

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE NEGOCIOS
AGRONÓMICOS Y FORESTALES**



TESIS

**Diferentes sustratos y proporción de nutrientes en
un sistema hidropónico inteligente para producir
espinacas en una ciudad en expansión, Ayacucho.**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero de Negocios Agronómicos y Forestales

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Agronomía

PRESENTADO POR:

Espino Curi, David Helcias

ASESOR:

Dr. Sucari León, Reynaldo

HUANTA - AYACUCHO

2026

NOMBRE DEL TRABAJO

TESIS_DAVID_UNAH_JUNIO_2026_TESIS_FINAL.pdf

AUTOR

David Helcias Espino Curi

RECuento DE PALABRAS

27025 Words

RECuento DE CARACTERES

143642 Characters

RECuento DE PÁGINAS

113 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

60.1MB

FECHA DE ENTREGA

Jun 16, 2026 4:26 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Jun 16, 2026 4:28 PM GMT-5

● 11% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 9% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 8% Base de datos de trabajos entregados
- 4% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Bloques de texto excluidos manualmente
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)



Firmado digitalmente por:
SUCARI LEON REYNALDO FIR
01341544 hard
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 29/06/2026 18:35:26-0500



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO DE NEGOCIOS AGRONÓMICOS Y
FORESTALES**

En la ciudad de Huanta, en el auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería de Negocios Agronómicos y Forestales del campus universitario de la Universidad Nacional Autónoma de Huanta, ubicado en la autopista Carlos Ch. Hiraoka, desvío a Ccollana, a los 19 días del mes de junio de 2026, siendo las 10:00 horas, se dio inicio al acto académico de sustentación de tesis con la presencia de los miembros del jurado calificador:

Dr. Rene Antonio Hinojosa Benavides	Miembro Titular 1 (Presidente)
Dr. Genaro Mario Condori Ramos	Miembro titular 2
Dr. Reynaldo Sucari Leon	Miembro titular 3

Acto seguido se procedió a dar lectura a la Resolución de Vicepresidencia Académica N° 084-2026-CO-UNAH, en la que señala fecha, hora y designación de jurado evaluador para la sustentación de tesis del **Bach. David Helcias Espino Curi**, con la tesis titulada: **"Diferentes sustratos y proporción de nutrientes en un sistema hidropónico inteligente para producir espinacas en una ciudad en expansión, Ayacucho"**; asesorado por el Dr. Reynaldo Sucari Leon, para optar el Título profesional de: Ingeniero de Negocios Agronómicos y Forestales.

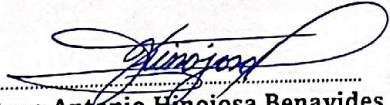
Observaciones:

Ninguna
.....
.....

Terminada la sustentación se procedió a la formulación de preguntas por los miembros del jurado evaluadores, los mismos que fueron defendidos y absueltos por la tesista. Acto seguido se procedió a calificar con el resultado siguiente:

Aprobado Regular	()
Aprobado Bueno	()
Aprobado Muy Buenos	()
Aprobado Excelente	(X)

Con la calificación de Distinto..... (18)
Siendo las 11:20 A.M. se da por finalizada el acto académico de sustentación de tesis pasando a firmar los miembros del jurado evaluador.


.....
Dr. Rene Antonio Hinojosa Benavides
Miembro Titular 1 (Presidente)


.....
Dr. Genaro Mario Condori Ramos
Miembro Titular 2


.....
Dr. Reynaldo Sucari Leon
Miembro Titular 3

Diferentes sustratos y proporción de nutrientes en un sistema hidropónico inteligente para producir espinacas en una ciudad en expansión, Ayacucho.

TESISTA

Espino Curi, David Helcias

ASESOR

Dr. Sucari León Reynaldo

DEDICATORIA

A Dios, por la vida, la salud y la fortaleza que me permitieron avanzar en cada etapa de mi formación profesional.

A mi familia, por su amor incondicional, apoyo constante y por ser el principal motivo para alcanzar esta meta.

A todas las personas que confiaron en mi esfuerzo, me alentaron en los momentos difíciles y contribuyeron a la culminación de este trabajo.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional Autónoma de Huanta y a la Facultad de Ingeniería y Gestión, por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente.

Al Dr. Reynaldo Sucari León, asesor de la presente tesis, por su orientación, paciencia y aportes técnicos durante el desarrollo de la investigación.

A mis docentes, compañeros y a todas las personas que, con su apoyo técnico, académico o moral, contribuyeron al cumplimiento de este trabajo.

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar comparativamente el crecimiento, rendimiento y eficiencia de uso de agua de la espinaca (*Spinacia oleracea* L.) cultivada bajo diferentes combinaciones de sustrato y concentración de solución nutritiva en un sistema hidropónico NFT inteligente y recirculante, bajo condiciones de Huamanga, Ayacucho. Se evaluaron dos sustratos, espuma fenólica y fibra de coco, combinados con tres niveles de solución nutritiva Yamazaki: 75 %, 100 % y 125 %. El estudio se desarrolló bajo un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial 2×3 , conformado por seis tratamientos, seis bloques y 36 unidades experimentales. Cada unidad experimental correspondió a un tubo NFT con cuatro plantas, cuyo promedio fue usado para el análisis estadístico.

Las variables evaluadas fueron altura de planta, número de hojas, biomasa fresca sin raíz, biomasa seca sin raíz, materia seca, pH, conductividad eléctrica, agua repuesta, consumo total de agua y eficiencia de uso de agua. Los resultados evidenciaron que la solución nutritiva Yamazaki al 100 % generó la respuesta agronómica más consistente. El tratamiento T2, espuma fenólica $\times$ 100 %, presentó el mejor desempeño integral, con un índice estandarizado de 1,01. El tratamiento T5, fibra de coco $\times$ 100 %, destacó por la mayor biomasa fresca (78,92 g/planta) y biomasa seca (6,43 g/planta). Asimismo, T4, fibra de coco $\times$ 75 %, registró la mayor eficiencia de uso de agua (78,4 g/L). El pH se mantuvo dentro del rango referencial de 5,5 a 6,5, y la conductividad eléctrica fue coherente con las concentraciones aplicadas. Se concluye que la solución Yamazaki al 100 % es la más recomendable para la producción hidropónica de espinaca en sistema NFT; T2 fue el mejor tratamiento integral, T5 la mejor alternativa para biomasa y T4 la mejor opción para eficiencia hídrica. La concentración al 125 % no representó ventaja agronómica ni operativa.

Palabras clave: hidroponía, sistema NFT, espinaca, espuma fenólica, fibra de coco, solución nutritiva Yamazaki, eficiencia de uso de agua.

ABSTRACT

This research aimed to comparatively evaluate the growth, yield, and water use efficiency of spinach (*Spinacia oleracea* L.) grown under different combinations of substrate and nutrient solution concentration in an intelligent and recirculating NFT hydroponic system under the conditions of Huamanga, Ayacucho. Two substrates, phenolic foam and coconut fiber, were evaluated in combination with three levels of Yamazaki nutrient solution: 75 %, 100 %, and 125 %. The study was conducted under a randomized complete block design with a 2×3 factorial arrangement, consisting of six treatments, six blocks, and 36 experimental units. Each experimental unit consisted of one NFT tube with four plants, whose average value was used for statistical analysis.

