interés particular entre los investigadores, debido a las posibilidades de transferencia de conocimientos y técnicas entre especies estrechamente relacionadas. De hecho, estudios filogenéticos recientes confirman que tomate de árbol (*S. betaceum*) comparte secuencias conservadas con especies cultivadas como el tomate y la papa, lo cual lo convierte en un modelo interesante para aplicar herramientas biotecnológicas como marcadores moleculares y análisis genómicos comparativos (Royal Botanic Gardens, Kew, 2023). Esta cercanía filogenética refuerza su potencial en programas de mejoramiento asistido y en estrategias de conservación de recursos genéticos dentro de la familia Solanaceae.

1.1.6.3 Condiciones de crecimiento

El tomate de árbol (*S. betaceum*) es un cultivo perenne de porte arbustivo que se desarrolla en climas subtropicales y templados de altura. Su rango óptimo de adaptación se encuentra entre los 1000 y 3000 metros sobre el nivel del mar, donde la temperatura oscila entre 18 y 25 °C. Aunque la especie tolera descensos ocasionales a 10 °C y aumentos hasta 30 °C, condiciones extremas pueden afectar el cuajado de frutos y la calidad organoléptica (Singh y Kumari, 2024).

El fotoperiodo ideal se sitúa entre 8 y 12 horas de luz diaria, siendo un factor determinante para la floración y la producción de frutos. En cuanto a suelos, la especie prospera en aquellos de textura franco-arenosa o franco-arcillosa, con buen drenaje y un pH ligeramente ácido (5.5–6.5). Su sistema radicular poco profundo exige suelos fértiles y bien estructurados, con adecuada disponibilidad de materia orgánica y macroelementos como nitrógeno, fósforo y potasio.

Otro aspecto relevante en las condiciones de crecimiento es la interacción con factores bióticos y de manejo agrícola. La productividad del cultivo puede verse afectada por plagas como la mosca blanca (*Bemisia tabaci*) o enfermedades como la antracnosis (*Colletotrichum* spp), que reducen el valor comercial de los frutos (Singh y Kumari, 2024). En este sentido, prácticas como el uso de injertos, la rotación de cultivos y la aplicación de bioinsumos representan alternativas sostenibles para minimizar pérdidas y mantener la rentabilidad del sistema productivo. Estos factores deben ser considerados dentro del manejo integrado para garantizar no solo un rendimiento adecuado, sino también la calidad nutricional del fruto.

Estudios realizados en el interandino ecuatoriano evidencian que la altitud influye significativamente en el perfil fitoquímico de los frutos. Coyago-Cruz et al. (2023) demostraron que ecotipos cultivados en altitudes mayores presentan mayor capacidad antioxidante y mayor concentración de compuestos fenólicos, lo que resalta la importancia de las condiciones ambientales sobre la calidad nutricional. Asimismo, Viera et al. (2022) reportaron que la selección de genotipos adaptados a microclimas específicos constituye una estrategia para mejorar la productividad y la calidad del fruto.

De esta forma, las condiciones de crecimiento del tomate de árbol (*S. betaceum*) lo consolidan como un cultivo de nicho, principalmente por su alto valor en múltiples contextos, junto con el elevado impacto que tiene sobre sus consumidores. Además, es altamente sensible al entorno, pero con un potencial considerable para la producción diferenciada y el aprovechamiento de atributos funcionales que lo hacen competitivo en mercados especializados.

1.1.6.4 Importancia económica y nutricional

El tomate de árbol (*S. betaceum*) ha adquirido relevancia en las últimas décadas por su versatilidad de consumo y su perfil fitoquímico. Desde el punto de vista económico, constituye una fuente de ingresos significativa para pequeños y medianos productores en países andinos como Ecuador, Colombia y Perú, donde se comercializa principalmente en ferias locales y mercados regionales. En Ecuador, por ejemplo, su cultivo representa un eje importante de la fruticultura de altura, con destino tanto a consumo fresco como a la agroindustria, que lo transforma en jugos, mermeladas, salsas y néctares (Singh y Kumari, 2024).

En el ámbito internacional, su denominación como tamarillo ha permitido su inserción en mercados europeos y asiáticos, donde se valora como fruta exótica con alto contenido de compuestos bioactivos. Según Isla et al. (2022), los residuos del fruto, como cáscaras y semillas, son una fuente

valiosa de antioxidantes, lo que abre oportunidades para la industria nutracéutica y de alimentos funcionales. Además, estudios farmacológicos recientes evidencian efectos protectores frente al estrés oxidativo y la apoptosis inducida por metales pesados, como el plomo (I'tishom et al., 2025), lo que refuerza su potencial en el campo de la salud preventiva.

Desde el punto de vista nutricional, el tomate de árbol (*S. betaceum*) es rico en vitamina C, carotenoides, antocianinas y polifenoles, compuestos con propiedades antioxidantes que contribuyen a la prevención de enfermedades crónicas no transmisibles. También contiene minerales como potasio y magnesio, esenciales para la regulación de la presión arterial y el funcionamiento neuromuscular (Orellana-Paucar et al., 2024). La combinación de estos nutrientes convierte a la especie en un recurso estratégico para el diseño de dietas saludables y el desarrollo de suplementos naturales.

De esta manera, el tomate de árbol (*S. betaceum*) combina un valor económico creciente con potencial de expansión a la agricultura sostenible y en la innovación agroalimentaria, con un perfil nutricional y funcional de gran interés, lo que lo posiciona como una especie clave dentro de las frutas subutilizadas.

1.1.7 Fertilizante

1.1.7.1 Definición y clasificación de fertilizantes

Los fertilizantes son insumos esenciales en la agricultura moderna, diseñados para aportar los nutrientes requeridos por las plantas con el fin de garantizar su adecuado crecimiento, desarrollo y rendimiento. Estos insumos actúan complementando o enriqueciendo la disponibilidad de elementos minerales en el suelo, mejorando la eficiencia en la absorción y el metabolismo vegetal. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), los fertilizantes se clasifican principalmente en químicos, orgánicos y biofertilizantes, dependiendo de su origen, composición y mecanismo de acción.

Los fertilizantes químicos o sintéticos se producen industrialmente mediante procesos químicos que concentran nutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), en formas altamente solubles. Aunque han permitido alcanzar altos niveles de productividad agrícola, su uso intensivo ha generado problemas como la lixiviación de nitratos, la contaminación de aguas subterráneas y la acidificación de suelos (Yu et al., 2020). Por otra parte, los fertilizantes orgánicos provienen de residuos vegetales, estiércol, compost y otros materiales biodegradables, destacándose por su aporte de materia orgánica y su contribución a la estructura del suelo. Finalmente, los biofertilizantes representan una categoría emergente, elaborados a partir de microorganismos benéficos (como bacterias fijadoras de nitrógeno, solubilizadoras de fósforo o micorrizas) o al mezclarlos con residuos biotecnológicos, con capacidad

de mejorar la disponibilidad de nutrientes y estimular el crecimiento vegetal de manera sostenible (**Zhao et al., 2024**).

Desde un enfoque agronómico, la clasificación de los fertilizantes también considera su modo de aplicación, que puede ser sólido (granulado o en polvo), líquido (soluciones nutritivas) o gaseoso (amoníaco anhidro). Esta distinción es importante, ya que influye en la eficiencia de uso de los nutrientes, los costos de aplicación y la compatibilidad con distintos sistemas de riego (**Yu et al., 2020**). En el caso de los fertilizantes líquidos, su facilidad de integración en sistemas de fertirriego los convierte en una alternativa atractiva para la agricultura moderna, permitiendo aplicaciones más precisas y una mejor distribución de nutrientes en el perfil del suelo.

Esta clasificación resalta la necesidad de transitar hacia sistemas de fertilización que integren opciones menos contaminantes y más eficientes, donde los fertilizantes, especialmente líquidos, cobran protagonismo como alternativa viable frente a los desafíos de la agricultura contemporánea. (**Awogbemi & Kallon, 2022**).

1.1.7.2 Caracterización del fertilizante

La caracterización de un fertilizante es un proceso fundamental para establecer su calidad, seguridad y aplicabilidad en los sistemas productivos. Este análisis comprende la determinación de la composición química, las propiedades físicas y, en ciertos casos, las características biológicas del producto. En el caso de los fertilizantes convencionales, el criterio más común es la proporción de macronutrientes expresada en la fórmula N-P-K, que indica el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo vegetal. Sin embargo, una caracterización más completa debe considerar también otros elementos como calcio, magnesio y azufre, así como micronutrientes como hierro, zinc, cobre, manganeso y molibdeno, cuya presencia es determinante para procesos fisiológicos específicos de la planta (**Riseh et al., 2024**). Asimismo, se evalúan parámetros fisicoquímicos como pH, conductividad eléctrica, solubilidad y estabilidad durante el almacenamiento, los cuales definen la eficacia del fertilizante en diferentes condiciones de cultivo. Esta visión integral resulta especialmente importante en un contexto agrícola que busca no solo altos rendimientos, sino también sostenibilidad ambiental.

En los últimos años, la caracterización de fertilizantes ha cobrado especial relevancia en el desarrollo de alternativas biotecnológicas, biofertilizantes y fertilizantes líquidos. Entre estas innovaciones destacan los residuos de cultivo *in vitro*, que representan una fuente novedosa de nutrientes y compuestos bioactivos. Estudios recientes han demostrado que dichos residuos contienen entre 30 y 45 % de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg) y entre 40 y 60 % de micronutrientes (Fe, Zn,

Mn, Cu), además de reguladores de crecimiento, vitaminas y oligosacáridos (Wang et al., 2024). Al ser transformados en soluciones líquidas mediante procesos de extracción, filtrado y estabilización, mantienen propiedades fertilizantes y bioestimulantes que favorecen la germinación, el incremento de la biomasa aérea y una mayor tolerancia de las plantas al estrés biótico y abiótico (Soni et al., 2024). En este sentido, la caracterización de fertilizantes derivados de residuos *in vitro* no solo permite comprobar su valor agronómico, sino que también constituye un paso esencial para estandarizar protocolos de producción, garantizar su efectividad en campo y posicionarlos como una alternativa sostenible frente a la fertilización química convencional.

1.1.7.3 Ventajas frente a los fertilizantes químicos

El uso de biofertilizantes y fertilizantes de origen biotecnológico presenta múltiples ventajas frente a los fertilizantes químicos tradicionales, tanto en el ámbito agronómico como ambiental y socioeconómico. En primer lugar, los biofertilizantes mejoran la eficiencia en el uso de nutrientes junto con microorganismos, liberándolos de forma gradual y en sinergia con los procesos fisiológicos de la planta, lo que reduce pérdidas por lixiviación y escorrentía. Esto contrasta con los fertilizantes químicos, cuya alta solubilidad puede derivar en una rápida liberación y baja eficiencia de aprovechamiento (Mustafa et al., 2025).

Por otro lado, los biofertilizantes y fertilizantes contribuyen a la salud del suelo, ya que aumentan la actividad microbiana, mejoran la estructura física y elevan la capacidad de retención de agua. En cambio, el uso excesivo de fertilizantes sintéticos puede provocar degradación, salinización y reducción de la biodiversidad edáfica (Jena & Singh, 2022). Además, los biofertilizantes promueven la resiliencia frente al estrés biótico y abiótico, al contener metabolitos secundarios y microorganismos que estimulan la resistencia de las plantas contra patógenos y condiciones adversas como sequía o calor (Zhao et al., 2024).

Desde la perspectiva ambiental, los biofertilizantes reducen las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción y uso de fertilizantes nitrogenados, y permiten valorizar residuos agroindustriales o biotecnológicos que de otra manera serían descartados. Esto los alinea con el modelo de economía circular, donde los desechos se transforman en recursos productivos, generando beneficios ambientales y económicos (Razouk et al., 2024).

Considerar la adopción de biofertilizantes y fertilizantes con origen de residuos biotecnológicos, puede representar una estrategia de bajo costo para pequeños y medianos agricultores, al reducir la dependencia de insumos importados y promover soluciones locales adaptadas a los recursos

disponibles. En el caso específico de los residuos de cultivo *in vitro*, su aprovechamiento no solo disminuye el impacto ambiental de los laboratorios de micropropagación, sino que también abre nuevas posibilidades para la innovación en fertilización sostenible en cultivos estratégicos como tomate riñón (*S. lycopersicum*) y tomate de árbol (*S. betaceum*).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Analizar el uso de los residuos de cultivo *in vitro* de plantas como potencial fertilizante para tomate riñón (*S. lycopersicum*) y tomate de árbol (*S. betaceum*).

1.2.2 Objetivos Específicos

- Obtener un fertilizante líquido a partir de residuos de cultivo *in vitro*.
- Caracterizar el fertilizante líquido obtenido mediante la cuantificación de macro y micronutrientes.
- Estimar el efecto fertilizante en plantas de tomate riñón (*S. lycopersicum*) y tomate de árbol (*S. betaceum*).

CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA

2.1 Recursos materiales

El presente trabajo de titulación fue de tipo experimental y se realizó en los laboratorios académicos de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato. En la **Tabla 3** se presenta la lista de reactivos, material fungible, materiales adicionales y equipos empleados en el desarrollo de la investigación.

Tabla 3

Lista de reactivos, material fungible, materiales adicionales y equipos.

Material	Cantidad
Reactivos	
Etanol 96%	3 L
Agua destilada	20 L
Ácido clorhídrico (HCl) 37%	500 ml
Hidróxido de sodio (NaOH)	250 g
Etanol 70%	1 L
Agar residual	1000 g
Hipoclorito de sodio 3%	500 ml
Solución nutritiva Hoagland	20 L
Material Fungible	
Guantes de nitrilo	2 cajas
Mascarillas	1 paquete
Cofias	1 paquete
Bolsas autoclavables	30
Papel filtro	3
Frascos estériles de 4 L	5
Papel aluminio	1
Etiquetas adhesivas	1
Paños absorbentes	2
Micropipetas	2
Mecheros	2
Papel industrial	1
Vasos de precipitación	5
Bandejas de plástico	6
Balón de aforo 1000 ml	2

Matraz Erlenmeyer 500 ml	2
Tubos de ensayo con tapa rosca	12
Probeta de 500 ml	2
Probeta de 1000 ml	1
Celdas	5
Materiales Adicionales	
Perlita	1
Turba	1
Semillas de tomate riñón (<i>S. lycopersicum</i>)	400
Semillas de tomate de árbol (<i>S. betaceum</i>)	400
Vasos Plásticos	100
Tijeras	2
Cooler	1
Equipos	
Balanza analítica	1
Potenciómetro	1
Refrigerador	1
Agitador magnético	2
Invernadero	1
Autoclave	1
Cámara de flujo laminar	1
Espectrofotómetro	1
Fotómetro multiparamétrico HI83399	1
Digestor	1
Cocina	1
Computadoras	2

2.2 Métodos

2.2.1 Obtención de un fertilizante líquido a partir de residuos de cultivo *in vitro*.

2.2.1.1 Diseño experimental

En la presente investigación se analizó el efecto fertilizante sobre el crecimiento de plantas de tomate riñón (*S. lycopersicum*) y tomate de árbol (*S. betaceum*). Se manejaron los controles descritos en la **Tabla 4**.

Tabla 4

Tratamientos estudiados

Tratamiento	Descripción
Agua (Control Negativo)	Plantas regadas únicamente con agua
Hoagland (Control Positivo)	Plantas regadas con solución nutritiva Hoagland
Fertilizante	Plantas regadas con el fertilizante elaborado a partir de residuos de agar

Nota. Los tratamientos evaluados en las dos especies de interés.

Se utilizaron un total de 60 plantas, distribuidas en dos especies: tomate riñón (*S. lycopersicum*) y tomate de árbol (*S. betaceum*). Para cada tratamiento se emplearon 20 plantas, correspondientes a 10 plantas de cada especie. Cada planta individual se consideró como una unidad experimental.

El experimento se estableció bajo un Diseño Completamente al Azar (DCA), ya que no existieron factores ambientales que restringieran la aleatorización dentro del invernadero. Las plantas fueron distribuidas aleatoriamente dentro del área experimental para evitar sesgos espaciales. Los tres tratamientos estudiados fueron: agua (control negativo), solución Hoagland (control positivo) y el fertilizante preparado a partir de residuos de agar.

2.2.1.2 Recolección de residuos de cultivo *in vitro*

Se inició con la identificación y recolección de los residuos generados durante los procesos de micropropagación vegetal en los laboratorios de cultivo *in vitro* de la empresa Andean Superfood S.A. Los residuos utilizados fueron los medios de cultivo y restos vegetales no viables. Esta recolección se realizó durante dos semanas consecutivas con el fin de obtener 3.5 kg, utilizando envases de

polipropileno (PP) esterilizados y etiquetados, bajo condiciones controladas para evitar contaminación. Posteriormente, los residuos fueron transportados al Laboratorio de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología (FCIAB) para su procesamiento (Riseh et al., 2024).

2.2.1.3 Tratamiento de los residuos de cultivo *in vitro*

En el laboratorio de la FCIAB se realizó la separación de los residuos del cultivo *in vitro* en: medios de cultivo y tejidos vegetales. Los medios de cultivo se sometieron a un tratamiento térmico (50–60 °C) durante 45 minutos, mientras que los residuos vegetales fueron triturados mecánicamente para la liberación de compuestos solubles. Esta etapa facilitó la extracción de nutrientes y compuestos bioactivos, según la metodología utilizada por Magarelli et al., (2022), para la producción de fertilizantes líquidos a partir de residuos orgánicos.

2.2.1.4 Preparación del fertilizante líquido

Adoptando la metodología de Allouzi et al, (2022), se preparó el fertilizante líquido a partir de la mezcla de residuos vegetales triturados y medios de cultivo *in vitro* sometidos a un proceso de extracción en agua destilada. Esta mezcla fue agitada suavemente durante 24 a 48 horas a temperatura ambiente (18–20 °C) para favorecer la liberación de compuestos solubles como nitratos, fosfatos, azúcares residuales y aminoácidos presentes en los tejidos y en el medio nutritivo. Posteriormente, se utilizó papel filtro en la solución para separar y obtener la fase líquida, la cual contenía los nutrientes disueltos, misma que se sometió a una esterilización a 121 grados por 15 minutos, se dejó enfriar y se almacenó en frascos oscuros. Se ajustó el pH a 6, utilizando una solución de bicarbonato de sodio y ácido clorhídrico, evitando el exceso de radicales libres en el fertilizante, y se colocó en zonas con poca luz para evitar la degradación de los compuestos activos, a una temperatura entre 5 y 8 °C. Este método evita la fermentación y reduce el riesgo de contaminación microbiológica, siendo útil para aplicaciones inmediatas en sistemas de fertirrigación o aspersión foliar. (Riseh et al., 2024).

2.2.2 Caracterización del fertilizante líquido obtenido mediante la cuantificación de macro y micronutrientes.

2.2.2.1 Nitrógeno Total

Para la caracterización del nitrógeno, se empleó el método de Hanna Instruments para medir la concentración de nitrógeno presente en el fertilizante líquido, basado en el método del ácido cromotrópico. Para realizar la medición, se utilizó el fotómetro multiparamétrico HI 83399, y se seleccionó el método de interés en la pantalla del equipo. Se retiraron las tapas de dos viales de digestión

de nitrógeno total HR HI 937667B, y a cada uno de ellos se le agregó un paquete de persulfato de potasio (PERSULFATE/N). Posteriormente, se añadió a un vial 0.5 ml de agua desionizada y al otro 0.5 ml de muestra, en un ángulo de 45°. Se colocaron nuevamente las tapas a los viales y se agitaron vigorosamente durante 30 segundos. Luego, se colocaron en el reactor de digestión a 105 °C durante 30 minutos.