The evaluated variables were plant height, number of leaves, fresh biomass without roots, dry biomass without roots, dry matter, pH, electrical conductivity, replacement water, total water consumption, and water use efficiency. The results showed that the 100 % Yamazaki nutrient solution produced the most consistent agronomic response. Treatment T2, phenolic foam $\times$ 100 %, showed the best overall performance, with a standardized index of 1.01. Treatment T5, coconut fiber $\times$ 100 %, stood out for the highest fresh biomass (78.92 g/plant) and dry biomass (6.43 g/plant). Likewise, T4, coconut fiber $\times$ 75 %, recorded the highest water use efficiency (78.4 g/L). The pH remained within the reference range of 5.5 to 6.5, and electrical conductivity was consistent with the applied concentrations. It is concluded that the 100 % Yamazaki solution is the most recommended concentration for hydroponic spinach production in the NFT system; T2 was the best overall treatment, T5 the best alternative for biomass accumulation, and T4 the best option for water use efficiency. The 125 % concentration did not represent an agronomic or operational advantage.

Keywords: hydroponics, NFT system, spinach, phenolic foam, coconut fiber, Yamazaki nutrient solution, water use efficiency.

ÍNDICE

RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
ÍNDICE GENERAL	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XVI
ÍNDICE DE TABLAS	XVIII
INTRODUCCIÓN	19
CAPÍTULO I. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	21
1.1 Planteamiento del problema	21
1.1.1 Formulación del problema	23
1.1.1.1 Problema general	23
1.1.1.2 Problemas específicos	23
1.2 Objetivos	23
1.2.1 Objetivo general	23
1.2.2 Objetivos específicos	24
1.3 Justificación e importancia	24
1.3.1 Justificación teórica	24
1.3.2 Justificación práctica	24
1.3.3 Justificación metodológica	25
1.3.4 Justificación científica	25
1.3.5 Justificación económica	25
1.3.6 Justificación social	25
1.3.7 Importancia	26
1.4 Viabilidad del estudio	26

1.4.1	Viabilidad técnica, logística y financiera	26
1.4.2	Viabilidad operativa	26
1.4.3	Consideración metodológica	27
1.5	Hipótesis	27
1.5.1	Hipótesis general	27
1.5.2	Hipótesis específicas	27
1.6	Variables del estudio	28
1.6.1	Variables independientes	28
1.6.2	Variables dependientes	28
1.6.3	Variables de control	28
1.7	Operacionalización de variables	30
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO		32
2.1	Antecedentes	32
2.1.1	A nivel internacional	32
2.1.2	A nivel nacional	33
2.1.3	A nivel local	35
2.2	Bases teóricas	36
2.2.1	Sustratos de cultivo	36
2.2.1.1	Definición	36
2.2.1.2	Funciones	36
2.2.1.3	Espuma fenólica	37
2.2.1.4	Fibra de coco	37
2.2.2	Solución nutritiva	37
2.2.2.1	Nutrición mineral	37
2.2.2.2	Solución nutritiva Yamazaki	37
2.2.2.3	Concentración nutritiva	37
2.2.2.4	pH	38

2.2.2.5	Conductividad eléctrica	38
2.2.3	Espinaca (<i>Spinacia oleracea</i> L.)	38
2.2.3.1	Características generales	38
2.2.3.2	Requerimientos nutricionales	38
2.2.3.3	Crecimiento	39
2.2.3.4	Rendimiento	39
2.3	Definición de términos	39
CAPÍTULO III.METODOLOGÍA		43
3.1	Tipo y nivel de investigación	43
3.1.1	Enfoque de la investigación	43
3.1.2	Tipo de investigación	43
3.1.3	Nivel de investigación	43
3.1.4	Diseño y distribución experimental	43
3.1.5	Análisis estadístico de datos	46
3.1.6	Variables evaluadas	47
3.2	Ámbito temporal y espacial	48
3.2.1	Ámbito temporal	48
3.2.2	Ámbito espacial	48
3.3	Población y muestra	49
3.3.1	Población	49
3.3.2	Muestra experimental	49
3.3.3	Técnica de recolección de datos	49
3.4	Instrumentos	49
3.4.1	Equipos, materiales e insumos	49
3.5	Procedimientos	50
3.5.1	Instalación y acondicionamiento inicial	50
3.5.2	Preparación y manejo de la solución nutritiva	50

3.5.3	Trasplante y establecimiento del cultivo	50
3.5.4	Operación del sistema NFT	51
3.5.5	Evaluación del crecimiento	51
3.5.6	Cosecha y determinación del rendimiento	51
3.5.7	Control de calidad y consolidación de datos	51
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		52
4.1	Resultados	52
4.1.1	Análisis estadístico general del experimento	52
4.1.2	Crecimiento semanal de la espinaca	55
4.1.3	Altura final y número final de hojas	57
4.1.4	Producción de biomasa fresca y biomasa seca	59
4.1.5	Interacción entre sustrato y concentración nutritiva	61
4.1.6	Eficiencia de uso de agua	62
4.1.7	Comportamiento operativo de la solución nutritiva	63
4.1.8	Desempeño integral de los tratamientos	65
4.1.9	Síntesis de los resultados	66
4.2	Discusión	67
4.2.1	Desempeño integral del cultivo	67
4.2.2	Crecimiento vegetativo	69
4.2.3	Rendimiento en biomasa	70
4.2.4	Interacción entre sustrato y concentración nutritiva	71
4.2.5	Eficiencia de uso de agua y operación del sistema	72
4.2.6	Desempeño integral y selección técnica del mejor tratamiento	74
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES		76
CAPÍTULO VI. RECOMENDACIONES		78

ANEXOS 83

Anexo A. Base consolidada de crecimiento y rendimiento de espinaca	84
Anexo B. Base consolidada operativa de pH, conductividad eléctrica y agua repuesta	92
Anexo C. Panel fotográfico del sistema hidropónico NFT	98
C.1. Área experimental acondicionada	99
C.2. Supervisión del área de instalación	100
C.3. Componentes del sistema hidropónico	101
C.4. Calibración de sensores	102
C.5. Estructura de soporte del sistema NFT	103
C.6. Montaje de tubos y canales NFT	104
C.7. Sistema NFT implementado antes del cultivo	105
C.8. Sistema de recirculación y control	106
C.9. Verificación de sensores y conexiones	107
C.10. Monitoreo de la solución nutritiva	108
C.11. Sistema NFT durante el desarrollo del cultivo	109
C.12. Crecimiento de espinaca en canales NFT	110
C.13. Cosecha de espinaca hidropónica	111
C.14. Disposición de plantas cosechadas	112
C.15. Evaluación morfológica y organización de muestras	113
C.16. Secado en estufa y procesamiento final de muestras	114
C.17. Pesado inicial de muestras para biomasa seca	115
C.18. Pesado final después de 24 horas de secado	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1.	Crecimiento semanal de la espinaca en altura de planta bajo sistema NFT.	56
Figura 4.2.	Dinámica semanal del número de hojas de espinaca bajo sistema NFT.	57
Figura 4.3.	Altura final de espinaca hidropónica según tratamiento.	58
Figura 4.4.	Número final de hojas por tratamiento en espinaca hidropónica.	59
Figura 4.5.	Rendimiento en biomasa fresca de espinaca hidropónica.	60
Figura 4.6.	Acumulación de biomasa seca de espinaca hidropónica.	61
Figura 4.7.	Interacción entre sustrato y concentración nutritiva para biomasa fresca sin raíz.	62
Figura 4.8.	Eficiencia de uso de agua por tratamiento.	63
Figura 4.9.	Comportamiento semanal del pH de la solución nutritiva.	64
Figura 4.10.	Conductividad eléctrica semanal de la solución nutritiva.	64
Figura 4.11.	Índice integral de desempeño agronómico por tratamiento.	65
Figura 4.12.	Perfil comparativo estandarizado por tratamiento.	66
Figura C.1.	Área acondicionada para la implementación del sistema hidropónico NFT.	99
Figura C.2.	Supervisión del área destinada a la instalación del módulo hidropónico.	100
Figura C.3.	Componentes hidráulicos, eléctricos y electrónicos empleados en el sistema NFT.	101
Figura C.4.	Calibración y prueba de sensores para el monitoreo de la solución nutritiva.	102
Figura C.5.	Estructura metálica utilizada como soporte de los canales hidropónicos NFT.	103
Figura C.6.	Montaje de tubos, canales y conexiones hidráulicas del sistema NFT.	104
Figura C.7.	Sistema hidropónico NFT instalado antes del establecimiento de las plantas.	105
Figura C.8.	Sistema de recirculación y control electrónico del módulo hidropónico NFT.	106
Figura C.9.	Verificación de sensores y conexiones instaladas en el sistema NFT.	107
Figura C.10.	Monitoreo de la solución nutritiva en el reservorio del sistema NFT.	108
Figura C.11.	Vista general del sistema NFT durante el crecimiento de la espinaca.	109
Figura C.12.	Plantas de espinaca en crecimiento dentro de los canales NFT.	110
Figura C.13.	Cosecha de espinaca producida en el sistema hidropónico NFT.	111
Figura C.14.	Disposición de plantas cosechadas para la evaluación final del rendimiento.	112
Figura C.15.	Evaluación morfológica y ordenamiento del material vegetal cosechado.	113
Figura C.16.	Secado en estufa y procesamiento final del material vegetal cosechado.	114

Figura C.17.	Pesado inicial de muestras foliares por tratamiento antes del secado en estufa.	115
Figura C.18.	Pesado final de muestras foliares por tratamiento después de 24 horas de secado en estufa a 55 °C.	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.	<i>Operacionalización de las variables del estudio</i>	30
Tabla 3.1.	Tratamientos evaluados en el sistema hidropónico NFT	44
Tabla 3.2.	Criterio de bloqueo aplicado en el sistema hidropónico NFT	45
Tabla 3.3.	Estructura experimental por bloques y tratamientos	46
Tabla 4.1.	Codificación de tratamientos evaluados en el sistema NFT	52
Tabla 4.2.	Análisis de varianza para las variables agronómicas finales	53
Tabla 4.3.	Verificación de supuestos del análisis de varianza	54
Tabla 4.4.	Medias finales, error estándar y grupos de Tukey por tratamiento	54
Tabla 4.5.	Eficiencia de uso de agua e índice integral de desempeño agronómico	55
Tabla A.1.	Codificación de tratamientos utilizados en el registro consolidado	85
Tabla A.2.	Diccionario de variables utilizadas en las tablas consolidadas	86
Tabla A.3.	Resumen descriptivo por tratamiento de las principales variables finales	87
Tabla A.4.	Base consolidada por tubo: altura semanal y biomasa final sin raíz	88
Tabla A.5.	Base consolidada por tubo: número promedio de hojas por semana	90
Tabla B.1.	Codificación de tratamientos utilizados en el registro operativo semanal	93
Tabla B.2.	Diccionario de variables operativas utilizadas en las tablas consolidadas	93
Tabla B.3.	Resumen descriptivo operativo por tratamiento durante el ciclo de cultivo	94
Tabla B.4.	Base consolidada operativa semanal: pH, conductividad eléctrica y agua re- puesta	95

INTRODUCCIÓN

La producción de hortalizas frescas en ciudades en expansión enfrenta limitaciones asociadas a la reducción del suelo agrícola periurbano, la presión sobre el recurso hídrico y la necesidad de abastecer alimentos de alta rotación en espacios cada vez más reducidos. Esta situación adquiere relevancia en Huamanga, Ayacucho, donde el crecimiento urbano y la variabilidad en la disponibilidad de agua exigen alternativas productivas más eficientes, sostenibles y adaptables a condiciones locales. En este contexto, los sistemas hidropónicos recirculantes constituyen una opción técnica importante, debido a que permiten producir sin suelo, reutilizar la solución nutritiva y controlar variables operativas críticas como el pH, la conductividad eléctrica y el volumen de agua repuesto (UN-Habitat, 2022; Fathidarehnejeh et al., 2024).

La espinaca (*Spinacia oleracea* L.) es una hortaliza de hoja de ciclo corto, valor alimentario importante y rápida respuesta frente a las condiciones del ambiente radical. En sistemas hidropónicos, su crecimiento y rendimiento dependen del equilibrio entre el suministro de nutrientes, el tipo de sustrato, la estabilidad de la solución nutritiva y el manejo operativo del sistema. Por ello, la selección del sustrato y de la concentración de la solución nutritiva no debe realizarse de manera empírica, ya que una mayor concentración de sales no siempre garantiza mayor crecimiento, mayor producción de biomasa ni mejor eficiencia en el uso del agua (Bian et al., 2020; Gillespie et al., 2021; Gao et al., 2020).

La presente investigación evaluó comparativamente el comportamiento del crecimiento, rendimiento y eficiencia de uso de agua de la espinaca cultivada bajo diferentes combinaciones de sustrato y concentración de solución nutritiva en un sistema hidropónico NFT inteligente y recirculante bajo condiciones de Huamanga, Ayacucho. Para ello, se trabajó con dos tipos de sustrato, espuma fenólica y fibra de coco, y tres niveles de concentración de una solución nutritiva completa de referencia tipo Yamazaki: 75 %, 100 % y 125 %. La combinación de ambos factores originó seis tratamientos factoriales, orientados a comparar el crecimiento vegetativo, la producción de biomasa, el comportamiento operativo del sistema, la eficiencia de uso de agua y el desempeño agronómico integral.

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y nivel explicativo-experimental, mediante un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial 2×3 . El experimento estuvo conformado por seis tratamientos y seis bloques, con un total de 36 unidades experimentales. La unidad experimental correspondió a cada tubo de cultivo del sistema NFT, y en cada tubo se establecieron cuatro plantas de espinaca, consideradas submuestras o unidades de observación. Para el análisis estadístico se utilizó el promedio de las cuatro plantas evaluadas por tubo, con la finalidad de evitar la pseudorreplicación y mantener coherencia entre el tratamiento aplicado, la unidad experimental y el

análisis de varianza.

Las variables evaluadas incluyeron altura de planta, número de hojas, biomasa fresca sin raíz, biomasa seca sin raíz, materia seca, pH, conductividad eléctrica, volumen de agua repuesto, consumo total de agua y eficiencia de uso de agua. A partir de estas variables se buscó identificar la combinación de sustrato y concentración nutritiva con mejor comportamiento agronómico y operativo. Esta estructura permitió analizar no solo la respuesta productiva de la espinaca, sino también la estabilidad del sistema NFT y la relación entre producción de biomasa y uso del recurso hídrico.

La importancia de esta investigación radica en que genera evidencia técnica local para orientar la producción hidropónica de espinaca en sistemas NFT inteligentes y recirculantes, especialmente en contextos urbanos y periurbanos donde el suelo agrícola y el agua son recursos limitados. Asimismo, los resultados permiten establecer criterios para seleccionar combinaciones de sustrato y concentración nutritiva según el objetivo productivo: mayor desempeño integral, mayor acumulación de biomasa o mayor eficiencia hídrica. De esta manera, la tesis contribuye al fortalecimiento de alternativas productivas sostenibles, eficientes y adaptables a las condiciones reales de Huamanga, Ayacucho.

CAPÍTULO I.