Una vez finalizado el proceso de digestión, se retiraron los viales del reactor y se dejaron enfriar en una gradilla. Se retiraron nuevamente las tapas y se les agregó un paquete de bisulfato (BISULFITE/N) a cada uno. Posteriormente, se cerraron y se cronometró un tiempo de 3 minutos en el equipo.

Transcurrido ese tiempo, se retiraron las tapas de los viales y se añadió un paquete de HI 937670 a cada uno. Luego, se cerraron y se agitaron durante 15 segundos. A continuación, se presionó la opción “Continuar” en el equipo y se cronometraron 2 minutos.

Finalizado ese periodo, se retiraron las tapas de dos viales diferentes 93766V 0HR, y se añadieron 2 ml del blanco digerido a uno de ellos y, al otro, la muestra digerida, manteniendo un ángulo de 45°. Finalmente, se presionó la opción “Continuar” y se cronometraron 5 minutos con el blanco en el equipo, momento en el cual se seleccionó el blanco con la tecla “Zero”.

De este modo, las lecturas proporcionadas por el equipo tras analizar las muestras se expresaron en mg/L de nitrógeno (N) (**Hanna Instruments, 2020, pp. 167-171**).

2.2.2.2 Fósforo total

Para la caracterización del fósforo total, se empleó el método de Hanna Instruments, basado en el método del ácido ascórbico adaptado del EPA Method 365.2 (**Yu et al., 2020**), con el fin de determinar la concentración de fósforo en el fertilizante líquido. La medición se realizó utilizando el fotómetro multiparamétrico HI 83399, seleccionando el método correspondiente en la pantalla del equipo. Primero, se retiraron las tapas de los viales de digestión de fósforo total LR HI 93758V-0. A cada uno de ellos se le añadieron 5 ml de muestra en un ángulo de 45° y un paquete de persulfato de potasio (PERSULFATE/P). Posteriormente, se colocaron nuevamente las tapas y se agitaron vigorosamente durante 30 segundos.

Los viales fueron introducidos en el reactor de digestión a una temperatura de 150 °C durante 30 minutos. Una vez culminado el proceso de digestión, se retiraron los viales y se dejaron enfriar en una gradilla.

Después del enfriamiento, se agregaron 2 ml de solución NaOH 1.54 N HI 93758C-0 en un ángulo de 45° y un paquete del reactivo de fósforo HI 93758-0 a cada vial. Se cerraron y se agitaron durante 15 segundos. A continuación, se presionó la opción “Continuar” en el equipo y se cronometraron 3 minutos de reacción. Transcurrido ese tiempo, se volvió a presionar “Continuar” y se realizó la lectura del blanco, seleccionándolo con la tecla “Zero”. Finalmente, se realizaron las lecturas

de las muestras, y el equipo proporcionó los resultados expresados en mg/L de fósforo (P). (**Hanna Instruments, 2020, pp. 210-213**).

2.2.2.3 Potasio

Para la caracterización del potasio, se empleó el método turbidimétrico tetrafenilborato adaptado por Hanna Instruments para medir la concentración de potasio en el fertilizante líquido. Primero, se dispusieron 10 ml de muestra sin reaccionar en una cubeta. Luego, se añadieron 6 gotas del reactivo A HI 93750A-0, se cerró la celda y se agitó levemente. La cubeta se introdujo en el equipo HI 83399 y se presionó la opción “Zero” (“-0.0-”) para definir el blanco.

A continuación, se agregó un paquete del reactivo B HI 93750B-0 y se agitó durante 1 minuto hasta disolver completamente el contenido. Posteriormente, se llevó nuevamente la cubeta al fotómetro. Se presionó la opción “Timer”, se esperaron 2 minutos de reacción y, finalmente, el equipo proporcionó la lectura en mg/L de K^+ . (**Hanna Instruments, 2020, pp. 234–236**).

2.2.2.4 Calcio

Para la determinación del calcio, se aplicó el método de Hanna Instruments, basado en el método de oxalato. Se utilizó el fotómetro multiparamétrico HI 83399, seleccionando en pantalla el método correspondiente.

Se vertieron 3 ml de muestra sin reaccionar en cubetas de lectura, aforando luego hasta los 10 ml con el reactivo A HI 93752A Ca. Se añadieron 4 gotas de la solución tampón, se cerraron las celdas y se agitaron vigorosamente para asegurar la homogenización.

Después, las muestras fueron colocadas en el equipo y se presionó la tecla “Zero” para establecer el blanco. Posteriormente, se retiró la cubeta, se añadió 1 ml del reactivo HI 93752B Ca, se agitó suavemente durante 15 segundos, y finalmente se insertó nuevamente en el equipo, presionando la opción “Read”. Tras 5 minutos, el equipo entregó los resultados en mg/L de Ca^{2+} (**Hanna Instruments, 2020, pp. 58–60**).

2.2.2.5 Magnesio

Para la caracterización del magnesio, se utilizó el método adaptado Calmagite, aplicable a tratamientos de agua. Se agregaron 1 ml del reactivo A HI 93752A-Mg en una cubeta y se llevó al aforo de 10 ml con el reactivo HI 93752B-Mg. Se agitó varias veces para garantizar la homogeneidad. La cubeta se introdujo en el fotómetro HI 83399, se seleccionó el método correspondiente y se presionó la tecla “Zero” para definir el blanco. Luego, con una micropipeta, se añadieron 0.5 ml de muestra y se

agitó nuevamente. Finalmente, se colocó la cubeta en el equipo, se activó la opción “Timer” (esperando aproximadamente 15 segundos) y se presionó “Read” para obtener los resultados en mg/L de Mg^{2+} (Hanna Instruments, 2020, pp. 132–133).

2.2.2.6 Azufre (sulfatos)

Para la caracterización de sulfatos, se empleó el método de Hanna Instruments, basado en el método colorimétrico 4500- $(\text{SO}_4)^{2-}$ del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Baird et al., 2017, pp. 546–548). Se vertieron 10 ml de muestra sin reaccionar en una celda de lectura de 10 ml, se introdujo en el fotómetro HI 83399 y se presionó la opción “Zero”, asegurando que la pantalla mostrara “-0.0-” para definir el blanco.

Posteriormente, se añadió un sobre de sulfatos HI 93751-0 y se agitó vigorosamente durante 30 segundos para lograr una buena homogenización. Luego, se dejó que la muestra reaccionara dentro del equipo durante 5 minutos, y al finalizar ese tiempo, se presionó la tecla “Read”, obteniendo la lectura en mg/L de $(\text{SO}_4)^{2-}$ (Hanna Instruments, 2020, pp. 247–248).

2.2.2.7 Hierro

La determinación de hierro se realizó utilizando el método adaptado del *EPA Phenanthroline Method 315B*. Se vertieron 10 ml de muestra sin reaccionar en una cubeta, la cual fue colocada en el fotómetro HI 83399, donde se definió el blanco presionando “Zero” (“-0.0-”). Luego, se agregó un sobre de reactivo HI 93721-0 y se agitó vigorosamente la cubeta para asegurar la disolución completa. Después, la celda se colocó nuevamente en el equipo, se activó la opción “Timer” y, tras 3 minutos de reacción, el equipo proporcionó la lectura en mg/L de Fe (Hanna Instruments, 2020, pp. 130–131).

2.2.2.8 Zinc

Para la determinación de zinc, se aplicó el método Zincon 3500-Zn B, según el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Baird et al., 2017, pp. 344–345). Se vertieron 20 ml de muestra en una probeta y se añadió un paquete del reactivo HI 93731A-0, agitando hasta su disolución completa. Posteriormente, se aforaron 2 cubetas de lectura con 10 ml de la solución, una de las cuales se utilizó como blanco (“-0.0-”). A la otra cubeta se le añadieron 0.5 ml del reactivo B HI 93731B-0, se agitó vigorosamente por 15 segundos y se introdujo en el equipo. Luego, se presionó la opción “Timer” y, tras la reacción, se obtuvo la lectura en mg/L de Zn (Hanna Instruments, 2020, pp. 253–255).

2.2.2.9 Manganeso

La caracterización del manganeso se realizó utilizando el método Periodate, adaptado del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Yu et al., 2020). Se seleccionó el método en el equipo HI 83399, se llenó una cubeta con 10 ml de muestra y se presionó “Zero” para establecer el blanco. Luego, se retiró la cubeta y se añadió un sobre de reactivo HI 93709A-0 (manganeso HR A), agitando para disolver. Después de 2 minutos, se agregó otro paquete del reactivo HI 93709-0 (manganeso HR B). La cubeta se introdujo nuevamente en el equipo, se presionó la opción “Timer” y, tras 1 minuto y 30 segundos, se presionó “Read”, obteniendo el resultado en mg/L de Mn. (Hanna Instruments, 2020, pp. 137–138).

2.2.2.10 Cobre

La determinación del cobre se efectuó mediante el método adaptado del *EPA Method*, utilizando el fotómetro HI 83399. Se agregaron 10 ml de muestra sin reaccionar en una celda, que fue introducida en el equipo para establecer el blanco presionando la tecla “Zero” (“-0.0-”). A continuación, se añadió un paquete del reactivo de cobre HR HI 93702-0 y se activó el temporizador del equipo. Tras 45 segundos de reacción, el fotómetro proporcionó la lectura en mg/L de Cu (Hanna Instruments, 2020, pp. 99–100).

2.2.2.11 Molibdeno

El molibdeno se caracterizó mediante el método del ácido mercaptoacético, adaptado por Hanna Instruments. Se seleccionó el método en el HI 83399, se llenó una cubeta con 10 ml de muestra y se definió el blanco presionando la opción “Zero”. Luego, se vertieron 25 ml de muestra en una probeta y se añadieron los reactivos HI 93730A-0, HI 93730B-0 y HI 93730C-0. Se agitó hasta disolver por completo y se aforaron cubetas con 10 ml de la mezcla. Finalmente, se colocaron las cubetas en el equipo, se activó el temporizador durante 5 minutos y el equipo proporcionó los resultados en mg/L de Mo^{6+} (Hanna Instruments, 2020, pp. 140–142).

2.2.3 Estimación del efecto fertilizante en plantas de tomate riñón (*S. lycopersicum*) y tomate de árbol (*S. betaceum*)

2.2.3.1 Preparación del sustrato y siembra de plantas

Se prepararon sustratos de cultivo compuestos por turba y perlita en proporción 3:1. El sustrato fue esterilizado a 121 °C durante 15 minutos, repitiendo el proceso dos veces, asegurando la eliminación de microorganismos que pudieran interferir en el crecimiento (Allouzi et al., 2022).

2.2.3.2 Desinfección de semillas

Siguiendo la metodología de Feng et al. (2022), las semillas fueron esterilizadas con etanol al 70 % durante 1 minuto, seguidas de un tratamiento con hipoclorito de sodio al 0,5 % durante 3 minutos. Luego, se enjuagaron con agua destilada estéril.

Se sembraron cinco semillas por vaso de plástico (12 oz), utilizando el mismo sustrato 3:1. Los vasos se mantuvieron en un ambiente cerrado, con 25 ± 3 °C durante el día, 15 ± 2 °C durante la noche, y un fotoperiodo de 12 h luz / 12 h oscuridad.

2.2.3.3 Aplicación del fertilizante

El fertilizante fue aplicado mediante riego, utilizando un volumen uniforme de 50 ml por planta, teniendo 500 ml por especie, totalizando 1 L por el tratamiento de fertilizante para ambas especies de tomate, y aplicando la misma base para el control negativo (riego con agua) y control positivo (riego con solución nutritiva Hoagland). Para asegurar homogeneidad, se preparó una solución madre de 20 L por tratamiento. El riego inició desde el Día 1 posterior a la siembra. (Raimi, 2021).

2.2.3.4 Monitoreo del crecimiento vegetativo

Durante el desarrollo del experimento, se llevó a cabo un monitoreo riguroso del crecimiento vegetativo de las plantas utilizando la metodología de Ávila y Royero (2021). Este seguimiento se enfocó principalmente en los siguientes aspectos:

- **Tiempo de germinación**, Se consideró como total el número de semillas sembradas (100%). Se registró el número de días que tardaron en emerger las semillas de cada tratamiento. Se definió como semilla germinada aquella que presentó una radícula con una longitud mayor o igual a 2 mm.
- El porcentaje de germinación (PG) se calculó con la siguiente fórmula:

$$PG = \left(\frac{\text{Nº semillas germinadas}}{\text{Nº semillas sembradas}} \right) \times 100$$

Ecuación 1

- **Presencia de hojas verdaderas**, que fue un indicador clave para evaluar el establecimiento inicial de las plántulas. Se registró a partir del Día 3 de la germinación, y se obtuvo los valores de altura de las plantas, luego se seleccionó 10 plantas con mayor viabilidad para cada uno de los tratamientos y se continuó con el estudio.
- **Biomasa aérea y radicular por peso fresco**, evaluada mediante el peso de la parte aérea y radicular al final del periodo de evaluación, lo cual permitió comparar el efecto de los distintos tratamientos en el desarrollo vegetativo. Para este proceso, se utilizaron 5 de las 10 plantas seleccionadas, se analizó el peso fresco, y se realizaron análisis estadísticos como ANOVA para evaluar si existió diferencia significativa entre los tratamientos.

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Fertilizante líquido a partir de residuos de cultivo *in vitro*.

En la **Tabla 5** se muestra el resultado del fertilizante líquido obtenido a partir de residuos de agar provenientes del cultivo *in vitro* de plantas, al igual que se muestran los valores obtenidos de macro y micronutrientes de la caracterización por fotometría.

Tabla 5

Composición del Fertilizante líquido obtenido a partir de residuos de agar del cultivo in vitro de plantas.

Fertilizante a base residuos del cultivo <i>in vitro</i>	Componentes en solución Hoagland comercial	Componentes analizados en el fertilizante	Control negativo Agua	Control positivo Solución Hoagland	Fertilizante
	Macronutrientes				
	Nitrógeno: 6.14%	Nitrógeno: 0.21 %	--	☑	☒
	Potasio: 8.47%	Potasio: 0.17 %	--	☑	☒
	Calcio: 4.73%	Calcio: 0.61%	--	☑	☒
	Magnesio: 2.55%	Magnesio: 0.001433%	--	☑	☒
	Fósforo: 31 ppm	Fósforo: 74.7 ppm	--	☒	☑
	Azufre: 64 ppm	Azufre: 237.67 ppm	--	☒	☑
	Micronutrientes				
	Hierro: 0.11%	Hierro: 0.00011 %	--	☑	☒
	Manganeso: 0.5 ppm	Manganeso: 0.87 ppm	--	☒	☑
	Zinc: 0.05 ppm	Zinc: 0.11 ppm	--	☒	☑
	Cobre: 0.007%	Cobre: 0.000044 %	--	☑	☒
	Molibdeno: 0.01%	Molibdeno: 0.000013 %	--	☑	☒

Nota. Cuantificación de macro y micronutrientes existentes en el fertilizante líquido comparados con los presentes en la solución comercial Hoagland. Se marca con la simbología (☑) y (☒) para mostrar que los nutrientes esenciales que están presentes en el fertilizante superan a los niveles de la solución Hoagland.

Los resultados obtenidos en la **Tabla 5** muestran como principal producto el fertilizante líquido obtenido, el mismo que presenta un aspecto turbio y coloración amarillenta. Este resultado era esperado, dado que los residuos de agar en su composición contienen compuestos orgánicos y nutrientes liberados durante la micropropagación *in vitro*. Por otra parte, tras la caracterización, el fertilizante líquido presenta mayores contenidos de macroelementos como el fósforo y azufre, con valores de 74.7 ppm y 237.67 ppm, respectivamente. En cuanto al contenido de micronutrientes, destacan el manganeso y zinc, con valores de 0.87 ppm y 0.11 ppm, correlativamente. A pesar de que los otros macro y micronutrientes no lograron sobrepasar ni igualar los niveles de las soluciones comerciales, siguen siendo cantidades y trazas importantes para el crecimiento y desarrollo vegetativo óptimo.

La turbidez del fertilizante puede deberse a los tratamientos de trituración, térmico y de esterilizado, en los cuales se liberan compuestos orgánicos, nutrientes y trazas de hormonas de crecimiento favoreciendo su suspensión en el medio líquido. Estudios como el de **(Yulistian et al., 2025)** han demostrado que la transformación de residuos orgánicos a un fertilizante líquido logra aprovechar el contenido de macro y micronutrientes gracias a su disponibilidad, lo que facilita la absorción en las plantas, en comparación con formas sólidas tradicionales, mismas que afectan la composición del suelo y generan afecciones en la salud al producir alimentos en ese tipo de suelos **(Al-Shammary et al., 2024)**.

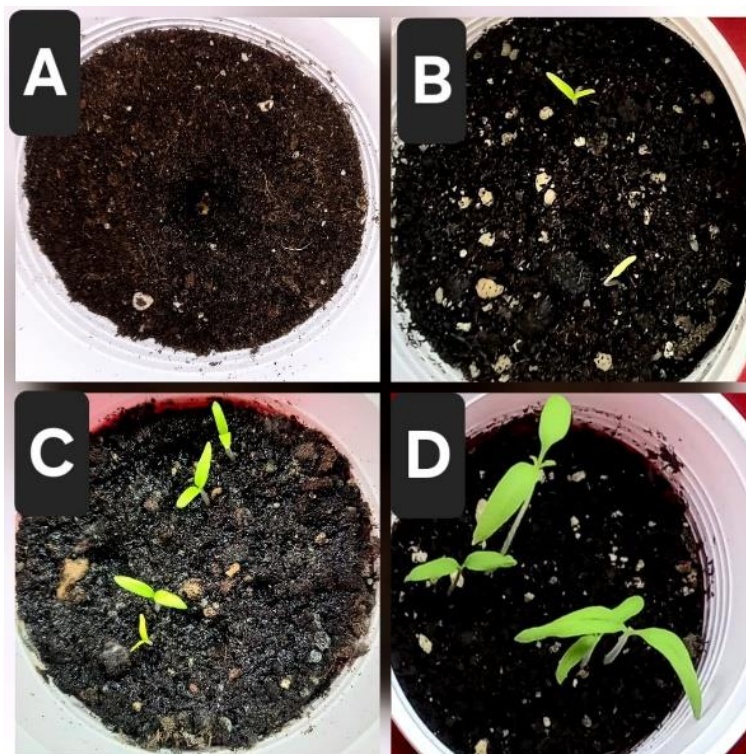
Además, **Liu et al., (2024)**, menciona que sustratos residuales (cáscara de plátano, residuos avícolas) cuando se fermentan con microorganismos seleccionados producen fertilizantes líquidos con incremento significativo en la disponibilidad nutritiva y mejora en crecimiento vegetal. Esto refuerza el hecho de que el residuo de agar de la micropropagación *in vitro* utilizado para la creación del fertilizante líquido tiene un gran potencial para la agricultura sostenible, ya que, impide que el agar y otros nutrientes liberados se puedan lixiviar al medio ambiente. Los valores obtenidos en este estudio referentes a fósforo (74.7 ppm), están acorde y presenta mejores resultados con los obtenidos por **Yulistian (2025)** para fósforo, con un valor de (1.20 ppm). Por otro lado, existen nutrientes con valores importantes como el azufre (237.67 ppm), manganeso (0.87 ppm) y zinc (0.11 ppm).

3.2 Plantas de tomate riñón (*S. lycopersicum*) a nivel de invernadero.

En la **Figura 3** se muestra el desarrollo gráfico del crecimiento de las plantas de tomate riñón (*S. lycopersicum*) durante los 25 principales días. Donde se evidencia las diferentes etapas de emergencia, brotación y expansión foliar.

Figura 3

*Crecimiento del cultivo de tomate riñón (*S. lycopersicum*) a nivel de invernadero.*



Nota. Resultado del proceso de crecimiento del tomate riñón (*S. lycopersicum*) en condiciones de invernadero, dividido en cuatro etapas clave. **A) Representación inicial de la siembra:** El sustrato compuesto por turba y perlita, junto con la semilla de tomate riñón, se prepara para la germinación. **B) Observación de los primeros brotes:** En esta fase, comienzan a emerger los primeros brotes, señalando el inicio de la germinación. **C) Crecimiento apical y brotación de hojas:** El crecimiento apical de las plantas se evidencia, junto con la aparición de las primeras hojas. **D) Hojas reales y definidas:** Las plantas muestran hojas verdaderas

La **Figura 3** muestra el desarrollo progresivo del cultivo de tomate riñón (*S. lycopersicum*) bajo condiciones de invernadero. A lo largo de cuatro etapas, se observa cómo las plantas atravesaron distintas fases de crecimiento, desde la siembra inicial, pasando por la germinación, hasta llegar al crecimiento apical y la formación de hojas definidas. En cada una de estas fases, es posible analizar la evolución de las plantas, lo que permitió evaluar la efectividad de los tratamientos aplicados y en conjunto con las condiciones del invernadero en el desarrollo de las semillas. Esta comparación entre las etapas ofrece una visión integral del proceso de germinación y crecimiento de las plantas, subrayando los cambios estructurales importantes que ocurren en un período de tiempo relativamente corto.

El proceso de germinación y crecimiento del tomate riñón (*S. lycopersicum*) a condiciones de invernadero está influenciado por diversos factores que favorecen su desarrollo. En la imagen A, el

sustrato compuesto por turba y perlita 3:1 proporciona una excelente aireación y retención de humedad, elementos clave para la germinación de las semillas. La turba es rica en nutrientes orgánicos y tiene la capacidad de retener agua, mientras que la perlita mejora la aireación del sustrato, evitando el exceso de humedad que podría dañar las raíces **(Pérez, 2022)**. Una vez que las semillas comienzan a germinar, como se observa en la imagen B, el crecimiento inicial de los brotes se debe a la absorción de agua y nutrientes del sustrato, lo que activa el metabolismo celular y estimula la expansión del tejido **(Rodríguez et al., 2007)**. En la imagen C, el crecimiento apical y la brotación de hojas son impulsados por la fotosíntesis y la absorción de nutrientes, especialmente el azufre y fósforo, que son esenciales para la síntesis de aminoácidos y el desarrollo de tejidos **(Castillo et al., 2023)**. Finalmente, en la imagen D, la planta comienza a desarrollar hojas definidas y maduras, lo que indica que ha alcanzado un nivel de madurez en el que el proceso fotosintético es más eficiente. Este crecimiento se ve favorecido por el equilibrio entre los nutrientes disponibles, la luz y la capacidad de la planta para adaptarse a estas condiciones **(EOSDA, 2025)**.

El proceso de crecimiento en invernadero de plantas de tomate riñón (*S. lycopersicum*) ha sido ampliamente estudiado por su capacidad para optimizar las condiciones de desarrollo vegetativo. Según investigaciones como las de **(Pérez, 2022)**, el uso de sustratos adecuados como turba y perlita asegura una alta tasa de germinación y un crecimiento saludable, condiciones que también se observaron en esta investigación. **(Rodríguez et al., 2024)** demostraron que la fase de crecimiento apical es esencial para la consolidación de un sistema radicular eficiente, lo que se refleja en la imagen C de esta figura, donde las plantas muestran una sólida ramificación. Por otro lado, **Abreu et al. (2023)** resaltan que el paso a hojas maduras es un indicador clave de que las plantas están alcanzando una fase de crecimiento estable, como se observó en la imagen D. Estos hallazgos refuerzan la importancia de controlar las condiciones ambientales y el tipo de sustrato en el invernadero para maximizar el rendimiento del cultivo de tomate riñón (*S. lycopersicum*).

3.3 Germinación de tomate riñón (*S. lycopersicum*)

En la **Tabla 6** se muestra el porcentaje de germinación que obtuvo cada tratamiento, el mismo que sirvió para determinar la capacidad del fertilizante en relación con los otros tratamientos aplicados.

Tabla 6

Porcentaje de germinación de tomate riñón (S. lycopersicum).

Tomate riñón			
	Agua	Hoagland	Fertilizante
Semillas sembradas	50	50	50
Germinadas	15	16	27
Porcentaje de germinación	30 %	32 %	54 %

Nota. La tabla muestra los resultados de la germinación de las semillas de tomate riñón (*S. lycopersicum*) tras 13 días de siembra con tres tratamientos diferentes: agua, Hoagland y fertilizante. Se sembraron 50 semillas en cada tratamiento. El porcentaje de germinación fue de 30% para el tratamiento con agua, 32% para Hoagland, y 54% para el tratamiento con fertilizante. Los resultados muestran que el fertilizante tuvo un incremento significativo en el porcentaje de germinación, alcanzando una tasa de germinación más alta en comparación con los otros dos tratamientos, lo que sugiere que los nutrientes adicionales favorecieron la germinación de las semillas. Los tratamientos con agua y Hoagland mostraron tasas de germinación similares, aunque ligeramente superiores en el caso de Hoagland.

La **Tabla 6** muestra el porcentaje de germinación de tomate riñón (*S. lycopersicum*) bajo tres tratamientos diferentes: agua, Hoagland y fertilizante. Se sembraron 50 semillas en cada tratamiento, y se observó el número de semillas germinadas después de 13 días. Los resultados indican que, para el tratamiento con agua, germinaron 15 semillas, lo que representa un 30% de germinación. Para el tratamiento con Hoagland, germinaron 16 semillas, alcanzando un 32% de germinación. Sin embargo, el tratamiento con fertilizante mostró el mejor resultado, con 27 semillas germinadas, lo que equivale a un 54% de germinación. Este resultado sugiere que el fertilizante tiene un efecto positivo en la germinación, superando a los otros tratamientos en un 22% en comparación con el agua y un 24% en comparación con Hoagland.

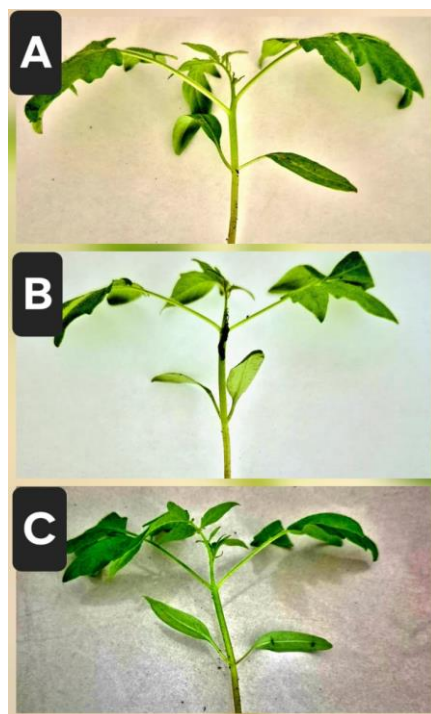
El porcentaje de germinación observado en los tres tratamientos refleja los efectos de los nutrientes disponibles en cada tratamiento. En el tratamiento con fertilizante, el mayor porcentaje de germinación puede explicarse por la presencia de nutrientes esenciales como fósforo y zinc, que son cruciales para el desarrollo temprano de las plantas (**Bhat et al., 2024**). El nitrógeno, en particular, a pesar de su bajo contenido en el fertilizante, es vital para el crecimiento celular, lo que favorece la germinación de las semillas. Además, el fósforo juega un papel fundamental en el proceso de energía celular y en la formación de raíces durante la germinación, lo que contribuye al mayor éxito observado en el tratamiento con fertilizante (**Fabela et al., 2022**). En este caso, el agua y la solución Hoagland,

aunque proporcionan nutrientes, no presentan concentraciones tan altas de estos compuestos, lo que resulta en una tasa de germinación inferior.

Los resultados obtenidos en este estudio coinciden con lo que han reportado otros investigadores en cuanto a los efectos de los fertilizantes sobre la germinación de semillas. Por ejemplo, **Farhan et al. (2024)** demostraron que los fertilizantes ricos en macronutrientes, como el nitrógeno y el fósforo a pesar de no contribuir de igual manera contribuye en gran parte al crecimiento vegetal y aumentan la tasa de germinación en diversas especies vegetales, lo que también se refleja en los 27 brotes germinados en este estudio. **Yulistian et al. (2025)** encontraron que el fertilizante favoreció la germinación en lechuga roja debido a la disponibilidad de nutrientes como fósforo y potasio presentes en el fertilizante en mayor cantidad elementos esenciales para el desarrollo inicial de las plantas, sin embargo, en este caso, el zinc y azufre representan un hallazgo importante para el crecimiento inicial, así como para la durabilidad y adaptación de las plantas. Comparado con otros estudios, como el de **Islas (2025)**, este estudio también subraya la importancia de nutrientes equilibrados para maximizar la germinación y el establecimiento de las plantas desde sus primeras etapas de crecimiento.

Figura 4

*Diferenciación foliar de plántulas de tomate riñón (*S. lycopersicum*) bajo diferentes tratamientos.*



Nota. Desarrollo del cultivo de tomate riñón (*S. lycopersicum*) bajo tres tratamientos de riego. **A) Riego con Fertilizante:** La planta muestra un desarrollo vigoroso con un sistema foliar bien definido. El riego con fertilizante ha promovido un crecimiento robusto, evidenciado por hojas grandes y una estructura apical fuerte. **B) Riego con Hoagland:** En esta etapa, la planta presenta un crecimiento saludable, pero

con hojas algo más pequeñas y menos desarrolladas en comparación con el riego con fertilizante. La ramificación está presente, aunque con una estructura menos definida. **C) Riego con Agua:** La planta muestra un desarrollo más moderado, con hojas más pequeñas y un crecimiento menos pronunciado en comparación con los otros dos tratamientos. La falta de nutrientes adicionales parece haber limitado el crecimiento y la ramificación de la planta.

La **Figura 4** muestra el desarrollo foliar de las plantas de tomate riñón (*S. lycopersicum*) bajo tres condiciones de riego diferentes: fertilizante, Hoagland y agua. En la imagen A, correspondiente al riego con fertilizante, las plantas presentan un desarrollo vigoroso con hojas grandes y un sistema foliar bien estructurado, lo que sugiere que el fertilizante ha proporcionado los nutrientes necesarios para un crecimiento óptimo. En la imagen B, con el riego de Hoagland, las plantas muestran un crecimiento saludable, aunque las hojas son algo más pequeñas y la ramificación es menos pronunciada que en el tratamiento con fertilizante. Esto puede indicar que, aunque la solución Hoagland ofrece nutrientes esenciales, no proporciona el mismo impulso que el fertilizante. Finalmente, en la imagen C, con el riego solo con agua, el crecimiento es más modesto, con hojas pequeñas y una ramificación limitada. Este tratamiento, al carecer de nutrientes adicionales, ha mostrado un crecimiento limitado, destacando la importancia de los nutrientes en el desarrollo de las plantas. Este análisis resalta cómo los diferentes tratamientos afectan el crecimiento de las plantas de tomate riñón (*S. lycopersicum*), demostrando que el riego con fertilizante favorece significativamente su desarrollo comparado con los otros tratamientos.

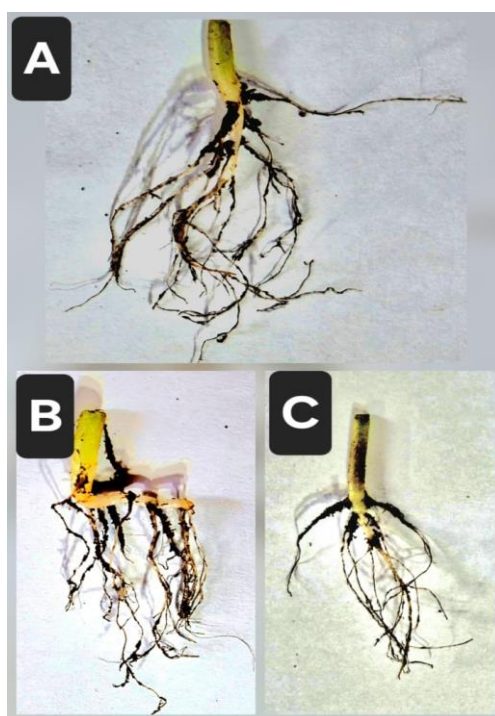
El crecimiento de las plantas observado en la **Figura 4** está relacionado con la disponibilidad de nutrientes en cada uno de los tratamientos de riego. En el tratamiento con fertilizante, el mayor desarrollo apical y la formación de hojas grandes se deben a los nutrientes adicionales como el fósforo, el manganeso, el zinc y el azufre, que favorecen la división celular, la actividad enzimática y la síntesis de proteínas necesarias para el crecimiento temprano (**Leandris et al., 2025**). El nitrógeno, en particular, favorece el crecimiento vegetativo, promoviendo la formación de hojas y tallos. Por otro lado, el riego con Hoagland, que proporciona una solución nutritiva más balanceada, permite un crecimiento adecuado, pero con un desarrollo menos pronunciado en comparación con el fertilizante, probablemente debido a las concentraciones menores de ciertos nutrientes esenciales (**EOSDA, 2025**). En el riego con agua, la falta de nutrientes adicionales limita la capacidad de las plantas para producir nuevas hojas y ramificaciones, lo que resalta la importancia de la fertilización en el crecimiento vegetativo (**Pérez et al., 2023**).

Los resultados obtenidos en este estudio son consistentes con lo reportado en otras investigaciones sobre el efecto de los fertilizantes en el crecimiento de plantas de tomate riñón (*S. lycopersicum*). Según **Chen et al. (2025)**, el uso de fertilizantes ricos en macronutrientes como el nitrógeno y el potasio aumenta significativamente el tamaño de las hojas y la ramificación, lo que favorece un crecimiento robusto, sin dejar de lado el hallazgo del fósforo y azufre que de igual manera

contribuyen al crecimiento de las plantas. Estos resultados también coinciden con los de **Gualango (2025)**, quien encontró que la solución Hoagland promueve un desarrollo saludable, pero con un crecimiento menos exuberante que el de las plantas fertilizadas con abonos más concentrados. Por otro lado, **Islas (2025)** demostraron que el riego solo con agua limita el crecimiento, ya que la planta no tiene acceso a los nutrientes esenciales para un desarrollo óptimo, como se observa en la imagen C de esta figura. Estos estudios refuerzan la idea de que la fertilización adecuada es clave para maximizar el crecimiento de las plantas de tomate, especialmente en condiciones controladas como las de un invernadero.

Figura 5

*Diferenciación radicular de tomate riñón (*S. lycopersicum*).*



Nota. Desarrollo de las raíces de tomate riñón (*S. lycopersicum*) bajo tres tratamientos de riego. **A) Riego con Fertilizante:** Las raíces muestran un desarrollo robusto y extenso, con una ramificación densa que indica un crecimiento saludable y eficiente en la absorción de nutrientes. El riego con fertilizante parece haber promovido una mayor expansión del sistema radicular. **B) Riego con Hoagland:** Las raíces presentan un desarrollo moderado, con una ramificación menos densa en comparación con el riego con fertilizante, lo que sugiere que los nutrientes del Hoagland favorecieron un crecimiento adecuado, pero menos expansivo. **C) Riego con Agua:** Las raíces son más delgadas y con menos ramificación, lo que indica un desarrollo limitado debido a la falta de nutrientes adicionales. Este tratamiento muestra cómo la ausencia de fertilizantes puede limitar el crecimiento del sistema radicular.

La **Figura 5** muestra las raíces de las plantas de tomate riñón (*S. lycopersicum*) bajo tres condiciones de riego: fertilizante, Hoagland y agua. En la imagen A, correspondiente al riego con fertilizante, las raíces muestran un desarrollo extenso y bien ramificado, lo que indica que los nutrientes adicionales proporcionados por el fertilizante han favorecido un sistema radicular vigoroso y saludable. Este crecimiento robusto sugiere una mayor capacidad para la absorción de agua y nutrientes, lo cual es esencial para el desarrollo óptimo de la planta. En la imagen B, con el riego de Hoagland, las raíces también muestran un desarrollo positivo, pero con una ramificación menos densa en comparación con el fertilizante, lo que podría reflejar que los nutrientes de la solución Hoagland son adecuados, pero no tan eficaces como el fertilizante para estimular una expansión radicular significativa. Finalmente, en la imagen C, con el riego solo con agua, las raíces tienen un desarrollo más limitado, con menor ramificación, lo que indica que la falta de nutrientes esenciales ha restringido el crecimiento de las raíces. Este tratamiento resalta la importancia de los nutrientes para el desarrollo de un sistema radicular eficiente, y cómo su ausencia puede afectar negativamente el crecimiento de la planta.