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

La producción de hortalizas frescas, especialmente especies de hoja como la espinaca (*Spinacia oleracea* L.), es estratégica para el abastecimiento alimentario urbano por su ciclo corto, demanda continua y requerimiento de agua de buena calidad. Sin embargo, la expansión urbana, el cambio climático y la presión sobre el recurso hídrico vienen reduciendo las condiciones favorables para la producción agrícola en espacios urbanos y periurbanos. A nivel internacional, el *World Cities Report 2022* advierte que el crecimiento urbano exige replantear la planificación territorial para garantizar servicios esenciales, incluido el abastecimiento alimentario (UN-Habitat, 2022). Asimismo, el IPCC señala que el cambio climático afecta la disponibilidad de agua y la producción de alimentos, principalmente en territorios con menor capacidad de adaptación (Pörtner et al., 2022); en esa misma línea, Bren d'Amour et al. (2017) estimaron que la expansión urbana podría reemplazar entre 1.8 % y 2.4 % de las tierras de cultivo del mundo hacia 2030.

En este escenario, los sistemas hidropónicos recirculantes constituyen una alternativa tecnológica para producir hortalizas en espacios reducidos, sin depender directamente del suelo y con mayor control del agua y de los nutrientes (Fathidarehnejeh et al., 2024; Sonneveld and Voogt, 2009). En el Perú, la hidroponía se viene promoviendo como una técnica adaptable a distintas condiciones productivas, orientada a la seguridad alimentaria, la producción familiar y el emprendimiento agrícola. La *Guía técnica de cultivos hidropónicos* del Instituto Nacional de Innovación Agraria señala que esta tecnología permite producir cultivos sin suelo mediante soluciones nutritivas y módulos ajustables a diferentes escalas (Ingar-de la Cruz et al., 2023). Asimismo, experiencias nacionales han demostrado la posibilidad de automatizar sistemas NFT mediante sensores y componentes electrónicos para mejorar el control del pH, la conductividad eléctrica y el flujo de solución nutritiva (Inca Sánchez and Roselló Moreno, 2013).

A nivel local, Huamanga presenta una problemática asociada al crecimiento urbano, la reducción progresiva del suelo periurbano y la presión sobre el agua. La Municipalidad Provincial de Huamanga reconoce la necesidad de ordenar el crecimiento territorial mediante

el Plan de Desarrollo Urbano de la ciudad de Ayacucho 2021–2031 (Municipalidad Provincial de Huamanga, 2025). Además, el COEN–INDECI reportó afectación a medios de vida por ausencia de precipitaciones en Ayacucho durante el año 2023 (Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN) – INDECI, 2024); de forma complementaria, el Decreto Supremo N.º 104-2023-PCM declaró el estado de emergencia por peligro inminente ante déficit hídrico en diversos distritos del departamento (Presidencia del Consejo de Ministros (PCM), 2023; Gobierno Regional Ayacucho, 2023).

En este contexto, la presente investigación se enfoca en la producción de espinaca bajo un sistema hidropónico NFT inteligente y recirculante en condiciones de Huamanga, Ayacucho. Se evaluaron dos tipos de sustrato, espuma fenólica y fibra de coco, combinados con tres concentraciones de solución nutritiva Yamazaki: 75 %, 100 % y 125 %. El problema principal radica en la limitada evidencia experimental local sobre qué combinación de sustrato y concentración nutritiva permite obtener mejor crecimiento, rendimiento, eficiencia de uso de agua y desempeño integral en espinaca cultivada bajo sistema NFT.

Esta limitación se relaciona con la escasa validación local de tecnologías hidropónicas, la falta de comparación entre sustratos, la limitada información sobre concentraciones nutritivas en espinaca y la necesidad de controlar variables operativas como pH y conductividad eléctrica. En este cultivo, el crecimiento, la absorción mineral y la acumulación de biomasa dependen del equilibrio entre pH, CE, concentración total de nutrientes y condiciones del entorno radical (Gillespie et al., 2021; Bian et al., 2020; Fathidarehnejeh et al., 2024). Asimismo, evaluar concentraciones de 75 %, 100 % y 125 % permite determinar si una reducción o incremento de la solución nutritiva de referencia mejora o limita la respuesta agronómica del cultivo (Gao et al., 2020).

La ausencia de información local puede conducir al uso empírico de sustratos, sobresaturación de nutrientes, inestabilidad del pH y de la CE, incremento de costos, bajo rendimiento y menor eficiencia en el uso del agua. Además, en sistemas NFT recirculantes es necesario definir adecuadamente la unidad experimental, debido a que varias plantas pueden compartir un mismo tubo de cultivo. Por ello, para evitar pseudorreplicación, el presente estudio consideró como unidad experimental al tubo NFT, mientras que las plantas contenidas en cada tubo fueron tratadas como submuestras (Hurlbert, 1984).

Frente a esta problemática, la investigación aporta evidencia técnica local mediante la evaluación comparativa de seis combinaciones factoriales de sustrato y concentración nutri-

tiva en un sistema hidropónico NFT inteligente y recirculante. El estudio permite identificar la combinación con mejor comportamiento en crecimiento, biomasa, operación del sistema, eficiencia de uso de agua y desempeño integral, contribuyendo a orientar decisiones de manejo para una producción hidropónica de espinaca más eficiente, sostenible y adaptada a las condiciones reales de Huamanga.

1.1.1 Formulación del problema

1.1.1.1 Problema general

- ¿Cómo influyen las combinaciones de tipo de sustrato y concentración de solución nutritiva en el crecimiento, rendimiento y eficiencia de uso de agua de la espinaca cultivada en un sistema hidropónico NFT inteligente y recirculante bajo condiciones de Huamanga, Ayacucho?

1.1.1.2 Problemas específicos

- ¿Cómo varía el crecimiento de la espinaca, expresado en altura de planta y número de hojas, entre las combinaciones de sustrato y concentración de solución nutritiva?
- ¿Cómo varía el rendimiento de la espinaca, expresado en biomasa fresca, biomasa seca y materia seca, entre las combinaciones de sustrato y concentración de solución nutritiva?
- ¿Cómo se comportan el pH, la CE, el volumen de agua repuesto, el consumo total de agua y la eficiencia de uso de agua en cada combinación de tratamiento?
- ¿Qué combinación de sustrato y concentración de solución nutritiva presenta el mejor desempeño agronómico y operativo en la producción hidropónica de espinaca?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar comparativamente el comportamiento del crecimiento, rendimiento y eficiencia de uso de agua de la espinaca cultivada bajo diferentes combinaciones de sustrato y concentración de solución nutritiva en un sistema hidropónico NFT inteligente y recirculante bajo condiciones de Huamanga, Ayacucho.

1.2.2 Objetivos específicos

- Comparar el crecimiento de la espinaca, expresado en altura de planta y número de hojas, entre las combinaciones de sustrato y concentración de solución nutritiva.
- Comparar el rendimiento de la espinaca, expresado en biomasa fresca, biomasa seca y materia seca, entre las combinaciones de sustrato y concentración de solución nutritiva.
- Describir el comportamiento del pH, la CE, el volumen de agua repuesto, el consumo total de agua y la eficiencia de uso de agua en cada combinación de tratamiento.
- Identificar la combinación de sustrato y concentración de solución nutritiva con mejor desempeño agronómico y operativo en la producción hidropónica de espinaca.

1.3 Justificación e importancia

1.3.1 Justificación teórica

El estudio aporta al conocimiento sobre el comportamiento de la espinaca frente a distintas combinaciones de sustrato y concentración de solución nutritiva en un sistema hidropónico NFT inteligente y recirculante. Desde esta perspectiva, la investigación permite analizar la relación entre el medio de desarrollo radical, la disponibilidad de nutrientes y las variables operativas del sistema, especialmente el pH y la conductividad eléctrica, con el crecimiento y rendimiento del cultivo (Gruda, 2022; Fathidarehnijeh et al., 2024; Sulaiman et al., 2025).

1.3.2 Justificación práctica

Los resultados permiten identificar combinaciones de manejo entre sustrato y concentración nutritiva que favorecen el crecimiento, el rendimiento y la eficiencia de uso de agua en la producción de espinaca. Esta información tiene aplicación directa en contextos urbanos y periurbanos de Huamanga, donde la reducción del suelo agrícola cercano a la ciudad y la presión sobre el recurso hídrico demandan alternativas intensivas, estables y técnicamente viables para la producción de hortalizas frescas (Municipalidad Provincial de Huamanga, 2025; Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN) – INDECI, 2024).

1.3.3 Justificación metodológica

La investigación adopta un enfoque metodológico coherente con la estructura del experimento, al considerar el tubo de cultivo del sistema NFT como unidad experimental. En cada tubo se establecieron cuatro plantas de espinaca, consideradas submuestras, cuyo promedio representó el dato experimental utilizado en el análisis estadístico. Esta decisión permitió evitar la pseudorreplicación y mantener una correspondencia adecuada entre el tratamiento aplicado, la unidad experimental y el análisis de varianza. Además, se integró la medición de variables de crecimiento, rendimiento, consumo de agua y eficiencia de uso de agua, junto con el registro sistemático del pH y la CE. Esta estructura fortalece la trazabilidad del manejo, mejora la interpretación agronómica de los tratamientos y favorece la reproducibilidad del estudio bajo condiciones locales.

1.3.4 Justificación científica

La investigación genera evidencia cuantitativa sobre la respuesta de la espinaca a dos tipos de sustrato, espuma fenólica y fibra de coco, y a tres niveles de concentración de una solución nutritiva completa de referencia tipo Yamazaki. El estudio documenta las variaciones en crecimiento, rendimiento y eficiencia de uso de agua a nivel de unidad experimental, aportando información útil para la producción de hortalizas de hoja en sistemas hidropónicos inteligentes (Fathidarehniyeh et al., 2024; Bian et al., 2020; Sulaiman et al., 2025).

1.3.5 Justificación económica

Desde el punto de vista económico, la optimización del sustrato y de la concentración de la solución nutritiva puede reducir ineficiencias asociadas a la sobredosificación de nutrientes, al uso innecesario de insumos y a la variabilidad productiva. En consecuencia, el estudio aporta criterios técnicos para mejorar la productividad por unidad de agua y la eficiencia operativa del sistema, favoreciendo una producción más predecible y con menor riesgo de pérdidas por manejo inadecuado.

1.3.6 Justificación social

La producción local de hortalizas frescas mediante sistemas intensivos y recirculantes puede contribuir al abastecimiento urbano en contextos de expansión territorial y

presión hídrica. En ese sentido, el estudio posee relevancia social porque promueve alternativas de producción sostenibles para el entorno urbano y periurbano de Huamanga, fortalece la resiliencia alimentaria local y amplía las posibilidades de adopción de tecnologías eficientes por pequeños productores y unidades productivas cercanas a la ciudad (UN-Habitat, 2022; Pörtner et al., 2022; Senthamizh and Anbarasan, 2025).

1.3.7 Importancia

La importancia del estudio radica en que genera una base técnica local para orientar decisiones sobre el uso de sustratos, la concentración de la solución nutritiva y el manejo operativo en la producción de espinaca bajo un sistema hidropónico NFT inteligente y recirculante. Al emplear agua potable distribuida por SEDA Ayacucho y trabajar bajo condiciones reales de operación, los resultados tienen valor aplicado para recomendar estrategias de manejo que mejoren el crecimiento, el rendimiento y la eficiencia de uso de agua en un contexto de expansión urbana y restricción hídrica (Municipalidad Provincial de Huamanga, 2025; Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN) – INDECI, 2024).

1.4 Viabilidad del estudio

1.4.1 Viabilidad técnica, logística y financiera

El estudio fue viable en términos técnicos, logísticos y financieros, debido a que se contó con la infraestructura necesaria para ejecutar el ensayo en un sistema hidropónico NFT inteligente y recirculante. Se dispuso de una estructura de cultivo conformada por tubos NFT, sistema de recirculación, reservorio, sistema de bombeo, red de conducción y canastillas de soporte. Asimismo, se contó con sensores e instrumentos de monitoreo para el seguimiento del pH y la CE, además de agua potable distribuida por SEDA Ayacucho para la preparación, reposición y ajuste de la solución nutritiva. La ejecución del estudio contó con financiamiento mediante recursos del FOCAM, lo que permitió asegurar la disponibilidad de sustratos, sales nutritivas, materiales de operación, instrumentación menor y mantenimiento del sistema durante el periodo experimental.

1.4.2 Viabilidad operativa

La viabilidad operativa se sustentó en que el estudio evaluó dos tipos de sustrato, espuma fenólica y fibra de coco, y tres niveles de concentración de una solución nutritiva

completa de referencia tipo Yamazaki: 75 %, 100 % y 125 %. Estas variables pudieron implementarse con los recursos disponibles y mediante procedimientos de manejo técnicamente controlables. Además, el monitoreo sistemático del pH, la CE, el volumen de agua repuesto y el consumo total de agua permitió registrar el comportamiento del sistema durante el ciclo del cultivo y fortalecer la interpretación agronómica de los resultados.

1.4.3 Consideración metodológica

Desde el punto de vista metodológico, la investigación fue viable porque el diseño se organizó bajo un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial 2×3 , conformado por seis tratamientos, seis bloques y 36 unidades experimentales. La unidad experimental correspondió al tubo de cultivo del sistema NFT, y cada tubo estuvo conformado por cuatro plantas de espinaca. Las plantas dentro de cada tubo fueron consideradas submuestras, por lo que el dato utilizado para el análisis estadístico correspondió al promedio de las cuatro plantas por tubo. Esta estructura permitió evaluar los efectos del sustrato, de la concentración de solución nutritiva y de su interacción sobre las variables agronómicas principales.

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis general

Las combinaciones de tipo de sustrato y concentración de la solución nutritiva generan variaciones en el crecimiento, rendimiento y eficiencia de uso de agua de la espinaca cultivada en un sistema hidropónico NFT inteligente y recirculante bajo condiciones de Huamanga, Ayacucho.

1.5.2 Hipótesis específicas

- Las combinaciones de sustrato y concentración de solución nutritiva generan variaciones en el crecimiento de la espinaca, expresado en altura de planta y número de hojas.
- Las combinaciones de sustrato y concentración de solución nutritiva generan variaciones en el rendimiento de la espinaca, expresado en biomasa fresca, biomasa seca y materia seca.
- Las combinaciones de sustrato y concentración de solución nutritiva presentan com-

portamientos diferenciados en el pH, la CE, el volumen de agua repuesto, el consumo total de agua y la eficiencia de uso de agua.

- Al menos una combinación de sustrato y concentración de solución nutritiva presenta mejor desempeño agronómico y operativo en la producción hidropónica de espinaca.

1.6 Variables del estudio

1.6.1 Variables independientes

- Sustrato: medio físico de soporte radical utilizado durante el establecimiento y desarrollo del cultivo. Comprendió dos niveles: espuma fenólica y fibra de coco.
- Concentración de la solución nutritiva: proporción de una solución nutritiva completa de referencia tipo Yamazaki aplicada durante el ciclo de cultivo. Comprendió tres niveles: 75 %, 100 % y 125 %.