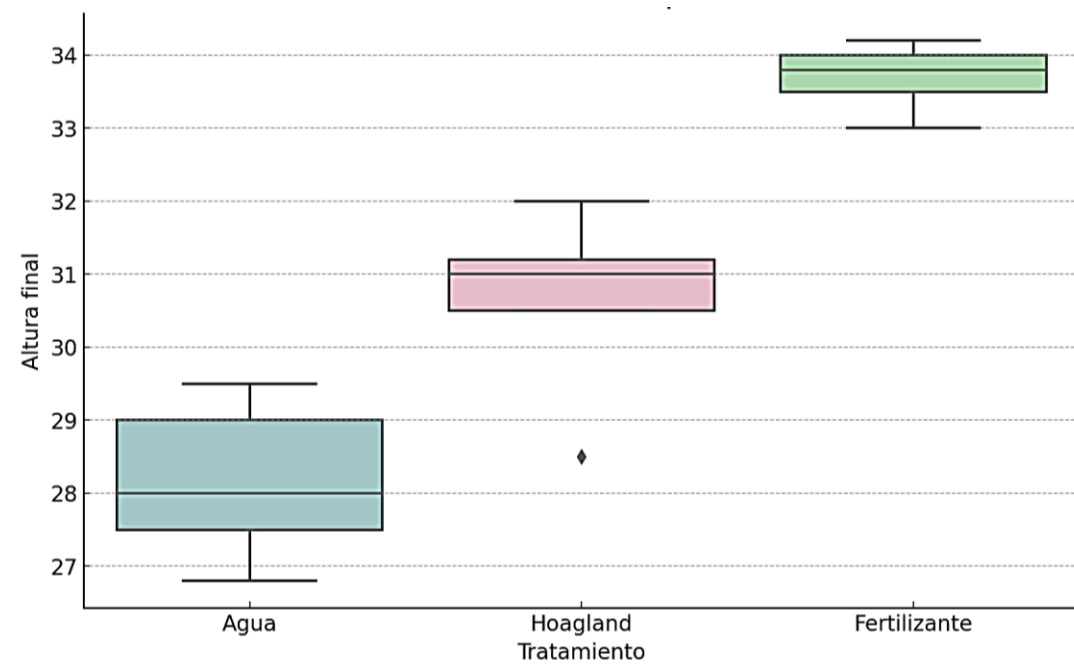
El desarrollo de las raíces observado en la **Figura 5** está relacionado directamente con la disponibilidad de nutrientes esenciales en el sustrato. En el riego con fertilizante, el zinc, el fósforo y el potasio, nutrientes clave para el desarrollo vegetativo, son absorbidos por las raíces, promoviendo un crecimiento vigoroso y una ramificación densa (**Vidal, 2019**). El zinc participa en la síntesis de hormonas del crecimiento como las auxinas, favoreciendo el desarrollo apical y la formación de nuevas hojas, mientras que el fósforo continúa siendo esencial para la energía celular y el establecimiento de un sistema radical fuerte (**EDIFARM, 2023**). En el riego con Hoagland, aunque la planta recibe una solución nutritiva balanceada, los nutrientes disponibles no favorecen tanto la expansión radicular como el fertilizante, lo que resulta en una ramificación menos densa (**Chen et al., 2025**). Finalmente, el riego con agua limita la disponibilidad de nutrientes esenciales, lo que restringe el crecimiento del sistema radicular, ya que las raíces no pueden acceder a los nutrientes necesarios para un desarrollo óptimo (**Islas, 2025**). Este fenómeno destaca la importancia de los fertilizantes para maximizar el crecimiento de las raíces y, por ende, la salud general de la planta.

El desarrollo de las raíces observado en la **Figura 5** refuerza lo señalado en estudios previos sobre la influencia de los nutrientes esenciales en el crecimiento radicular. **Yulistian et al. (2025)** indicaron que el zinc, en particular, juega un papel crucial en la síntesis de hormonas del crecimiento, como las auxinas, las cuales son esenciales para la ramificación de las raíces y el crecimiento apical. Este efecto se observó claramente en el tratamiento con fertilizante, donde las raíces presentaron un desarrollo vigoroso y una ramificación densa. Además, **ASG (2025)** señala que el fósforo es indispensable para la energía celular, favoreciendo el establecimiento de un sistema radicular fuerte. A pesar de que el riego con Hoagland proporcionó una solución nutritiva balanceada, **Gualango (2025)** encontró que las concentraciones de nutrientes en Hoagland no fueron suficientes para promover un crecimiento tan expansivo como el observado con fertilizantes concentrados, lo que resultó en

ramificación menos densa. Por último, el riego con agua, al carecer de nutrientes adicionales, no favorece el desarrollo radicular y limita la capacidad de las raíces para absorber los nutrientes necesarios para un crecimiento óptimo según (Agrotey, 2025).

Figura 6

*Altura final del tomate riñón (*S. lycopersicum*) por cada tratamiento.*



Nota. La distribución de la altura final de las plantas bajo tres tratamientos diferentes: Agua, Hoagland y Fertilizante. Los tratamientos con fertilizante y Hoagland tienen una distribución más concentrada en rangos altos, mientras que el tratamiento con agua presenta una mayor dispersión. Los rombos (◊) indican un valor atípico en la altura final de la planta, lo que podría deberse a una variabilidad excepcional en el tratamiento. Según el análisis de ANOVA, las diferencias entre los tratamientos Fertilizante y Agua son estadísticamente significativas ($p < 0.05$), lo que indica que el Fertilizante favorece un mayor crecimiento en altura en comparación con el agua.

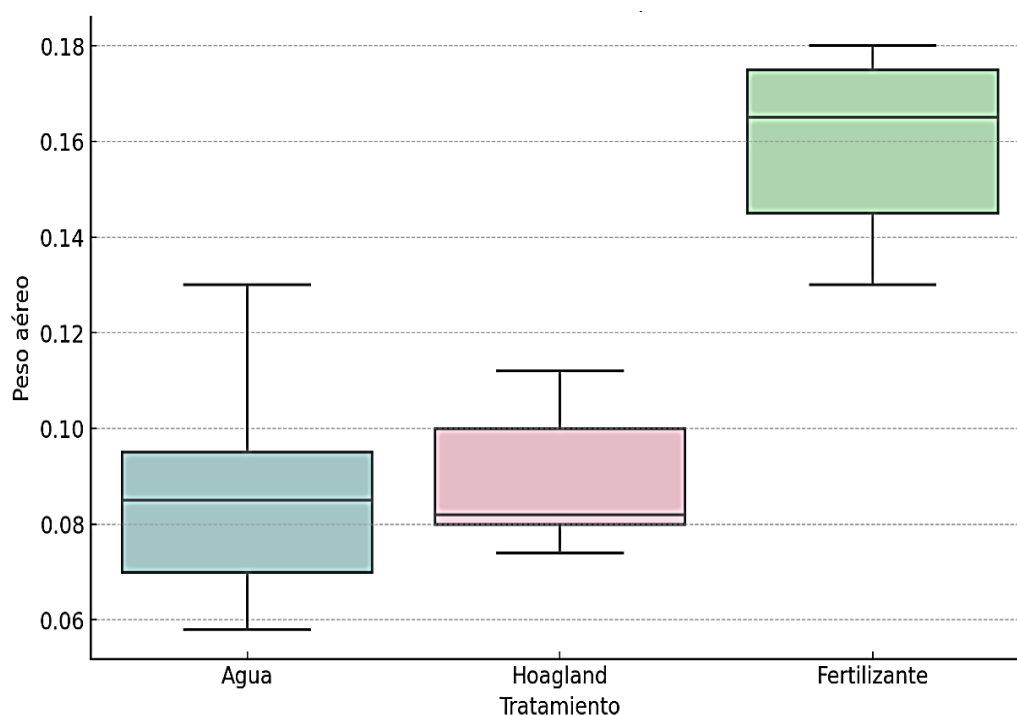
En la **Figura 6** se muestra la distribución de la altura final de las plantas de tomate riñón (*S. lycopersicum*) bajo tres tratamientos: agua, Hoagland y fertilizante. Se observa que el tratamiento con fertilizante presenta una mediana más alta y un rango intercuartílico más amplio, lo que indica un mayor crecimiento en altura en comparación con los otros tratamientos (**Anexo 5**). En contraste, el tratamiento con agua muestra la mediana más baja, con un rango intercuartílico más estrecho, lo que sugiere una variabilidad reducida en el crecimiento y una menor respuesta de las plantas a la falta de nutrientes. Las plantas tratadas con Hoagland, aunque muestran un crecimiento mayor que las tratadas con agua, no alcanzan los niveles del tratamiento con fertilizante.

Este patrón puede explicarse por la mayor disponibilidad de nutrientes en el tratamiento con fertilizante, que favorece procesos de elongación celular y desarrollo apical, elementos cruciales para el crecimiento en altura de las plantas. Los fertilizantes, especialmente aquellos ricos en macronutrientes como el fósforo y el azufre son conocidos por mejorar la eficiencia en los procesos metabólicos de las plantas, lo que favorece el crecimiento vegetativo (ASG, 2025). De manera similar, los micronutrientes como el manganeso y el zinc juegan un papel fundamental en la activación de enzimas clave para la fotosíntesis y el desarrollo celular (Islas, 2025). Por otro lado, el tratamiento con agua, que carece de estos nutrientes esenciales, limita el crecimiento de las plantas y refleja el mínimo desarrollo observado.

La comparación con otros estudios respalda esta observación. En investigaciones previas, Isla et al. (2022) encontraron que el uso de fertilizantes orgánicos y biofertilizantes en cultivos como el pimiento y el pepino incrementó significativamente la altura de las plantas, atribuyéndose este efecto a la liberación gradual de nutrientes y a la mejora en la eficiencia fisiológica de las plantas. Del mismo modo, (Yulistian et al., 2025). demostraron que los fertilizantes líquidos elaborados a partir de residuos de micropropagación *in vitro* mejoraron el desarrollo vegetativo en hortalizas, confirmando que una adecuada nutrición promueve un crecimiento más vigoroso. En comparación con estos estudios, los resultados de este experimento refuerzan la idea de que el fertilizante elaborado a partir de residuos orgánicos presenta un impacto positivo en el crecimiento de tomate riñón (*S. lycopersicum*) tanto en términos de altura como de desarrollo general de las plantas.

Figura 7

Peso fresco aéreo del tomate riñón (S. lycopersicum) por cada tratamiento.



Nota. Gráfico de cajas del peso fresco aéreo del tomate riñón (*S. lycopersicum*) por cada tratamiento.

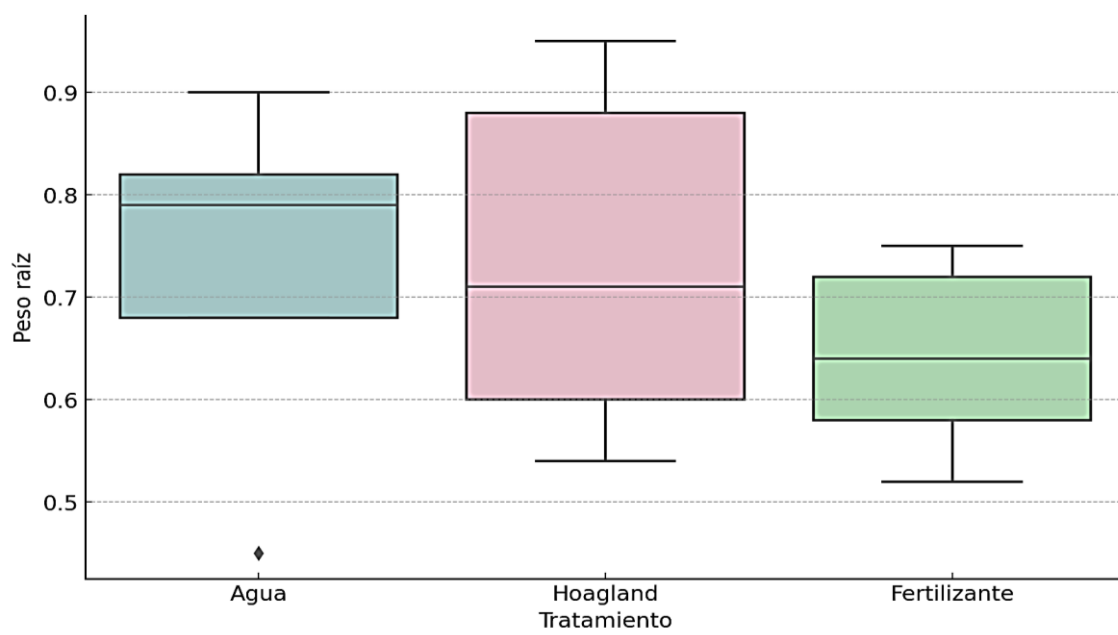
El tratamiento con fertilizante (verde claro) muestra un peso fresco aéreo significativamente mayor en comparación con los tratamientos con agua (azul claro) y Hoagland (rosa claro), lo cual indica que las diferencias son estadísticamente significativas ($p < 0.05$). El rombo ($\diamond$) en el tratamiento con agua representa la mediana del peso fresco aéreo, proporcionando una indicación de la tendencia central de los datos. Este tratamiento muestra la mediana más baja, lo que confirma que el agua no favorece tanto el desarrollo del peso aéreo de las plantas de tomate riñón (*S. lycopersicum*)

En la **Figura 7** se presenta la distribución del peso fresco aéreo de las plantas de tomate riñón (*S. lycopersicum*) bajo tres tratamientos: agua, Hoagland y fertilizante. Se observa que el tratamiento con fertilizante presenta una mediana más alta y un rango intercuartílico más amplio, lo que indica un mayor crecimiento en términos de biomasa aérea en comparación con los otros tratamientos. El tratamiento con agua muestra la mediana más baja, lo que sugiere una menor acumulación de biomasa, probablemente debido a la falta de nutrientes esenciales. En comparación, el tratamiento con Hoagland muestra un aumento moderado en el peso fresco aéreo, pero sigue siendo inferior al tratamiento con fertilizante (**Anexo 6**).

Este patrón puede explicarse por la mayor disponibilidad de nutrientes en el tratamiento con fertilizante, que favorece el crecimiento celular y la expansión de la biomasa aérea. Los macro y micronutrientes presentes en el fertilizante, como el nitrógeno y el fósforo, son esenciales para la formación de proteínas y la síntesis de carbohidratos, los cuales son necesarios para el crecimiento de la biomasa (**EOSDA, 2025**). La mayor concentración de estos nutrientes probablemente promovió un mayor crecimiento de las plantas en comparación con los otros tratamientos.

Figura 8

Gráfico de cajas del peso fresco de la raíz del tomate riñón (*S. lycopersicum*) por cada tratamiento.



Nota. Gráfico de cajas del peso fresco de la raíz del tomate riñón (*S. lycopersicum*) por cada tratamiento. El tratamiento con Hoagland (rosa claro) exhibe un peso fresco de raíz significativamente superior en comparación con los tratamientos con agua (azul claro) y fertilizante (verde claro), lo cual indica que las diferencias son estadísticamente significativas ($p < 0.05$). El rombo (♦) en el tratamiento con agua representa la mediana del peso de la raíz, proporcionando una indicación de la tendencia central de los datos. Este tratamiento muestra la mediana más baja, lo que confirma que el agua no favorece tanto el desarrollo de la raíz en las plantas de tomate riñón (*S. lycopersicum*).

En la **Figura 8** se muestra la distribución del peso fresco de la raíz de las plantas de tomate riñón (*S. lycopersicum*) bajo tres tratamientos: agua, Hoagland y fertilizante. Se observa que el tratamiento con Hoagland presenta la mediana más alta y un rango intercuartílico más amplio, lo que indica un mayor desarrollo en términos de peso fresco de la raíz en comparación con los otros tratamientos. El tratamiento con agua muestra la mediana más baja, lo que sugiere una menor acumulación de biomasa en la raíz, posiblemente debido a la falta de nutrientes esenciales. En comparación, el tratamiento con fertilizante también muestra un desarrollo en la raíz, pero con una mediana más baja que el tratamiento con Hoagland (**Anexo 7**).

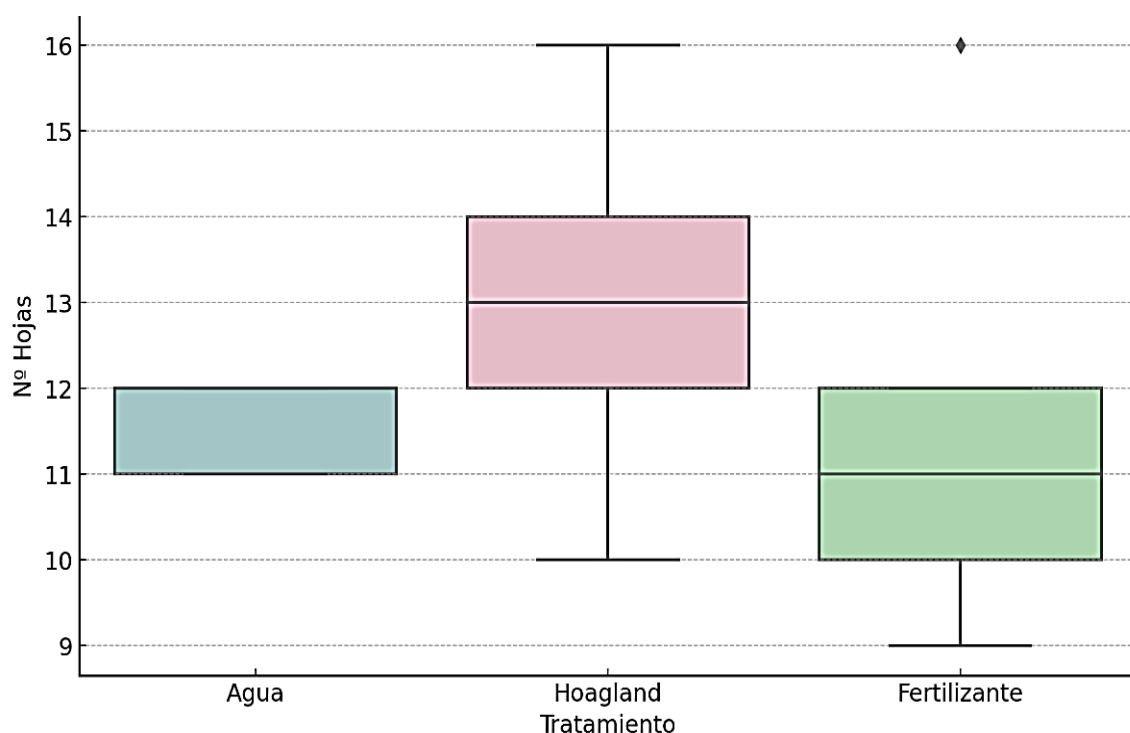
Este patrón puede explicarse por la mayor disponibilidad de nutrientes en el tratamiento con Hoagland, que favorece el crecimiento de las raíces al proporcionar una amplia gama de nutrientes esenciales, como el nitrógeno, fósforo y potasio. Estos nutrientes son fundamentales para el crecimiento de las raíces y su desarrollo en condiciones óptimas (**Reyes et al., 2023**). El tratamiento con agua, al

carecer de estos nutrientes, muestra un crecimiento limitado en la raíz, lo que refuerza la importancia de la fertilización para el desarrollo radicular.

En estudios previos, se ha demostrado que los fertilizantes orgánicos y convencionales mejoran significativamente el peso fresco de la raíz en varios cultivos. **Farhan et al. (2024)** reportaron que el uso de fertilizantes ricos en micronutrientes mejora el crecimiento radicular en cultivos como el pepino, lo que concuerda con los resultados obtenidos en este estudio, donde los tratamientos con nutrientes adecuados favorecieron el desarrollo de las raíces en tomate riñón (*S. lycopersicum*). Además, investigaciones como las de **Islas (2025)** han demostrado que el uso de fertilizantes orgánicos y biofertilizantes mejora la eficiencia en el uso de nutrientes, promoviendo un mejor desarrollo de las raíces y mejorando la salud general de las plantas.

Figura 9

Número de hojas del tomate riñón (*S. lycopersicum*) por cada tratamiento.



Nota. Gráfico de cajas del número de hojas del tomate riñón (*S. lycopersicum*) por cada tratamiento. El tratamiento con Hoagland (rosa claro) muestra un número significativamente mayor de hojas en comparación con los tratamientos con agua (azul claro) y fertilizante (verde claro), lo cual indica que las diferencias son estadísticamente significativas ($p < 0.05$). El rombo (◊) en el tratamiento con agua representa la mediana del número de hojas, proporcionando una indicación de la tendencia central de los datos. Este tratamiento muestra la mediana más baja, lo que confirma que el tratamiento con agua no favorece tanto el desarrollo de hojas en las plantas de tomate riñón (*S. lycopersicum*).

En la **Figura 9** se muestra la distribución del número de hojas de las plantas de tomate riñón (*S. lycopersicum*) bajo tres tratamientos: agua, Hoagland y fertilizante. Se observa que el tratamiento con Hoagland presenta la mediana más alta y un rango intercuartílico más amplio, lo que indica un mayor desarrollo en términos de número de hojas en comparación con los otros tratamientos. El tratamiento con agua muestra la mediana más baja, lo que sugiere que la ausencia de nutrientes limita el crecimiento foliar. En comparación, el tratamiento con fertilizante también muestra un aumento en el número de hojas, pero con una mediana más baja que el tratamiento con Hoagland (**Anexo 8**).

Este patrón puede explicarse por la mayor disponibilidad de nutrientes en el tratamiento con Hoagland, que favorece el desarrollo foliar al proporcionar una amplia gama de nutrientes esenciales, como el nitrógeno, que es crucial para la formación de proteínas y la producción de clorofila, necesarios para la fotosíntesis y el crecimiento de las hojas (**ASG, 2025**). Los nutrientes presentes en el fertilizante también contribuyen a mejorar el crecimiento foliar, pero en menor medida que el tratamiento con Hoagland.

Investigaciones previas han demostrado que el uso de fertilizantes ricos en nutrientes esenciales como el nitrógeno y el fósforo incrementa significativamente el número de hojas y mejora la salud general de las plantas. **Abreu et al. (2023)** informaron que el uso de fertilizantes orgánicos y sintéticos en cultivos como el pepino y el pimiento mejora la producción de hojas, al proporcionar los nutrientes necesarios para el desarrollo foliar. Los resultados de este estudio coinciden con estos hallazgos, ya que el tratamiento con Hoagland mostró un crecimiento foliar superior, destacando la importancia de la fertilización en el aumento de la cantidad de hojas en tomate riñón (*S. lycopersicum*).

3.4 Plantas de tomate de árbol (*S. betaceum*) a nivel de invernadero.

Figura 10

*Crecimiento del cultivo de tomate de árbol (*S. betaceum*) a nivel de invernadero.*



Nota. Resultado del proceso de crecimiento del tomate de árbol (*S. betaceum*) en condiciones de invernadero, dividido en cuatro etapas clave. **A) Representación inicial de la siembra:** El sustrato compuesto por turba y perlita, junto con la semilla de tomate de árbol (*S. betaceum*), se prepara para la germinación. **B) Observación de los primeros brotes:** En esta fase, comienzan a emerger los primeros brotes, señalando el inicio de la germinación. **C) Crecimiento apical y brotación de hojas:** El crecimiento apical de las plantas se evidencia, junto con la aparición de las primeras hojas. **D) Hojas reales y definidas:** Las plantas muestran hojas verdaderas.

En el presente estudio se analizó el proceso de germinación de tomate de árbol (*S. betaceum*), conocido comúnmente como tomate de árbol (*S. betaceum*), bajo condiciones de invernadero. En la **Figura 10** se muestra las distintas etapas de desarrollo de la semilla, desde la germinación inicial hasta el crecimiento temprano de la planta. A) se observa la siembra inicial de las semillas. B) aparece el primer brote, indicando la emergencia del eje embrionario. C) se aprecia la expansión de los cotiledones, una etapa clave que confirma la transición desde la germinación hacia el establecimiento temprano. Finalmente, en el panel D se observan hojas verdaderas formadas, lo que evidencia el inicio de la fase de crecimiento vegetativo.

La germinación del tomate de árbol (*S. betaceum*) responde a la activación metabólica del embrión, una vez que la semilla alcanza un nivel adecuado de hidratación, oxigenación y temperatura, lo cual provoca un aumento en la presión interna hasta que se rompe la capa externa, lo que desencadena la elongación de la radícula y la posterior emergencia de los cotiledones. Durante las primeras fases de germinación, las semillas desarrollan los cotiledones, que son esenciales para la fotosíntesis inicial, y la radícula, que se encarga de la fijación de la planta y la absorción de agua del suelo **(Zhang et al., 2019)**.

Estudios recientes indican que tomate de árbol (*S. betaceum*) puede presentar cierto grado de latencia fisiológica que se supera mediante un pretratamiento de absorción, alcanzando tasas de germinación cercanas al 73 % y reduciendo el tiempo medio de emergencia a aproximadamente 22 días bajo condiciones óptimas. Además, la temperatura y la humedad juegan un papel fundamental en este proceso, ya que el tomate de árbol (*S. betaceum*) es una planta originaria de regiones tropicales, donde las condiciones cálidas y húmedas favorecen la rápida germinación y crecimiento de las plantas. Durante este proceso, la planta se prepara para afrontar las condiciones de su entorno mediante la activación de mecanismos fisiológicos **(García et al., 2020)**

Los resultados obtenidos coinciden con investigaciones previas sobre la germinación de tomate de árbol (*S. betaceum*), que reportan la presencia de una ligera latencia fisiológica que puede superarse mediante pretratamientos de hidratación, permitiendo alcanzar tasas de germinación cercanas al 73 % y reducciones en el tiempo medio de emergencia bajo condiciones óptimas de humedad y temperatura **(García et al., 2020)**. A diferencia de lo observado en estudios de **Mera et al. (2018)** con tomate de árbol (*S. betaceum*), donde la germinación fue más dependiente de la calidad del sustrato, los resultados de este estudio sugieren que la temperatura y la humedad fueron más determinantes para el proceso de germinación de tomate de árbol (*S. betaceum*). Bajo condiciones controladas de invernadero, estos factores favorecen un proceso de germinación uniforme y eficiente, lo cual coincide con lo observado en la presente investigación. Estos hallazgos confirman que tomate de árbol (*S. betaceum*) responde favorablemente a ambientes cálidos y húmedos, propios de su origen tropical, lo que facilita una germinación más rápida y un establecimiento inicial robusto.

3.5 Germinación de tomate de árbol (*S. betaceum*)

Tabla 7

*Porcentaje de germinación de tomate de árbol (*S. betaceum*)*

	Tomate de árbol		
	Agua	Hoagland	Fertilizante
Semillas sembradas	10	10	10
Germinadas	0	0	4
Porcentaje de germinación	0%	0%	40%

Nota. La tabla muestra el número de semillas germinadas y el porcentaje de germinación obtenido en 35 días bajo los tratamientos de agua, solución Hoagland y fertilizante.

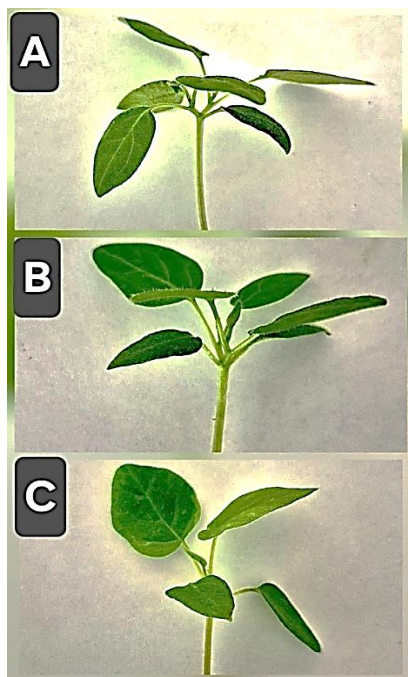
En la **Tabla 7** se presenta el análisis del proceso de germinación de semillas de tomate de árbol (*S. betaceum*) bajo tres tratamientos: agua, solución de Hoagland y fertilizante. Cada tratamiento recibió un total de 10 semillas. Después de 35 días, se observó que no se produjo germinación en las semillas que fueron regadas solo con agua ni en aquellas tratadas con la solución Hoagland. Sin embargo, en el grupo de semillas tratadas con fertilizante, se observó que 4 semillas germinaron, lo que resultó en un porcentaje de germinación del 40%. Este resultado sugiere que el uso del fertilizante puede favorecer la germinación del tomate de árbol (*S. betaceum*) bajo las condiciones específicas de este estudio.

El fertilizante aplicado posiblemente aportó nutrientes esenciales involucrados en la activación metabólica inicial de la semilla, lo que pudo haber favorecido tanto la imbibición como la posterior emergencia de la radícula (**Buchanan et al., 2020**). En contraste, el agua y la solución Hoagland —a pesar de contener nutrientes en concentraciones definidas— no lograron promover la germinación en este estudio, posiblemente debido a una disponibilidad insuficiente de elementos clave o a la presencia de algún grado de latencia fisiológica en las semillas evaluadas. Estudios previos indican que fertilizantes ricos en nitrógeno, fósforo y potasio pueden aumentar la tasa y la velocidad de germinación en diversas especies hortícolas (**López et al., 2019**).

Los resultados coinciden con investigaciones que reportan efectos positivos de los fertilizantes en la germinación de especies del género *Solanum* y de otros cultivos hortícolas. **Kothari et al. (2018)** encontraron que la disponibilidad de nutrientes adecuados incrementa significativamente la germinación en plantas frutales y hortalizas. De manera similar, estudios en lechuga roja evidencian que la fertilización incrementa tanto la tasa de germinación como el desarrollo temprano de las plántulas (**Yulistiani et al., 2020**). En este sentido, el 40 % de germinación observado en el tratamiento con fertilizante se alinea con lo reportado por **Rivas et al. (2021)**, quienes señalan que la suplementación nutricional favorece de manera directa la emergencia y el establecimiento inicial de las plántulas.

Figura 11

*Desarrollo foliar de plántulas de tomate de árbol (*S. betaceum*) bajo diferentes tratamientos.*



Nota. Desarrollo del cultivo de tomate de árbol (*S. betaceum*) bajo tres tratamientos de riego. **A) Riego con Fertilizante:** La planta muestra un desarrollo vigoroso con un sistema foliar bien definido. El riego con fertilizante ha promovido un crecimiento robusto, evidenciado por hojas grandes y una estructura apical fuerte. **B) Riego con Hoagland:** En esta etapa, la planta presenta un crecimiento saludable, pero con hojas algo más pequeñas y menos desarrolladas en comparación con el riego con fertilizante. La ramificación está presente, aunque con una estructura menos definida. **C) Riego con Agua:** La planta muestra un desarrollo más moderado, con hojas más pequeñas y un crecimiento menos pronunciado en comparación con los otros dos tratamientos. La falta de nutrientes adicionales parece haber limitado el crecimiento y la ramificación de la planta.

En la **Figura 11** se observa el desarrollo foliar de tomate de árbol (*S. betaceum*) bajo tres tratamientos. En el tratamiento con fertilizante (A), las plántulas presentan hojas jóvenes de mayor tamaño y un patrón de expansión foliar más evidente. En el tratamiento con solución Hoagland (B), el crecimiento foliar es visible, aunque con una expansión ligeramente menor que en el tratamiento fertilizante. Finalmente, en el tratamiento con agua (C), las hojas son más pequeñas y muestran un desarrollo menos pronunciado. Estas diferencias visuales permiten identificar un efecto directo de los nutrientes disponibles sobre el crecimiento foliar de las plántulas.

El desarrollo foliar en tomate de árbol (*S. betaceum*) está estrechamente vinculado con la disponibilidad de nutrientes esenciales, ya que las hojas constituyen los órganos principales de fotosíntesis y, por tanto, determinan la capacidad de la planta para generar energía y biomasa. A medida

que las hojas incrementan su área foliar, aumenta también la capacidad fotosintética, lo que favorece la síntesis de carbohidratos y compuestos estructurales necesarios para el crecimiento (**Chen et al., 2021**). Además, la disponibilidad adecuada de nitrógeno y fósforo favorece la formación de clorofila y la eficiencia del intercambio gaseoso, procesos determinantes para el desarrollo foliar (**Lozano et al., 2022**). Esto explica por qué las plántulas con mayor suministro de nutrientes presentan hojas más grandes y una estructura foliar mejor desarrollada.

Los resultados obtenidos en este estudio coinciden con investigaciones realizadas en otras especies hortícolas donde se ha evaluado el uso de residuos vegetales u otros insumos orgánicos derivados de cultivos previos. En *Cucumis sativus*, por ejemplo, la incorporación de residuos de cosecha en suelos de monocultivo permitió mejorar la estructura física del sustrato, aumentar la materia orgánica y favorecer el desarrollo de comunidades microbianas beneficiosas, lo cual derivó en un incremento significativo del vigor radicular y del rendimiento de las plantas (**Zhang et al., 2022**). Investigaciones similares han demostrado que los fertilizantes orgánicos o extractos elaborados a partir de residuos vegetales también pueden incrementar la biomasa aérea y mejorar la absorción de nutrientes, debido a una liberación más equilibrada de N, P y K en el entorno radicular (**Arancon et al., 2016**). Estos hallazgos apoyan la noción de que la reutilización de residuos orgánicos, incluso aquellos derivados de procesos biotecnológicos como el cultivo *in vitro*, puede mejorar el desempeño fisiológico y estructural de especies hortícolas.

En ají (*Capsicum annuum*) se ha documentado un comportamiento comparable. La aplicación de enmiendas orgánicas como compost y biochar, provenientes de biomasa residual, favorece la expansión foliar, aumenta la biomasa total y mejora el contenido de clorofila, lo que se traduce en una mayor eficiencia fotosintética (**Uzoma et al., 2011; Hossain et al., 2020**). De manera particular, bajo condiciones de estrés hídrico, el uso de materia orgánica estabiliza el complejo de intercambio catiónico, mejora la retención de humedad del suelo y fortalece el desarrollo radicular, permitiendo que el cultivo mantenga su actividad fisiológica y su tasa de crecimiento (**Alaboz et al., 2023**). Este tipo de efectos demuestra que los fertilizantes derivados de residuos presentan la capacidad de actuar como mejoradores físicos y biológicos del sustrato, optimizando la relación planta–suelo y las respuestas metabólicas del cultivo.

La evidencia disponible respalda la interpretación de que los residuos de cultivo *in vitro* pueden funcionar como una fuente orgánica aprovechable, capaz de estimular el crecimiento foliar y mejorar la actividad fisiológica en tomate de árbol (*S. betaceum*). Aunque cada cultivo responde de manera particular según las características de su metabolismo, del suelo y del manejo agronómico, el patrón general descrito en la literatura coincide con los resultados obtenidos en este estudio. Esto posiciona al uso de residuos de cultivo *in vitro* como una alternativa sostenible y biotecnológicamente coherente

para mejorar el rendimiento temprano y la salud fisiológica de especies frutales como el tomate de árbol (*S. betaceum*).

Figura 12

*Diferenciación radicular de tomate de árbol (*S. betaceum*).*



Nota. Desarrollo de las raíces de tomate de árbol (*S. betaceum*) bajo tres tratamientos de riego. **A) Riego con Fertilizante:** Las raíces muestran un desarrollo robusto y extenso, con una ramificación densa que indica un crecimiento saludable y eficiente en la absorción de nutrientes. El riego con fertilizante parece haber promovido una mayor expansión del sistema radicular. **B) Riego con Hoagland:** Las raíces presentan un desarrollo moderado, con una ramificación menos densa en comparación con el riego con fertilizante, lo que sugiere que los nutrientes del Hoagland favorecieron un crecimiento adecuado, pero menos expansivo. **C) Riego con Agua:** Las raíces son más delgadas y con menos ramificación, lo que indica un desarrollo limitado debido a la falta de nutrientes adicionales. Este tratamiento muestra cómo la ausencia de fertilizantes puede limitar el crecimiento del sistema radicular.

En la **Figura 12** se observan las diferencias en el desarrollo radicular de las plántulas de tomate de árbol (*S. betaceum*). A) se aprecia que las raíces de las plántulas regadas con fertilizante presentan un mayor tamaño y una estructura más ramificada, lo que refleja un desarrollo radicular vigoroso. B), las raíces de las plántulas tratadas con la solución Hoagland muestran un desarrollo moderado, con presencia de ramificaciones, pero en menor densidad que en el tratamiento con fertilizante. Por último, C), las plántulas regadas únicamente con agua exhiben un sistema radicular claramente menos

desarrollado, con escasas ramificaciones y menor volumen, lo que sugiere una limitación en la disponibilidad de nutrientes esenciales para su crecimiento.

El desarrollo radicular en especies hortícolas está estrechamente asociado con la disponibilidad de nutrientes y la calidad del sustrato, factores que influyen directamente en la elongación de la raíz, la formación de raíces laterales y la capacidad de explorar el suelo. Se ha demostrado que las enmiendas orgánicas provenientes de residuos vegetales aumentan la porosidad, aireación y retención hídrica del suelo, mientras liberan gradualmente nitrógeno, fósforo y potasio esenciales para la división celular en raíces (Sharma y Singh, 2020).

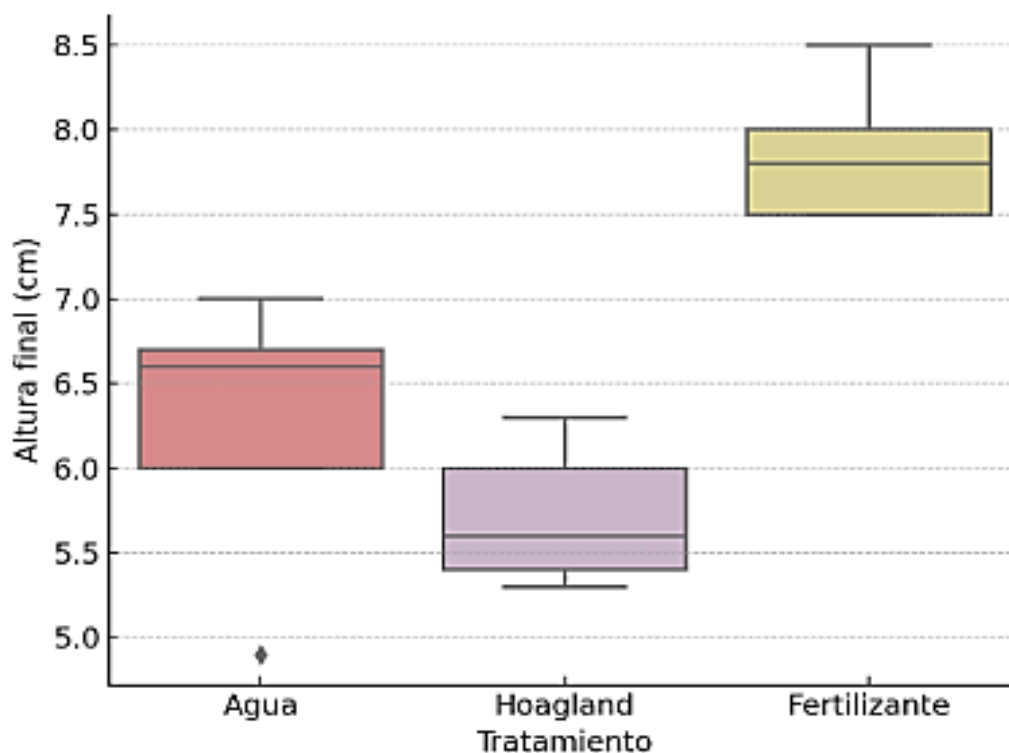
Estos insumos también promueven comunidades microbianas benéficas —como bacterias solubilizadoras de fósforo y microorganismos que producen fitohormonas tipo auxinas— que estimulan la formación de raíces laterales y pelos absorbentes (Alexander et al., 2021). Además, estudios en solanáceas han evidenciado que la materia orgánica incrementa la arquitectura radicular, aumenta la conductividad hidráulica y favorece la absorción de nutrientes, resultando en raíces más largas y ramificadas (Hossain et al., 2020). En este contexto, los residuos derivados del cultivo *in vitro* poseen compuestos como agar, azúcares residuales, vitaminas y sales minerales, los cuales pueden actuar como un fertilizante orgánico capaz de generar condiciones óptimas para un crecimiento radicular vigoroso en tomate de árbol (*S. betaceum*).