1.6.2 Variables dependientes

- Crecimiento vegetativo: evaluado mediante altura de planta, expresada en centímetros, y número de hojas verdaderas por planta.
- Rendimiento: evaluado mediante biomasa fresca sin raíz, biomasa seca sin raíz y porcentaje de materia seca.
- Uso de agua: evaluado mediante agua acumulada repuesta y eficiencia de uso de agua. Esta última se calculó mediante la relación entre la biomasa fresca producida y el volumen de agua repuesto durante el ciclo de cultivo.

$$EUA = \frac{\text{Biomasa fresca producida}}{\text{Agua acumulada repuesta}}$$

Donde la EUA se expresó en g L^{-1} .

- Operación del sistema: evaluada mediante el pH, la conductividad eléctrica y el volumen de agua repuesto durante el ciclo de cultivo.

1.6.3 Variables de control

- Material vegetal: mismo lote de semilla y plántulas con edad y vigor semejantes.
- Densidad de plantación: cuatro plantas por tubo de cultivo.
- Arquitectura del sistema: misma configuración física e hidráulica del sistema NFT.

- Operación hidráulica: mismo caudal objetivo y rutina de recirculación.
- Condiciones ambientales: luz, temperatura y ventilación lo más homogéneas posible.
- Manejo sanitario y operativo: limpieza, desinfección, reposición de solución nutritiva y criterios de cosecha uniformes.
- Instrumentación: sensores calibrados y mismo intervalo de registro.
- Calidad del agua: uso de agua potable distribuida por SEDA Ayacucho para todos los tratamientos.

1.7 Operacionalización de variables

Tabla 1.1. Operacionalización de las variables del estudio

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Instrumento / registro
Variable independiente					
Tipo de sustrato	Medio físico utilizado como soporte para el desarrollo radical de las plantas en sistemas de cultivo sin suelo.	Se evaluó mediante dos tipos de sustrato asignados a las unidades experimentales: espuma fenólica y fibra de coco.	Sustrato de cultivo	S1 = espuma fenólica. S2 = fibra de coco.	Registro del tratamiento asignado y verificación visual del sustrato utilizado en cada tubo de cultivo.
Concentración de la solución nutritiva	Nivel relativo de sales nutritivas disponibles en la solución utilizada para el crecimiento de las plantas en el sistema hidropónico.	Se evaluó mediante tres concentraciones de una solución nutritiva completa de referencia tipo Yamazaki: 75 %, 100 % y 125 %.	Nutrición hidropónica	N1 = 75 %. N2 = 100 %. N3 = 125 %.	Bitácora de preparación de solución nutritiva, registro de formulación y control de la concentración asignada.
Variables dependientes					
Crecimiento de la espinaca	Proceso de desarrollo vegetativo de la planta, expresado mediante el incremento de tamaño y formación de hojas durante el ciclo de cultivo.	Se evaluó mediante mediciones semanales de altura de planta y conteo del número de hojas en las plantas establecidas dentro de cada tubo. El dato experimental correspondió al promedio por tubo.	Crecimiento vegetativo	Altura de planta (cm). Número de hojas (n).	Regla o cinta métrica, conteo directo y ficha semanal de crecimiento.
Rendimiento de la espinaca	Producción obtenida por el cultivo al momento de la cosecha, expresada principalmente como acumulación de biomasa vegetal.	Se evaluó mediante el peso fresco y seco de la parte aérea sin raíz. El dato experimental correspondió al promedio de las plantas evaluadas por tubo.	Producción de biomasa	Biomasa fresca sin raíz (g/planta). Biomasa seca sin raíz (g/planta). Materia seca (%).	Balanza digital, estufa de secado, registro final de cosecha y bitácora de evaluación.

Continúa en la siguiente página

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Instrumento / registro
Comportamiento operativo del sistema	Condiciones de funcionamiento del sistema hidropónico relacionadas con la estabilidad química de la solución nutritiva y el manejo del agua.	Se evaluó mediante el registro periódico del pH, la conductividad eléctrica y el volumen de agua repuesto durante el ciclo de cultivo.	Operación del sistema NFT	pH de la solución nutritiva. CE (dS m ⁻¹ o mS cm ⁻¹). Volumen de agua repuesto (L).	Medidor de pH, medidor de CE, recipiente graduado y bitácora de operación.
Eficiencia de uso de agua	Relación entre la biomasa producida y el volumen de agua utilizado durante el ciclo de cultivo.	Se calculó dividiendo la biomasa fresca producida entre el volumen acumulado de agua repuesto durante el ciclo de cultivo.	Eficiencia hídrica	$EUA = \frac{\text{Biomasa fresca}}{\text{Agua repuesta}}$ EUA (g/L).	Cálculo a partir de la biomasa fresca y el registro de agua repuesta.
Variables de control					
Condiciones de manejo del cultivo	Conjunto de factores que deben mantenerse homogéneos para reducir sesgos durante la evaluación de los tratamientos.	Se estandarizaron el material vegetal, la densidad de plantación, la arquitectura del sistema, la operación hidráulica, el manejo sanitario y la fuente de agua.	Estandarización experimental	Mismo lote de semilla. Cuatro plantas por tubo. Misma arquitectura del sistema. Misma fuente de agua.	Registro de lote, checklist técnico, bitácora de manejo y verificación operativa del sistema.

Nota. UE = unidad experimental, correspondiente al tubo de cultivo del sistema hidropónico NFT. UO = unidad de observación, correspondiente a la planta evaluada dentro de cada tubo. Cada tubo estuvo conformado por cuatro plantas, consideradas submuestras; el dato utilizado para el análisis estadístico fue el promedio de dichas plantas. La concentración de la solución nutritiva se expresa respecto a una solución nutritiva completa de referencia tipo Yamazaki.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

2.1.1 A nivel internacional

Gillespie et al. (2021) desarrollaron la investigación titulada *High Nutrient Concentrations of Hydroponic Solution Can Improve Growth and Nutrient Uptake of Spinach (Spinacia oleracea L.) Grown in Acidic Nutrient Solution*, realizada en Estados Unidos, con el objetivo de evaluar el efecto de diferentes niveles de pH y concentraciones de nutrientes sobre el crecimiento y la absorción mineral de espinaca cultivada en condiciones hidropónicas. La investigación fue de tipo experimental y se desarrolló bajo un sistema hidropónico de solución nutritiva, considerando diferentes niveles de acidez y concentración nutricional. Las variables evaluadas comprendieron crecimiento vegetal, biomasa aérea, biomasa radicular y absorción de nutrientes. Los resultados evidenciaron que la reducción del pH afectó negativamente el crecimiento de la espinaca; sin embargo, las concentraciones elevadas de nutrientes permitieron mejorar la producción de biomasa y la absorción mineral bajo condiciones de acidez. Se concluyó que el manejo conjunto del pH y de la concentración de la solución nutritiva es determinante para optimizar el desarrollo de la espinaca en sistemas hidropónicos.

Öztekin et al. (2018) realizaron la investigación titulada *Growing Spinach (Spinacia oleracea L.) in a Floating Hydroponic System*, desarrollada en Turquía, con el objetivo de evaluar el comportamiento productivo de la espinaca cultivada en un sistema hidropónico flotante. La investigación fue de tipo experimental y se ejecutó en condiciones de invernadero, utilizando soluciones nutritivas con diferentes concentraciones. Las variables evaluadas incluyeron crecimiento de planta, número de hojas, peso fresco, rendimiento y calidad comercial del cultivo. Los resultados mostraron que la disminución de la concentración de la solución nutritiva redujo el rendimiento de la espinaca, mientras que las concentraciones adecuadas favorecieron el crecimiento y la producción de biomasa fresca. Los autores concluyeron que la espinaca puede producirse eficientemente en sistemas hidropónicos, siempre que se mantenga un manejo adecuado de la solución nutritiva.