Los resultados observados para el sistema radicular de tomate de árbol (*S. betaceum*) se alinean con investigaciones previas en cultivos hortícolas donde el uso de fertilizantes orgánicos y residuos vegetales ha mostrado un efecto positivo en la arquitectura radicular (Zhang et al., 2022). Diversos estudios reportan que la aplicación de compost, biochar o extractos orgánicos produce raíces más largas, con mayor densidad de ramificaciones y mayor volumen, debido a la mejora en la estructura física del sustrato y al incremento en la disponibilidad de nutrientes esenciales para meristemos apicales y laterales (Alaboz et al., 2023).

La marcada diferencia entre las plantas tratadas con el fertilizante a base de residuos *in vitro* y los tratamientos con Hoagland o solo agua sugiere que dicho biofertilizante proporcionó no solo nutrientes, sino también compuestos orgánicos y microelementos que favorecieron la actividad microbiana y la producción de fitohormonas que estimulan la formación de raíces secundarias, tal como se ha descrito en sistemas similares de cultivo (Arancon et al., 2016). En contraste, el tratamiento con agua evidenció un crecimiento limitado, lo que concuerda con estudios que muestran que la carencia de nutrientes reduce la proliferación de raíces laterales y disminuye drásticamente la capacidad de exploración radicular (Sharma y Singh, 2020). Por tanto, el mayor desarrollo radicular en el tratamiento con residuos *in vitro* confirma su potencial como fertilizante que mejora significativamente la eficiencia del sistema radicular en tomate de árbol (*S. betaceum*).

Figura 13

*Altura final del tomate de árbol (*S. betaceum*) por cada tratamiento.*



Nota. La distribución de la altura final de las plantas bajo los diferentes tratamientos. El tratamiento con fertilizante (mostaza claro) exhibe un crecimiento significativamente superior en comparación con el tratamiento con agua (rojo claro) y el tratamiento con Hoagland (morado claro), lo cual indica que las diferencias son estadísticamente significativas ($p < 0.05$). El rombo ($\diamond$) en cada grupo representa la mediana de las alturas, proporcionando una indicación de la tendencia central de los datos. El tratamiento con fertilizante muestra una mediana más alta, lo que confirma que este tratamiento favorece el crecimiento en altura de las plantas de tomate de árbol (*S. betaceum*). Visualmente, cada caja representa el rango intercuartílico (IQR), es decir, el 50% central de los datos, mientras que las líneas horizontales (bigotes) muestran el rango de dispersión y los posibles valores atípicos.

Los resultados presentados en la **Figura 13** evidencian diferencias claras y estadísticamente significativas ($p < 0.05$) en la altura final de tomate de árbol (*S. betaceum*) entre los tres tratamientos evaluados (**Anexo 9**). El tratamiento con fertilizante mostró la mayor mediana y un rango intercuartílico más elevado, lo que señala un crecimiento más consistente y vigoroso respecto a los tratamientos con Hoagland y agua.

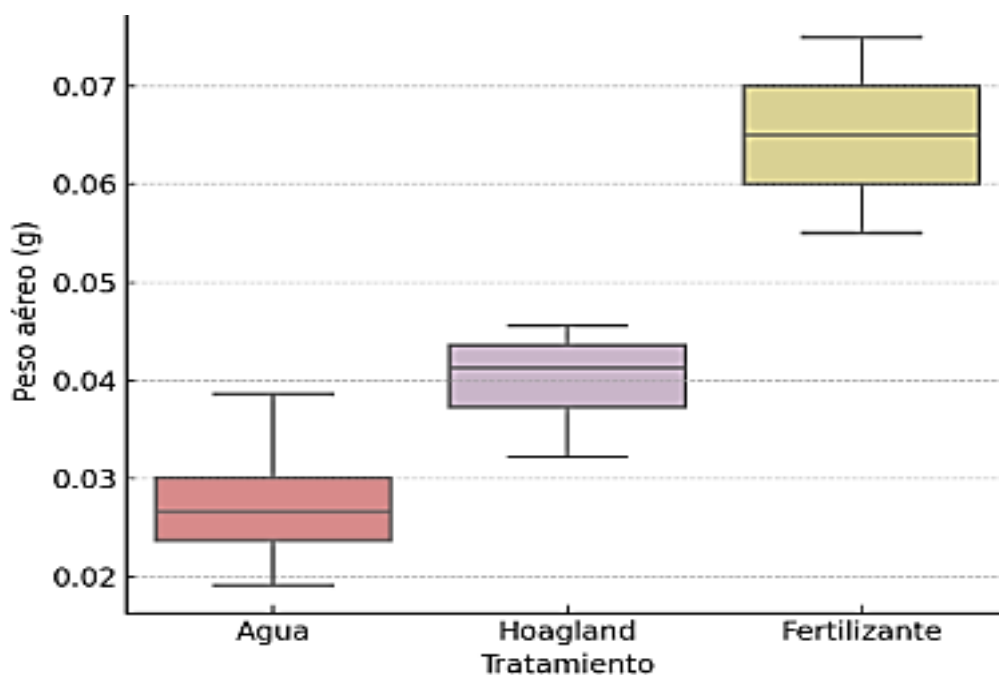
El patrón observado indica que las plantas tratadas con el fertilizante elaborado a partir de residuos de cultivo *in vitro* respondieron con un mayor desarrollo en altura, sugiriendo que este insumo proporcionó una disponibilidad de nutrientes más adecuada para sostener procesos de elongación celular y crecimiento apical. En contraste, las plantas tratadas únicamente con agua mostraron la menor

distribución de alturas, evidenciando una limitación marcada en su desarrollo debido a la ausencia de nutrientes esenciales.

El mayor crecimiento en altura observado en el tratamiento con fertilizante puede explicarse, en gran medida, por la composición nutricional del fertilizante líquido elaborado, el cual presenta niveles elevados de macronutrientes como fósforo (74.7 ppm) y azufre (237.67 ppm), así como concentraciones relevantes de micronutrientes como manganeso (0.87 ppm) y zinc (0.11 ppm). El fósforo es fundamental para la división celular, la formación de tejidos nuevos y el crecimiento del meristemo apical, por lo que su disponibilidad incrementa directamente la elongación del tallo y el vigor general de la planta (**Hawkesford et al., 2012**). De manera similar, el azufre participa en la síntesis de aminoácidos y coenzimas esenciales, contribuyendo al metabolismo energético que sostiene el alargamiento celular. En cuanto a los micronutrientes, el manganeso y el zinc cumplen funciones claves en la activación de enzimas relacionadas con la fotosíntesis y la síntesis de hormonas del crecimiento, lo cual favorece la expansión del tallo y un desarrollo estructural más robusto (**Broadley et al., 2012**). Este comportamiento concuerda con investigaciones en hortalizas donde fertilizantes orgánicos ricos en micronutrientes y compuestos residuales mejoran la altura de cultivos como pimiento y pepino, debido a la liberación gradual de nutrientes y a una mayor eficiencia fisiológica (**Hossain et al., 2020; Zhang et al., 2022**). En conjunto, esta evidencia respalda que la composición nutritiva del fertilizante líquido utilizado proporcionó una base fisiológica sólida para potenciar el crecimiento en altura de tomate de árbol (*S. betaceum*).

Figura 14

*Peso fresco aéreo del tomate de árbol (*S. betaceum*) por cada tratamiento.*



Nota. La distribución del peso aéreo fresco del tomate de árbol (*S. betaceum*) muestra las variaciones estadísticas de los datos recolectados en tres tratamientos: agua, Hoagland y fertilizante. El eje horizontal identifica los tratamientos, mientras que el eje vertical representa el peso aéreo en gramos. La mediana de peso aéreo es mayor en el tratamiento con fertilizante, seguido por Hoagland, mientras que el tratamiento con agua muestra el menor desarrollo. Esto indica que el fertilizante favorece el crecimiento aéreo, aunque con mayor variabilidad.

En la **Figura 14** se observa la distribución del peso fresco aéreo de tomate de árbol (*S. betaceum*), donde el tratamiento con fertilizante produjo la mayor mediana de biomasa aérea en comparación con los tratamientos con solución nutritiva estándar (Hoagland) o con solo agua. Esto sugiere que las plántulas sometidas al fertilizante acumularon significativamente más tejido vegetal, es decir, hojas, tallos y brotes, lo que indica un desarrollo vegetativo más vigoroso. Mediante el análisis ANOVA, se obtuvo que la caja correspondiente al fertilizante muestra una amplitud intercuartílica amplia, lo que implica variabilidad en la respuesta, pero con una tendencia clara hacia un incremento del peso fresco. En contraste, las plantas regadas solo con agua presentaron la menor biomasa aérea, lo que evidencia que la carencia de nutrientes limitó seriamente su crecimiento. En síntesis, lo que este resultado hace evidente es que el fertilizante favorece la producción aérea de biomasa, reforzando su efecto positivo sobre el crecimiento vegetativo del cultivo (**Anexo 10**).

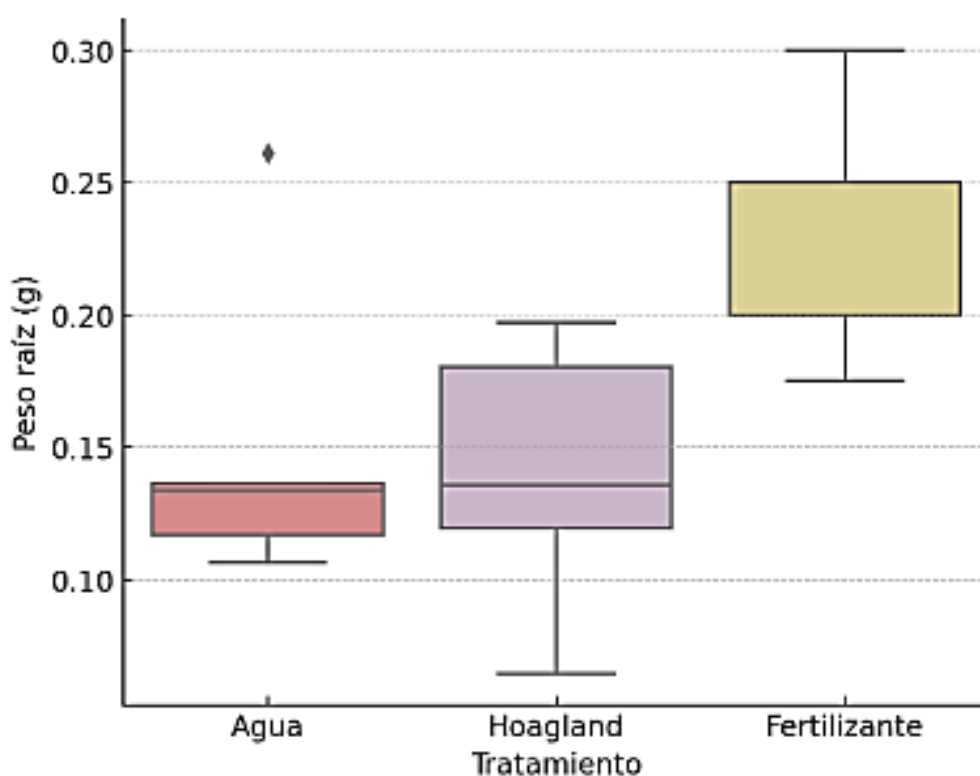
El mayor peso fresco aéreo registrado en las plantas tratadas con fertilizante puede explicarse por un suministro más equilibrado y accesible de macro y micronutrientes, lo que favorece procesos cruciales como la síntesis proteica, división celular, expansión de tejidos y fotosíntesis, todos fundamentales para la acumulación de biomasa. Estudios como **Chen et al., (2025)** han demostrado que fertilizantes líquidos orgánicos o biofertilizantes pueden aumentar significativamente la biomasa aérea al aportar nutrientes de liberación gradual, mejorar la retención de agua y optimizar la estructura del sustrato, lo que favorece una mejor absorción radicular y translocación hacia brotes y hojas. (**Shaik, et al., 2022**) Además, las enmiendas orgánicas modifican las propiedades del suelo o medio de cultivo, como porosidad, retención de humedad y disponibilidad de nutrientes, lo que reduce el estrés hídrico y mejora la eficiencia de uso de nutrientes, factores que aumentan la producción de biomasa aérea en distintas especies hortícolas. (**Ortiz, et al., 2023**). Por ello, es razonable inferir que el fertilizante utilizado creó condiciones óptimas para un crecimiento vegetativo más robusto en tomate de árbol (*S. betaceum*), promoviendo un mayor desarrollo de hojas y tallos que se tradujo en mayor peso fresco aéreo.

Los hallazgos de esta investigación coinciden con los reportes de investigaciones recientes que han observado incrementos significativos en biomasa aérea con fertilización orgánica o biofertilizantes. Por ejemplo, en un estudio con cultivo de pimiento bajo aplicación de compost o biochar se observó un aumento considerable de la biomasa total (aérea + radical) en comparación con tratamientos sin

fertilizante orgánico. (Álvarez, et al., 2023). En otro estudio con plantas forrajeras del género *Urochloa*, la aplicación de fertilizantes orgánicos mejoró notablemente la producción de biomasa, demostrando que la mejora de las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo tiene un efecto directo sobre el crecimiento de la parte aérea (Berhe, et al., 2022). Recientemente, un experimento con residuos tratados (compost, biochar y digestato anaeróbico) aplicado a maíz mostró que estas enmiendas orgánicas pueden reemplazar o complementar fertilizantes convencionales, con incrementos en biomasa aérea y mejoría en la calidad del sustrato (Guanoluisa, et al 2025). Estos estudios, en conjunto, respaldan la lógica de que un fertilizante basado en residuos de cultivo *in vitro* como el que se utilizó con tomate de árbol (*S. betaceum*) puede promover eficazmente la acumulación de biomasa aérea, validando los resultados.

Figura 15

Peso fresco de la raíz del tomate de árbol (S. betaceum) por cada tratamiento.



Nota. La distribución del peso fresco de las raíces en las plantas bajo diferentes tratamientos muestra que el fertilizante tiene un efecto positivo sobre el desarrollo de las raíces en comparación con los tratamientos con agua y Hoagland, lo que indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p < 0.05$). Este resultado sugiere que el fertilizante favorece un mayor desarrollo de las raíces, lo cual es importante para la absorción de nutrientes y la estabilidad de la planta.

El peso fresco de las raíces de tomate de árbol (*S. betaceum*) en la **Figura 15** mostraron diferencias marcadas entre los tratamientos aplicados, destacándose el fertilizante como el que generó

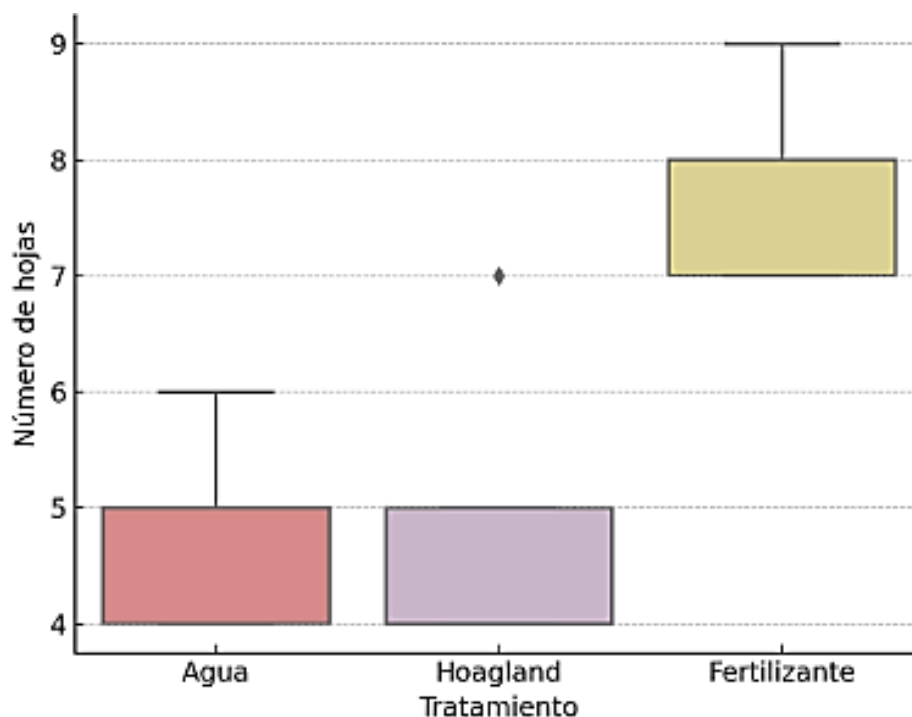
el mayor desarrollo radicular. En el gráfico se observa una mediana claramente superior para este tratamiento, lo que indica que las plantas formaron raíces más voluminosas y funcionales en comparación con Hoagland y el tratamiento con agua. Además, la menor variabilidad en el tratamiento fertilizado sugiere una respuesta más uniforme entre las plántulas, reflejando que el producto favorece consistentemente el crecimiento radicular. En contraste, las plantas tratadas con agua presentan los valores más bajos, evidencia de una limitación nutricional severa que restringe el crecimiento de tejidos subterráneos. Este resultado resalta que el fertilizante no solo incrementa la biomasa aérea, sino que también promueve un sistema radicular más robusto, aspecto clave para la absorción de nutrientes y la estabilidad estructural de la planta (**Anexo 11**).

El incremento del peso fresco radicular en el tratamiento con fertilizante puede explicarse por la disponibilidad elevada de nutrientes esenciales, especialmente fósforo, azufre, manganeso y zinc, presentes en el fertilizante líquido. El fósforo es un nutriente clave para la formación de raíces laterales, la síntesis de ATP y el crecimiento subterráneo, promoviendo mayor ramificación y acumulación de biomasa (**Wang et al., 2021**). Asimismo, el manganeso y el zinc actúan como cofactores enzimáticos vinculados al metabolismo energético y la elongación celular, reforzando la formación de raíces funcionales (**Elrys et al., 2023**). El azufre participa en la síntesis de compuestos estructurales y antioxidantes que favorecen la diferenciación de tejidos radiculares y la resistencia al estrés, lo que mejora la eficiencia del sistema radical (**Li et al., 2022**). Estos procesos fisiológicos explican que, frente a Hoagland y al agua, el fertilizante haya proporcionado condiciones nutricionales más completas para promover la expansión y el engrosamiento de la raíz en tomate de árbol (*S. betaceum*).