Riaño-Castillo et al. (2019) publicaron en Colombia el artículo titulado *Changes in Nutrient Levels in Hydroponic Solution of Baby Spinach (Spinacia oleracea L.), for Future Ap-*

plication in Aquaponics, con el objetivo de determinar los cambios en los niveles de nutrientes presentes en la solución hidropónica utilizada para el cultivo de espinaca baby. La investigación fue de tipo experimental y se desarrolló mediante un sistema hidropónico de cama flotante, utilizando plántulas de espinaca cultivadas en solución nutritiva. Las variables evaluadas comprendieron parámetros fisicoquímicos de la solución, número de hojas, longitud de hojas, área foliar, peso fresco y peso seco de la parte aérea. Los resultados evidenciaron variaciones en la concentración de nutrientes durante el ciclo de cultivo, así como un comportamiento favorable de la espinaca bajo condiciones hidropónicas. Se concluyó que el seguimiento de la solución nutritiva permite comprender la dinámica de absorción de nutrientes y mejorar el manejo del cultivo en sistemas sin suelo.

2.1.2 A nivel nacional

Ingar-de la Cruz et al. (2023) elaboró la *Guía técnica de cultivos hidropónicos*, publicada por el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), en el Perú, con el objetivo de orientar de manera práctica a la población peruana en el uso de la hidroponía como técnica de producción agrícola, contribuyendo a la seguridad alimentaria y promoviendo su adopción como alternativa de emprendimiento. El documento fue de carácter técnico y descriptivo, y desarrolló aspectos relacionados con los tipos de sistemas hidropónicos, la preparación de soluciones nutritivas, el manejo del cultivo, la sanidad vegetal y las recomendaciones básicas para la implementación de módulos hidropónicos. Se concluyó que la hidroponía constituye una alternativa viable para la producción de hortalizas en espacios reducidos, debido a su eficiencia en el uso del agua, su adaptabilidad y su potencial para fortalecer la producción familiar y comercial.

Granda Delgado (2022) desarrolló la tesis titulada *Diseño de un sistema de control automático de pH y conductividad eléctrica para garantizar el balance de la solución nutritiva de un sistema hidropónico NFT en la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo*, realizada en Lambayeque, Perú, con el objetivo de diseñar e implementar un sistema de control automático de pH y conductividad eléctrica en un sistema hidropónico NFT. La investigación fue de tipo experimental y se ejecutó mediante la construcción de dos sistemas hidropónicos NFT paralelos: uno con control automático de pH y conductividad eléctrica, y otro con control manual. Para el control automático se emplearon sensores de pH y conductividad eléctrica, tarjeta Arduino, bombas y electroválvulas. Las variables evaluadas

estuvieron relacionadas con el balance de la solución nutritiva y el desarrollo del cultivo de lechuga. Los resultados permitieron comprobar que el control automático favorece el mantenimiento de los parámetros de la solución nutritiva dentro de rangos adecuados. Se concluyó que la automatización del pH y la conductividad eléctrica contribuye a mejorar el manejo de los sistemas NFT.

(Inca Sánchez and Roselló Moreno, 2013) realizaron la investigación titulada *Automatización y control del sistema NFT para cultivos hidropónicos*, desarrollada en la Universidad Ricardo Palma, en Lima, Perú, con el objetivo de aplicar conceptos de ingeniería electrónica al diseño de un sistema de control y automatización para cultivos hidropónicos mediante la técnica NFT. La investigación fue de tipo aplicada y tecnológica, y comprendió el diseño del sistema de control, la lógica de programación, la selección de componentes electrónicos y la implementación de una planta hidropónica a escala. Las variables consideradas estuvieron relacionadas con el funcionamiento del sistema NFT, la automatización del proceso y el control operativo de los componentes hidráulicos y electrónicos. Los resultados demostraron que el sistema de automatización y control fue implementado satisfactoriamente, cumpliendo con los requerimientos técnicos planteados. Se concluyó que la automatización del sistema NFT es factible y permite mejorar el manejo de cultivos hidropónicos.

(Ccahua Zamora et al., 2020) desarrollaron la investigación titulada *Estudio de prefactibilidad de un proyecto de producción de lechuga Iceberg, espinaca baby y tomate Cherry*, realizada en la Universidad San Ignacio de Loyola, en Lima, Perú, con el objetivo de evaluar la factibilidad técnica, económica y comercial de una empresa productora y comercializadora de hortalizas hidropónicas. La investigación fue de tipo aplicada y de enfoque técnico-económico, considerando el análisis de mercado, la ingeniería del proyecto, la selección de equipos, la infraestructura productiva y la proyección de demanda. Entre los cultivos considerados se incluyó la espinaca baby, lo que permitió analizar su potencial productivo y comercial dentro de un sistema hidropónico orientado al mercado urbano. Los resultados mostraron la existencia de una demanda potencial para hortalizas hidropónicas y la posibilidad de estructurar un sistema productivo comercial bajo condiciones controladas. Se concluyó que la producción hidropónica de hortalizas de hoja presenta viabilidad como alternativa de emprendimiento agroindustrial.

2.1.3 A nivel local

Prado Allcca (2018) desarrolló la investigación titulada *Efecto de tres concentraciones de nitrato de calcio en el rendimiento de Lactuca sativa L. "lechuga", en cultivo hidropónico, Ayacucho - 2017*, realizada en Ayacucho, Perú, con el objetivo de evaluar el efecto de tres concentraciones de nitrato de calcio sobre el rendimiento de lechuga en cultivo hidropónico. La investigación fue de tipo experimental y se desarrolló bajo un sistema hidropónico NFT, considerando diferentes concentraciones de nitrato de calcio como tratamientos. Las variables evaluadas incluyeron rendimiento, peso fresco, altura de planta y parámetros operativos de la solución nutritiva, como pH, conductividad eléctrica y temperatura. Los resultados evidenciaron que el manejo de la concentración nutritiva influyó en el comportamiento productivo de la lechuga bajo condiciones locales de Ayacucho. Se concluyó que el cultivo hidropónico NFT constituye una alternativa viable para la producción de hortalizas de hoja en la región.

Chilcce Prado (2023) realizó la investigación titulada *Construcción y evaluación de un sistema aeropónico vertical asistido por la plataforma electrónica Arduino en la producción de lechuga*, desarrollada en el distrito de Carmen Alto, provincia de Huamanga, región Ayacucho, con el objetivo de evaluar la construcción de un sistema aeropónico vertical asistido por Arduino para la producción de lechuga. La investigación fue de tipo experimental y tecnológica, y comprendió la construcción del sistema, la instalación de sensores, el control del riego y el seguimiento de la solución nutritiva. Las variables evaluadas incluyeron crecimiento de la planta, rendimiento, humedad radicular, pH y conductividad eléctrica de la solución nutritiva. Los resultados mostraron que la plataforma Arduino permitió monitorear variables importantes del sistema, manteniendo condiciones adecuadas para el desarrollo del cultivo. Se concluyó que la automatización mediante herramientas electrónicas contribuye al manejo eficiente de sistemas intensivos de producción vegetal.

Jayo Huamán (2018) desarrolló la tesis titulada *Niveles de guano de isla y dosis de microorganismos eficaces en el rendimiento de espinaca (Spinacia oleracea L.) Canaán, 2750 msnm - Ayacucho*, realizada en el Centro Experimental Canaán de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, con el objetivo de determinar el nivel de guano de isla y la dosis de microorganismos eficaces que mejoren el rendimiento de espinaca bajo condiciones locales. La investigación fue de tipo experimental y se estableció mediante tratamientos combinados de fertilización orgánica y microorganismos eficaces. Las variables evaluadas incluye-

ron altura de planta, número de hojas, rendimiento y rentabilidad económica. Los resultados evidenciaron diferencias en el rendimiento de la espinaca según los niveles de fertilización aplicados. Se concluyó que el manejo nutricional influye directamente en la productividad del cultivo de espinaca en condiciones de Ayacucho.