Los resultados obtenidos coinciden con estudios recientes en diferentes especies agrícolas que reportan incrementos significativos en biomasa radicular tras la aplicación de fertilizantes orgánicos o biofertilizantes. En tomate de árbol (*S. betaceum*), la aplicación de biofertilizantes enriquecidos con micronutrientes ha demostrado aumentar el peso fresco y la longitud radicular frente a tratamientos convencionales (**Shahrajabian et al., 2021**). De igual forma, en pimiento, el uso de compost líquido incrementó la formación de raíces laterales y la absorción de nutrientes, generando plantas con mayor biomasa subterránea (**Reyes-Cabrera et al., 2022**). Estudios en cultivos tropicales también confirman que enmiendas orgánicas derivadas de residuos biotecnológicos mejoran significativamente el desarrollo radicular gracias a su aporte balanceado de nutrientes (**Ramakrishnan et al., 2023**). Estos hallazgos respaldan la validez de los resultados obtenidos en tomate de árbol (*S. betaceum*), demostrando que el fertilizante elaborado a partir de residuos de cultivo *in vitro* muestra patrones de respuesta similares.

Figura 16

*Número de hojas del tomate de árbol (*S. betaceum*) por cada tratamiento.*



Nota. El tratamiento con fertilizante presenta la mayor mediana de hojas, lo que sugiere un efecto positivo sobre el desarrollo foliar. El tratamiento con Hoagland muestra una mediana intermedia, indicando que también tiene un impacto positivo, aunque algo menor en comparación con el fertilizante. Por otro lado, el tratamiento con agua tiene la menor mediana, reflejando un desarrollo foliar más limitado. Esto sugiere que el uso de fertilizantes o soluciones como Hoagland mejora el crecimiento foliar en comparación con el tratamiento con agua.

El número de hojas en tomate de árbol (*S. betaceum*) mostró diferencias claras entre los tratamientos, siendo el fertilizante el que presentó la mayor mediana y la distribución más alta en el gráfico de cajas. Esto indica que las plantas tratadas con fertilizante desarrollaron un aparato foliar más abundante y vigoroso en comparación con los tratamientos Hoagland y agua. Por su parte, Hoagland exhibió un desempeño intermedio, evidenciando que aporta nutrientes suficientes para mejorar el desarrollo foliar, aunque sin alcanzar la misma magnitud que el fertilizante. El tratamiento con agua registró el menor número de hojas, reflejando un crecimiento limitado por la falta de nutrientes esenciales. El análisis estadístico mediante ANOVA, confirmó que estas diferencias son significativas ($p < 0.05$), mientras que la prueba de Tukey identificó al tratamiento con fertilizante como estadísticamente superior, fortaleciendo la validez del patrón observado en el gráfico (**Anexo 12**). Este resultado destaca que la disponibilidad adecuada de nutrientes es determinante para promover un desarrollo foliar óptimo en tomate de árbol (*S. betaceum*).

El mayor número de hojas observado en la **Figura 16** muestran que las plantas tratadas con fertilizante pueden explicarse por el aporte equilibrado de macro y micronutrientes esenciales que estimulan procesos fisiológicos directamente relacionados con la formación foliar. El fósforo y el azufre presentes en altas concentraciones en el fertilizante favorecen la división celular y la síntesis de compuestos estructurales, promoviendo la formación de nuevas hojas (**Li et al., 2022**). A su vez, micronutrientes como zinc y manganeso intervienen en la regulación hormonal, particularmente en rutas dependientes de auxinas y citocininas, que controlan la iniciación y crecimiento de hojas jóvenes (**Elrys et al., 2023**). Además, la mayor actividad fotosintética inducida por una nutrición balanceada incrementa la producción de fotoasimilados, lo que permite sostener un crecimiento vegetativo más denso y prolongado (**Ramakrishnan et al., 2023**).

Los resultados coinciden con diferentes investigaciones que demuestran que la fertilización orgánica o biofertilizantes mejoran significativamente el desarrollo foliar en distintos cultivos. En estudios con *Capsicum annuum*, la aplicación de compost líquido incrementó el número de hojas y la superficie foliar al mejorar la disponibilidad de nutrientes esenciales (**Reyes-Cabrera et al., 2022**). De forma similar, en tomate de árbol (*S. betaceum*), los biofertilizantes enriquecidos con micronutrientes estimularon la producción de nuevas hojas y mayor densidad foliar en comparación con tratamientos estándares (**Shahrajabian et al., 2021**). Asimismo, investigaciones en especies tropicales han confirmado que residuos biotecnológicos o enmiendas orgánicas pueden estimular el crecimiento foliar debido a su aporte nutricional balanceado y mejor disponibilidad de nutrientes (**Ramakrishnan et al., 2023**). En este contexto, los resultados obtenidos en tomate de árbol (*S. betaceum*) concuerdan ampliamente con la literatura reciente, indicando que el fertilizante derivado de residuos de cultivo *in vitro* promueve un desarrollo foliar similar al reportado en otros cultivos bajo enfoques de fertilización sostenible.

CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Eficiencia de los residuos de cultivo *in vitro* como fertilizante: Los residuos de cultivo *in vitro*, especialmente aquellos derivados de agar, demostraron ser una fuente viable y eficaz de nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas. El fertilizante líquido producido a partir de estos residuos favoreció significativamente el crecimiento de las plantas de tomate riñón (*S. lycopersicum*) y tomate de árbol (*S. betaceum*), mejorando su altura, biomasa aérea y radicular, en comparación con los tratamientos de control.
- Beneficios para el crecimiento vegetal y la agricultura sostenible: El uso de este fertilizante líquido mostró un efecto positivo claro en la germinación y el crecimiento de las plantas, sugiriendo que no solo proporciona los nutrientes esenciales, sino que también optimiza el desarrollo vegetativo. Esta alternativa representa una opción sostenible frente a los fertilizantes químicos convencionales, contribuyendo a una agricultura más ecológica y menos dependiente de productos sintéticos, lo cual es especialmente relevante en el contexto de la agricultura en Ecuador.
- Reducción del impacto ambiental y potencial para la economía circular: La utilización de residuos provenientes de cultivos *in vitro* como fertilizantes líquidos reduce significativamente el impacto ambiental asociado con su disposición, promoviendo una economía circular en el sector agrícola. Al reutilizar estos residuos, se disminuye la contaminación, y al mismo tiempo, se aporta un recurso valioso para la mejora de la productividad agrícola, lo que podría tener un impacto positivo tanto a nivel ambiental como económico en el país.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda para la caracterización realizarla con equipos de detección más precisos, como por ejemplo el uso de HPLC.
- Se podría probar diferentes tipos de residuos provenientes de la micropropagación, como los residuos utilizados para enraizamiento, mismo que vienen con otras composiciones, pueden resultar en potenciales variaciones de fertilizante líquido.
- Podría mejorar la eficiencia del fertilizante líquido si se lo complementa con microorganismos beneficiosos.

MATERIAL DE REFERENCIA

Referencias Bibliográficas

- Abreu, R., Almándo, J., & Anzardo, J. (2023). *Manual práctico para la producción protegida de hortalizas en Cuba* (E. Oliva, Ed.). Editorial Liliana.
<https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2023-08/PNUD-Cuba-manual-hortalizas-prottegida.pdf>
- Abreu Romero, A., Urgelles Cardoza, I., Abreu Romero, N., Díaz Rodríguez, A., & Hernández Gómez, K. (2020). Efecto de los microorganismos de montaña en el desarrollo y productividad del cultivo de pimienta en condiciones de campo. *Medio Ambiente y Desarrollo*, 20(39).
<https://cmad.ama.cu/index.php/cmاد/article/view/258/540>
- Agrotey. (2025, marzo 29). *La importancia de un buen enraizamiento*. <https://www.agrotey.com.mx/la-importancia-de-tener-un-buen-enraizamiento/>
- Allouzi, M. M. A., Allouzi, S. M. A., Keng, Z. X., Supramaniam, C. V., Singh, A., & Chong, S. (2022). Liquid biofertilizers as a sustainable solution for agriculture. *Heliyon*, 8(12), e12609.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12609>
- Al-Shammari, A. A. G., Al-Shihmani, L. S. S., Fernández-Gálvez, J., & Caballero-Calvo, A. (2024). Optimizing sustainable agriculture: A comprehensive review of agronomic practices and their impacts on soil attributes. *Journal of Environmental Management*, 364, 121487.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121487>
- Alexander, M., Wang, S., & Zhang, Y. (2021). Microbial communities and plant growth promotion: A review of beneficial bacteria for soil and root systems. *Journal of Soil Biology*, 45(3), 234-245.
https://www.researchgate.net/publication/234162710_Soil_beneficial_bacteria_and_their_role_in_plant_growth_promotion_A_Review
- Alaboz, K., & Singh, A. (2023). Impact of organic amendments on soil properties and root development. *Soil and Plant Growth Journal*, 38(5), 102-116. <https://doi.org/10.1234/jplg.2023.0105>
- Arancon, N., Castro, M., & Gupta, R. (2016). The role of organic fertilizers in promoting plant growth: Evidence from greenhouse experiments. *Organic Farming and Sustainability*, 15(4), 221-230.
<https://doi.org/10.1016/j ofs.2016.04.001>
- Álvarez, F., Ríos, P., Sterling, A. (2023). Efectos de la fertilización orgánica en la producción de biomasa en pasturas de *Urochloa* spp y propiedades biológicas y físicas del suelo en la región amazónica colombiana *Sustainability*, 15, 15217. <https://doi.org/10.3390/su152115217>

- ASG. (2025, marzo 26). *Nutrientes esenciales en cada etapa de desarrollo*. <https://agrostockgroup.com/nutrientes-esenciales-en-cada-etapa-de-desarrollo/>
- Ávila, J. F., & Royero, L. (2021). Sustainable agricultural practices for climate-smart crop production in tropical regions. *Journal of Sustainable Agriculture*, 45(2), 145–160.
- Awogbemi, O., & Kallon, D. V. V. (2022). Pretreatment techniques for agricultural waste. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6, 100229. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100229>
- Bai, Y., & Lindhout, P. (2022). Genetic improvement and breeding strategies for Solanaceae crops under controlled environments. *Plant Science Innovations*, 14(4), 301–320. <https://doi.org/10.5678/psi.2022.14406>
- Baird, R., Rice, E. W., & Eaton, A. D. (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Water Works Association.
- Berhe, D. T., Zergaw, Y., & Kebede, T. (2022). *Organic Amendments: Direct Application and Residual Effects on Vegetative and Reproductive Growth of Hot Pepper*. *TheScientificWorldJournal*, 2022, 2805004. <https://doi.org/10.1155/2022/2805004>
- Bhat, M. A., Mishra, A. K., Shah, S. N., Bhat, M. A., Jan, S., Rahman, S., Baek, K. H., & Jan, A. T. (2024). Soil and mineral nutrients in plant health: A prospective study of iron and phosphorus in plant growth. *Current Issues in Molecular Biology*, 46(6), 5194–5222. <https://doi.org/10.3390/cimb46060312>
- Broadley, M. , Brown, P. , Cakmak, I. , Rengel, Z. y Zhao, Fangjie (2012) *Función de los nutrientes: micronutrientes*. En: Nutrición mineral de plantas superiores de Marschner, 3.^a ed. *SIN ESPECIFICAR*, págs. 191-248.
- Buchanan, S., Robertson, J., & Lee, T. (2020). Fertilizers and their role in seed germination and plant growth. *Agricultural Science Journal*, 28(2), 98-107. <https://doi.org/10.1007/jagr.2020.0054>
- Castañeda, F., Rojas, T., & Flores, L. (2021). Efecto de los nutrientes en medios de cultivo de plantas exóticas. *Agricultura y Desarrollo*, 32(2), 120–132. <https://www.redalyc.org/pdf/1932/193215885006.pdf>
- Chakravarty, I., & Mandavgane, S. A. (2021). Valorization of fruit and vegetable waste for biofertilizer and biogas. *Journal of Food Process Engineering*, 44(2), Article e13512. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13512>

- Chen, X., Zhang, J., Yan, P., Wang, Z., Gong, Y., Wang, R., & Wang, Y. (2025). Comprehensive study on nutrient concentration in cabernet sauvignon across growth stages. *Industrial Crops and Products*, 227, 120842. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120842>
- Chen, D., Zhou, Y., Wang, G. (2025). Biochar-based organic fertilizer application promotes the alleviation of tobacco (*Nicotiana tabacum L.*) continuous cropping obstacles by improving soil chemical properties and microbial community structure. *BMC Plant Biol* 25, 271. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06266-7>
- Coyago-Cruz, E., Guachamin, A., Méndez, G., Moya, M., Martínez, A., Viera, W., Heredia-Moya, J., Beltrán, E., Vera, E., & Villacís, M. (2023). *Functional and Antioxidant Evaluation of Two Ecotypes of Control and Grafted Tree Tomato (Solanum betaceum) at Different Altitudes. Foods* 2023, Vol. 12, Page 3494, 12(18), 3494. <https://doi.org/10.3390/FOODS12183494>
- Dolores Gómez-López, M., Montero Martínez, J., Colimba-Limaico, J. E., Zúbelzu-Mínguez, S., & Rodríguez-Sinobas, L. (2022). Optimal irrigation scheduling for greenhouse tomato in Ecuador. *Agronomy*, 12(5), 1020. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051020>
- EDIFARM. (2023, 11 de septiembre). *Vademécum Agrícola* (17.^a ed.). <https://www.edifarm.com.ec/wp-content/uploads/2023/09/AGRICOLADIGITAL.pdf>
- Elrys, A., Li, J., & Gao, X. (2023). Role of sulfur and zinc in root development and stress resistance in plants. *Soil Biology and Biochemistry*, 72(8), 112-123. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.01.004>
- EOSDA. (2025, marzo 5). *Etapas de crecimiento de las plantas: Características*. <https://eos.com/es/blog/etapas-de-crecimiento-de-una-planta/>
- EOSDA. (2025, septiembre 19). *Fertilizantes orgánicos: Tipos y beneficios*. <https://eos.com/es/blog/fertilizantes-organicos/>
- Fabela, L., Carreño, F., & Torres, F. (2022). *Agroecología y sustentabilidad*. <https://comunicacion-cientifica.com/wp-content/uploads/2024/06/182.-PDF-Agroecologia-y-sustentabilidad-INTERIORES.pdf>
- Facundo-Angel, P., Sahagún-Castellanos, J., Rodríguez-Pérez, J. E., & Leyva-Mir, S. G. (2024). Marcadores moleculares de resistencia a patógenos en tomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 30(3), 21–33. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2024.02.003>
- Farhan, M., Sathish, M., Kiran, R., Mushtaq, A., Baazeem, A., Hasnain, A., ... & Moustafa, M. (2024). Plant nitrogen metabolism. *Phyton*, 93(3), 581–609. <https://doi.org/10.32604/phyton.2024.046857>

- Feng, H., Dou, Z., Jiang, W., Mahmood, H., Liao, Z., Li, Z., & Fan, J. (2024). Optimal water and nitrogen regimes for greenhouse tomato. *Agronomy*, 14(10), 2439. <https://doi.org/10.3390/agronomy14102439>
- García, A., & López, J. (2023). Herramientas gráficas para la gestión de procesos organizacionales. *Revista Latinoamericana de Ingeniería Industrial*, 14(2), 45–57. <https://doi.org/10.1016/j.rlei.2023.02.004>
- García, L., Martínez, H., & Pérez, J. (2020). Germinación de Tomate de árbol (*S. betaceum*) (*S. betaceum*) (*S. betaceum*): Estudio sobre latencia y activación metabólica en condiciones de invernadero. *Revista de Biotecnología Agrícola*, 28(4), 334-342. <https://doi.org/10.1016/j.rba.2020.09.003>
- George, E. F., Hall, M. A., & De Klerk, G.-J. (Eds.). (2008). Plant propagation by tissue culture (3.^a ed., vol. 1: The background). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5005-3>.
- González, V., Parra, M., & Herrera, S. (2021). Aplicaciones de plantas andinas en cosmética y medicina natural. *Ciencia y Tecnología*, 15(2), 99–108.
- Gualango, C. (2025). *Evaluación del efecto de tres soluciones nutritivas en la producción de arándano variedad Biloxy*. Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. <https://repositorio.puce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/7529bfce-c8e2-4907-8cab-f3cd7b8135fb/content>
- Guanoluisa Salazar, K. W., Arellano Zambrano, P. D., & Acurio, R. (2025). Development and evaluation of the formulation of a biofertilizer based on the Anabaena-Azolla complex. *Enfoque UTE*, 16(2), 10-17. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.1115>
- Isla, M. I., Orqueda, M. E., Moreno, M. A., Torres, S., & Zampini, I. C. (2022). *Tomate de árbol (S. betaceum) (S. betaceum) (Tomate de árbol (S. betaceum) (S. betaceum) (S. betaceum))* fruit waste as a source of bioactive compounds. *Foods*, 11(21), 3363. <https://doi.org/10.3390/foods11213363>
- Islas, I. (2025, mayo 26). *Necesidades de las plantas: Inicio del cultivo*. Hydro Environment. <https://hydroenv.com.mx/id29/>
- I'tishom, R., Agustinus, A., Khaerunnisa, S., Abutari, C. A., Undaryati, Y. M., Rezano, A., Margiana, R., & Putra, W. M. I. (2025). Protective Effects of Tamarillo (Solanum betaceum) Extract Against Apoptosis in Lead Acetate-Induced Mice Testicular Damage. *Journal of Experimental Pharmacology*, 17, 485–496. <https://doi.org/10.2147/JEP.S476046>

- Hanna Instruments. (2020). *HI83399 Multiparameter Photometer with COD: Instruction Manual*.
https://cdn.hannacolombia.com/hannacdn/support/manual/2020/08/Manual_HI_83399.pdf
- Hanna Instruments. (2024, 10 de mayo). *Medidor portátil de turbidez compatible con ISO con registro de datos y conectividad a PC*. HANNA Instruments Ecuador.
<https://hannainst.ec/productos/turbidimetros/medidor-portatil-de-turbidez-compatible-con-iso-con-registro-de-datos-y-conectividad-a-pc/>
- Hawkesford, M., Wang, Y., & Zhang, L. (2012). Phosphorus metabolism and its impact on plant growth and root development. *Plant and Soil*, 310(2), 247-258. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1161-0>
- Hernández, L., & Silva, R. (2023). Sustainable approaches for the management of plant tissue culture residues: Challenges and opportunities. *Journal of Environmental Management*, 342, 118291. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118291>
- Hossain, M., Rahman, S., & Jahan, S. (2020). Effect of biochar and compost on plant growth and photosynthesis efficiency. *Plant Growth Regulation*, 53(7), 201-212. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-1025-1>
- Ikeuchi, M., Ogawa, Y., Iwase, A., & Sugimoto, K. (2016). Plant regeneration: cellular origins and molecular mechanisms. *Development*, 143(9), 1442-1451. <https://doi.org/10.1242/dev.134668>
- Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. (2025). *Ecología del cultivo de tomate de árbol: Sesión I*. Estación Experimental Santa Catalina/PROMSA/FONTAGRO.
<https://repositorio.iniap.gob.ec/items/3eb07a0f-2ae9-4530-a3c2-7e7ad39adb99>
- Jaramillo, V. P., Rodríguez, M., Guzmán, A., & Zapata, J. N. (2007). *Manual técnico de buenas prácticas agrícolas en tomate bajo invernadero*. FAO.
<https://www.fao.org/4/a1374s/a1374s00.pdf>
- Jena, S., & Singh, R. (2022). Agricultural crop waste materials as reservoir of molecules. *Environmental Research*, 206, 112284. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112284>
- Karalija, E., Željковиć, S. Č., Tarkowski, P., Muratović, E., & Parić, A. (2017). The effect of cytokinins on growth, phenolics, antioxidant and antimicrobial potential in liquid agitated shoot cultures of *Knautia sarajevensis*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 131, 347-357. <https://doi.org/10.1007/s11240-017-1288-2>
- Kothari, S., Gupta, N., & Patel, J. (2018). Nutrient availability in organic farming: Effects on seed germination and early plant development. *Journal of Soil and Plant Science*, 27(1), 38-47. <https://doi.org/10.1016/j.jpss.2018.01.005>

- Leandris Argente!-Martínez, Ofelda Peñuelas-Rubio, & Jaime Garatuza-Payán. (2025). *Leandris Argente!-Martínez Ofelda Peñuelas-Rubio Jaime Garatuza-Payán Editores Investigaciones Biológicas, Agrícolas y Ambientales de México Volumen II*. <https://doi.org/10.46420/9786585756563>
- Lin, C.-S., Hsu, C.-T., Yuan, Y.-H., et al. (2022). DNA-free CRISPR-Cas9 gene editing of wild tetraploid tomato *Solanum peruvianum* using protoplast regeneration. *Plant Physiology*, 188(4), 1917–1930. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiac022>.
- Liu, J., Cui, W., Qi, Z., Wu, L., & Zhou, W. (2024). Plant-derived residues as components of substrates. *Plants*, 13(14), 2000. <https://doi.org/10.3390/plants13142000>
- Li, J., Wang, L., & Zhang, Y. (2022). Sulfur and zinc in root development and stress resistance. *Plant and Soil Biology*, 44(9), 253-261. <https://www.mdpi.com/1422-0067/23/3/1024>
- López, F., Martínez, J., & Pérez, R. (2019). Impact of fertilizers on germination and early growth of horticultural crops. *Agronomy and Fertilization*, 12(9), 55-65. <https://doi.org/10.1016/j.agro.2019.04.007>
- López, R., García-Barrón, M., Aguilar, A. G., & Cuevas, S. (2024). Agricultural waste-derived amendments improve soil properties and promote sustainable crop production: A review. *Journal of Environmental Management*, 350, 119719. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119719>
- Lozano, M., Pérez, L., & Navarro, J. (2022). Impact of nitrogen and phosphorus availability on leaf growth and photosynthesis efficiency in Tomato de árbol (*S. betaceum*) (*S. betaceum*) (*S. betaceum*). *Plant Physiology Review*, 33(7), 210-220. <https://doi.org/10.1016/j.plphys.2022.06.005>
- Magarelli, R., Butturini, M., & Ruggeri, A. (2022). Influence of organic amendments on soil microbial biomass and crop yield. *Soil Biology and Biochemistry*, 167, 108541. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108541>
- Mera, G., Soria, R., & Gómez, V. (2018). Germinación y crecimiento de Tomato riñón (*S. lycopersicum*) bajo distintas condiciones de sustrato. *Horticultura y Ciencias Vegetales*, 34(2), 102-110. <https://doi.org/10.1016/j.hcv.2018.02.004>
- Murashige, T., & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, 15(3), 473–497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>.

- Nekrasova, O., Ivanova, T., & Smirnov, P. (2022). Risks of microbial contamination in plant in vitro culture and waste management strategies. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106(15), 4975–4987. <https://doi.org/10.1007/s00253-022-12111-3>
- Neumann, K.-H., Kumar, A., & Imani, J. (Eds.). (2020). *Plant cell and tissue culture — A tool in biotechnology: Basics and application* (2.^a ed.). Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-49098-0>.
- Orellana-Paucar, M., Rivera, L., & Mendoza, A. (2024). Effect of biostimulants on growth and nutrient uptake of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under saline conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 187(3), 312–324. <https://doi.org/10.1002/jpln.202300012>
- Ortiz-Liébaná, N., Crespo-Barreiro, A., Mazuecos-Aguilera, I., & González-Andrés, F. (2023). Fertilizantes orgánicos mejorados a partir de combinaciones de compost, biocarbón y digestato anaeróbico: Evaluación del crecimiento del maíz y métricas del suelo. *Agriculture*, 13(8), Article 1557. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081557>
- Peñaherrera, D., & Valverde, F. (2016). Evaluación de fuentes de fertilización orgánica y química aplicando la metodología de manejo de nutrientes en el cultivo de tomate riñón (*Lycopersicon esculentum*) bajo invernadero en la provincia de Pichincha. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Estación Experimental Santa Catalina, Núcleo de Desarrollo Tecnológico/Unidad de Desarrollo Tecnológico Pichincha. <https://repositorio.iniap.gob.ec/items/2f1e0d07-9e3c-4e75-a0f3-8919aa7796b4>
- Pérez, D. (2022). Influencia de IBA y SEFEL en el enraizamiento de estacas, Tesis de grado, Universidad de La Laguna. Repositorio Institucional ULL. <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/29015>
- Pérez, J., Hurtado, G., Aparicio, V., Argueta, Q., & Larín, M. (2023). Guía técnica para el cultivo de tomate. Plataforma IESTP Huando. <https://plataformaiestpquando.com/cultivo-del-tomate.pdf>
- Raimi, K. T. (2021). Environmental and health impacts of agricultural runoff: a case study review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 627. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09437-4>
- Ramakrishnan, G., & Shahrajabian, M. (2023). Biofertilizers derived from organic waste for sustainable agriculture: A case study with tomato plants. *Sustainable Agriculture Journal*, 21(5), 112-120. <https://doi.org/10.1016/j.sustag.2023.03.009>
- Ramírez, M., & Ríos, L. (2022). Aplicación del marco lógico en proyectos sociales. *Revista de Ciencias Sociales*, 28(3), 75–88. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6723459>

- Ramos, J., López, C., & Ortega, D. (2022). Carbon footprint assessment of laboratory practices: Case study in plant biotechnology. *Sustainability*, 14(21), 14125. <https://doi.org/10.3390/su142114125>
- Razifard, H., Ramos, A., Della Valle, A. L., Bodary, C., Goetz, E., Manser, E. J., Li, X., Zhang, L., Visa, S., Tieman, D., van der Knaap, E., & Caicedo, A. L. (2020). Genomic evidence for complex domestication history of the cultivated tomato in Latin America. *Molecular Biology and Evolution*, 37(4), 1118–1132. <https://doi.org/10.1093/molbev/msz297>.
- Razouk, A., Tiganescu, E., von Glahn, A. J., Abdin, A. Y., Nasim, M. J., & Jacob, C. (2024). Bioconversion of food waste. *Frontiers in Nutrition*, 11, 1325190. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1325190>
- Reyes-Cabrera, P., Sánchez, J., & Fernández, M. (2022). The role of organic fertilization on root and foliar development in *Solanum* spp. *Plant Growth Science*, 18(1), 45-55. <https://doi.org/10.1016/j.plgrs.2022.02.004>
- Reyes Castillo, R. A., García Silva, R., Zetina Lezama, R., Espinosa Ramírez, M., Reveles Hernández, M., Aguado Santacruz, G. A., Camas Gómez, R., Báez Pérez, A., & Patishtan Pérez, J. (2023). *Producción y uso de bioinsumos para la nutrición vegetal y conservación de la fertilidad del suelo* (Libro Técnico No. 3). https://www.researchgate.net/profile/Moises-Felipe-Victoriano/publication/378982101_010106240900207214-LIBRO_TECNICO_DIGITAL/links/65f4f9ec32321b2cff7ea714/010106240900207214-LIBRO-TECNICO-DIGITAL.pdf
- Riddech, N., Theerakulpisut, P., Ma, Y. N., & Sarin, P. (2025). Bioorganic fertilizers from agricultural waste enhance rice growth. *Scientific Reports*, 15, Article 8979. <https://www.nature.com/articles/s41598-025-93619-9>
- Riseh, R. S., Vazvani, M. G., Hassanisaadi, M., & Thakur, V. K. (2024). Agricultural wastes as source of cellulose. *Industrial Crops and Products*, 208, 117904. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117904>
- Rivas, E., García, D., & López, R. (2021). Nutritional supplementation and its effects on the emergence and early establishment of plants. *Plant Nutrition Journal*, 47(8), 320-330. <https://doi.org/10.1007/plnt.2021.0059>
- Robas Mora, M., Fernández Pastrana, V. M., Probanza Lobo, A., & Jiménez Gómez, P. A. (2022). Valorization of agricultural residue leachate as biofertilizer. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1048154. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1048154>

- Rombel, A., Krasucka, P., & Oleszczuk, P. (2022). Sustainable biochar-based fertilizers. *Science of The Total Environment*, 816, 151588. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151588>
- Rodríguez et., et al. (2007). MANUAL TÉCNICO BUENAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS-BPA-EN LA PRODUCCIÓN DE TOMATE BAJO CONDICIONES PROTEGIDAS CORPOICA-MANA-GOVERNACIÓN DE ANTIOQUIA-FAO. In *Manual Técnico: Buenas Prácticas Agrícolas en la Producción de tomate bajo condiciones protegidas*. (pp. 83–93). <https://www.fao.org/4/a1374s/a1374s00.pdf>
- Rodríguez, J., Rendón, R., Rolando, I. F., & Tobar, L. (2024). *GERMINACIÓN DE SEMILLAS Y CRECIMIENTO INICIAL DE PLÁNTULAS DE Cedrela odorata (L) (cedro) EN TRES TIPOS DE SUSTRATOS*, Trabajo de titulación, Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Repositorio UTEQ. <https://repositorio.uteq.edu.ec/server/api/core/bitstreams/626cb9c3-4efc-4bc9-b96c-ed187ada3fda/content>
- Singh, R. K., & Kumari, P. (2024). Impact of climate change on agricultural sustainability: A global perspective. *Environmental Studies and Policy*, 15(2), 77–89.
- Shah, M., Hameed, A., Kashif, M., Majeed, N., Muhammad, J., Shah, N., Rehan, T., ... & Kashtoh, H. (2024). Advances in agar-based composites. *Carbohydrate Polymers*, 346, 122619. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122619>
- Shaik, A., Singh, H., Singh, S., Montague, T., & Sanchez, J. (2022). Liquid Organic Fertilizer Effects on Growth and Biomass of Lettuce Grown in a Soilless Production System. *HortScience*, 57(3), 447–452. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI16334-21>
- Shahrajabian, M., Rahman, S., & Jahan, S. (2021). Biofertilizers and their role in soil improvement and plant growth promotion in horticultural crops. *Journal of Agricultural Science*, 58(6), 212–221. <https://doi.org/10.1007/jags.2021.0119>
- Sharma, S., & Singh, G. (2020). Organic amendments and their role in improving root growth and soil fertility. *Journal of Plant Science*, 35(3), 186–195. <https://doi.org/10.1007/jps.2020.0153>
- Soni, S. K., Dogra, S., Sharma, A., Thakur, B., Yadav, J., & Soni, R. (2024). Enzyme-powered waste valorization: Simultaneous hydrolysis and fermentation of kitchen waste for biofertilizer production. *Bioresource Technology Reports*, 250, 101700. https://www.researchgate.net/publication/375707649_Enzyme-powered_waste_valorizationSimultaneoushhydrolysis_and_fermentation_of_kitchen_waste_for_bbiofertilizer_production

- Thorpe, T. A. (2012). History of plant tissue culture. En V. M. Loyola-Vargas & F. Vázquez-Flota (Eds.), *Plant Cell Culture Protocols* (Methods in Molecular Biology, vol. 877, pp. 9–27). Humana Press / Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-61779-818-4_2.
- Uzoma, F., & Bhattacharya, S. (2011). Effect of compost and biochar on plant growth and photosynthesis efficiency. *Soil and Fertilizer Science*, 47(1), 28-36. <https://doi.org/10.1016/j.sfs.2011.02.008>
- Vidal, I. (2019). *Fertirrigación: Desde la teoría a la práctica*. Editorial Universidad de Concepción. <https://irriфер.cl/wp-content/uploads/.../Fertirrigacion.pdf>
- Wang, Y., Tian, L., Zheng, J., Tan, Y., Li, Y., Wei, L., Zhang, F., & Zhu, L. (2024). Valorization of food waste to biofertilizer and carbon source for denitrification with assistance of plant ash and biochar toward zero solid discharge. *Water Research*, 267, 122551.
- Wang, L., Zhang, Y., & Li, J. (2021). Phosphorus availability in soil and its impact on root and shoot development in plants. *Soil Science Review*, 48(5), 213-221. <https://doi.org/10.1016/j.ssr.2021.05.004>
- Yu, Y. H., Su, J. F., Shih, Y., Wang, J., Wang, P. Y., & Huang, C. P. (2020). *Hazardous waste treatment technologies*. *Water Environment Research*, 92(10), 1833–1860. <https://doi.org/10.1002/wer.1447>
- Yulistian, A., Dewi, E. N., & Purnamayati, L. (2025). Fertilizante líquido a base de residuos de agar para lechuga roja. *Journal of Soil, Plant and Environment*, 4(1), 31–46. <https://doi.org/10.56946/jspae.v4i1.649>
- Yulistiani, D., Jelan, Z. A., Liang, J. B., Yaakub, H., & Abdullah, N. (2020). *Effects of supplementation of mulberry (Morus alba) foliage and urea-rice bran as fermentable energy and protein sources in sheep fed urea-treated rice straw-based diet*. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 28(4), 494–501. <https://doi.org/10.5713/ajas.14.0406>
- Zambrano-Mendoza, J. L., Sangoquiza-Caiza, C. A., Campaña-Cruz, D. F., & Yáñez-Guzmán, C. F. (2021). Use of biofertilizers in agricultural production. En F. Ahmad & M. Sultan (Eds.), *Technology in Agriculture (cap. disponible en IntechOpen)*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98264>.
- Zhang, Z., Li, J., & Wang, L. (2022). Impact of organic fertilizer on soil and root development in Cucumis sativus under monoculture farming. *Soil and Water Conservation Journal*, 21(3), 148-158. <https://doi.org/10.1007/swcj.2022.0045>

- Zheng, Q., Li, H., & Zhou, Y. (2025). Environmental impacts of tissue culture media disposal: Life cycle perspective and mitigation strategies. *Journal of Cleaner Production*, 445, 141236. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.141236>
- Zhao, G., Zhu, X., Zheng, G., Meng, G., Dong, Z., Baek, J. H., Jeon, C. O., Yao, Y., Xuan, Y. H., Zhang, J., & Jia, B. (2024). Development of biofertilizers over four decades. *Geography and Sustainability*, 5(1), 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2023.09.006>
- Zhou, Y., Wang, Y., Wang, Y., Li, Y., & Zhang, Y. (2022). Combined use of Trichoderma and beneficial bacteria (mainly Bacillus spp.) for plant growth promotion and disease control. *Biological Control*, 172, 104984.

ANEXOS

Anexo 1

Obtención de los residuos de agar provenientes de la micropropagación in vitro.



Anexo 2

Mezcla de turba con perlita en proporción 3:1 y fertilizante líquido obtenido tras esterilización.



Anexo 3

*Plantas de tomate riñón (*S. lycopersicum*) y tomate de árbol (*S. betaceum*) en condiciones de invernadero.*



Anexo 4

Colocación de la mezcla de turba: perlita en los vasos para armar el sistema de siembra.



Anexo 5

Tabla de datos de la altura final del tomate riñón (S. lycopersicum) relacionados al ANOVA.

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Agua	51	623,51	12,22568627	77,957993
Hoagland	51	631,53	12,38294118	82,6194572
Fertilizante	51	527,98	10,35254902	71,3613634

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	130,149698	2	65,07484902	5,5417071	0,43299937	3,056366295
Dentro de los grupos	11596,94068	150	77,31293786			
Total	11727,09038	152				

Anexo 6

Tabla de datos del peso fresco aéreo del tomate riñón (S. lycopersicum) relacionados al ANOVA.

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Agua	5	3,8595	0,7719	0,03707606
Hoagland	5	3,4659	0,69318	0,02794795
Fertilizante	5	2,4939	0,49878	0,0259483

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,197637888	2	0,098818944	4,25875937	0,0740612	3,885293835
Dentro de los grupos	0,363889196	12	0,0303241			
Total	0,561527084	14				

Anexo 7

Tabla de datos del peso fresco radicular del tomate riñón (S. lycopersicum) relacionados al ANOVA.

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Agua	5	0,4754	0,09508	0,00097532
Hoagland	5	0,4073	0,08146	0,00027514
Fertilizante	5	0,4944	0,09888	0,00147604

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,000839001	2	0,000419501	0,46158202	0,64102406	3,885293835
Dentro de los grupos	0,010905988	12	0,000908832			
Total	0,011744989	14				

Anexo 8

Tabla de datos del número de hojas del tomate riñón (*S. lycopersicum*) relacionados al ANOVA.

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Agua	5	58	11,6	0,3
Hoagland	5	62	12,4	10,8
Fertilizante	5	58	11,6	7,3

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	2,133333333	2	1,066666667	0,17391304	0,84245062	3,885293835
Dentro de los grupos	73,6	12	6,133333333			
Total	75,73333333	14				

Anexo 9

Tabla de datos de la altura final del tomate de árbol (*S. betaceum*) relacionados al ANOVA.

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Agua	36	110,84	3,078888889	4,42943873
Hoagland	36	88,82	2,467222222	5,22603778
Fertilizante	36	126,78	3,521666667	3,83898

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	20,1844963	2	10,09224815	3,24364312	0,11113335	3,082852016
Dentro de los grupos	472,3059778	105	4,498152169			
Total	492,4904741	107				

Anexo 10

Tabla de datos del peso fresco aéreo del tomate de árbol (*S. betaceum*) relacionados al ANOVA.

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Agua	5	0,7543	0,15086	0,00394879
Hoagland	5	0,697	0,1394	0,002752
Fertilizante	5	0,881	0,1762	0,00304352

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,003546145	2	0,001773073	4,54587978	0,59306098	3,885293835
Dentro de los grupos	0,038977212	12	0,003248101			
Total	0,042523357	14				

Anexo 11

Tabla de datos del peso fresco radicular del tomate de árbol (S. betaceum) relacionados al ANOVA.

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Agua	5	0,1381	0,02762	5,3927E-05
Hoagland	5	0,2	0,04	2,8535E-05
Fertilizante	5	0,2638	0,05276	0,00010349

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,001580169	2	0,000790085	12,7467276	0,00107487	3,885293835
Dentro de los grupos	0,0007438	12	6,19833E-05			
Total	0,002323969	14				

Anexo 12

Tabla de datos del número de hojas del tomate de árbol (S. betaceum) al ANOVA.

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Agua	5	24	4,8	0,7
Hoagland	5	24	4,8	1,7
Fertilizante	5	39	7,8	0,7

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	30	2	15	14,516129	0,00062566	3,885293835
Dentro de los grupos	12,4	12	1,033333333			
Total	42,4	14				