Janampa Huamaní (2018) realizó la investigación titulada *Niveles de estiércol de ovino y formas de siembra en el rendimiento de espinaca (Spinacia oleracea L.) Canaán, 2750 msnm - Ayacucho*, desarrollada en Ayacucho, Perú, con el objetivo de evaluar el efecto de diferentes niveles de estiércol de ovino y formas de siembra sobre el rendimiento de espinaca. La investigación fue de tipo experimental y consideró tratamientos relacionados con dosis de abonamiento orgánico y sistemas de siembra. Las variables evaluadas comprendieron rendimiento, crecimiento vegetativo y respuesta del cultivo a las condiciones de manejo agro-nómico. Los resultados mostraron que el mayor rendimiento se obtuvo con niveles adecuados de estiércol de ovino, alcanzando rendimientos superiores bajo siembra en melgas. Se concluyó que la fertilización y la forma de siembra influyen significativamente en la producción de espinaca en condiciones locales.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Sustratos de cultivo

2.2.1.1 Definición

Los sustratos de cultivo son materiales utilizados como soporte físico para el desarrollo radicular en sistemas de producción sin suelo. Su función principal no es aportar nutrientes como el suelo agrícola, sino sostener la planta y favorecer el contacto entre la raíz, el agua, el oxígeno y la solución nutritiva (Sonneveld and Voogt, 2009; Savvas and Gruda, 2018).

2.2.1.2 Funciones

Las funciones principales del sustrato son brindar anclaje a la planta, retener humedad, permitir la aireación radicular y mantener estabilidad física durante el crecimiento. Por ello, su selección debe considerar porosidad, capacidad de retención de agua, drenaje, estabilidad estructural y posible efecto sobre el pH y la conductividad eléctrica (Sonneveld and Voogt, 2009; Resh, 2022).

2.2.1.3 Espuma fenólica

La espuma fenólica es un sustrato sintético e inerte empleado principalmente en la germinación y establecimiento inicial de plántulas. Su uso se justifica por su uniformidad, facilidad de manejo y buena aireación, características que permiten un desarrollo radicular ordenado antes del trasplante al sistema hidropónico (Resh, 2022).

2.2.1.4 Fibra de coco

La fibra de coco es un sustrato orgánico obtenido del mesocarpio del coco y se emplea por su capacidad de retención de humedad y aireación radicular. Sin embargo, sus propiedades pueden variar según procedencia, granulometría, lavado y salinidad inicial, por lo que debe manejarse adecuadamente antes de su uso en hidroponía (Abad et al., 2005; Xiong et al., 2017).

2.2.2 Solución nutritiva

2.2.2.1 Nutrición mineral

La nutrición mineral comprende el suministro de elementos esenciales requeridos por la planta para completar su crecimiento y producción. En hidroponía, estos elementos se incorporan mediante una solución nutritiva, por lo que el manejo de su composición, concentración, pH y conductividad eléctrica es determinante para la absorción radicular (Sonneveld and Voogt, 2009; Savvas and Gruda, 2018).

2.2.2.2 Solución nutritiva Yamazaki

La solución nutritiva tipo Yamazaki es una formulación empleada como referencia en cultivos hidropónicos por su balance de macro y micronutrientes. En la presente investigación se utiliza como base para preparar las proporciones de 75 %, 100 % y 125 %, manteniendo la relación interna entre nutrientes y variando solo la oferta total de sales minerales (Yamazaki, 1982; Maneejantra et al., 2016).

2.2.2.3 Concentración nutritiva

La concentración nutritiva expresa la cantidad total de nutrientes disponibles en la solución. En espinaca hidropónica, variaciones en la concentración pueden modificar el crecimiento, la acumulación de biomasa y la absorción mineral; por ello, comparar

75 %, 100 % y 125 % permite determinar qué nivel favorece mejor el desarrollo del cultivo (Gillespie et al., 2021; Öztekin et al., 2018).

2.2.2.4 pH

El pH de la solución nutritiva regula la disponibilidad química de los nutrientes y su absorción por las raíces. En espinaca, valores inadecuados de pH pueden limitar el crecimiento; sin embargo, una concentración nutritiva adecuada puede amortiguar parcialmente los efectos negativos de condiciones ácidas (Gillespie et al., 2021; Sonneveld and Voogt, 2009).

2.2.2.5 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) es un indicador de la concentración total de sales disueltas en la solución nutritiva. En sistemas hidropónicos, su control permite estimar la fuerza nutritiva disponible para el cultivo, aunque debe interpretarse junto con el pH, el estado de la planta y la reposición de agua durante el ciclo productivo (Sonneveld and Voogt, 2009; Öztekin et al., 2018).

2.2.3 Espinaca (*Spinacia oleracea* L.)

2.2.3.1 Características generales

La espinaca (*Spinacia oleracea* L.) es una hortaliza de hoja de ciclo corto, cultivada principalmente por su biomasa foliar. Debido a su rápido crecimiento y sensibilidad al ambiente radicular, constituye un cultivo adecuado para evaluar tratamientos de sustrato y solución nutritiva en sistemas hidropónicos (Gillespie et al., 2021; Öztekin et al., 2018).

2.2.3.2 Requerimientos nutricionales

Los requerimientos nutricionales de la espinaca están asociados a la formación de hojas, expansión foliar y acumulación de biomasa fresca. Por ello, el suministro equilibrado de nitrógeno, potasio, calcio, magnesio y micronutrientes resulta necesario para sostener un crecimiento uniforme en condiciones hidropónicas (Maneejantra et al., 2016; Sonneveld and Voogt, 2009).

2.2.3.3 Crecimiento

El crecimiento de la espinaca puede evaluarse mediante altura de planta, número de hojas y desarrollo foliar. Estos indicadores permiten observar la respuesta vegetativa frente al tipo de sustrato y al nivel de concentración nutritiva aplicado durante el ciclo de cultivo (Gillespie et al., 2021; Maneejantra et al., 2016).

2.2.3.4 Rendimiento

El rendimiento de la espinaca se expresa principalmente a través del peso fresco comercial obtenido por planta o por unidad experimental. En hidroponía, este indicador permite determinar la eficiencia agronómica de los tratamientos y establecer qué combinación de sustrato y solución nutritiva mejora la producción del cultivo (Öztekin et al., 2018; Gillespie et al., 2021).

2.3 Definición de términos

Hidroponía: método de cultivo sin suelo en el cual los nutrientes minerales se suministran principalmente mediante una solución nutritiva, con o sin uso de sustratos como soporte físico para el desarrollo de la planta (Savvas and Gruda, 2018; Sonneveld and Voogt, 2009).

Sistema hidropónico NFT inteligente y recirculante: sistema de cultivo sin suelo basado en la técnica de película nutritiva (*Nutrient Film Technique*), en el que una lámina delgada de solución nutritiva circula por los canales de cultivo, retorna al reservorio y puede ser monitoreada mediante sensores, registros operativos y ajustes periódicos de variables críticas como pH, conductividad eléctrica y volumen de agua repuesto (Sulaiman et al., 2025; Quispe, 2016).

NFT (*Nutrient Film Technique*): técnica hidropónica recirculante en la que una película delgada de solución nutritiva fluye a través de canales o tubos de cultivo, permitiendo el contacto continuo de las raíces con agua, nutrientes y oxígeno (Yang et al., 2024; Quispe, 2016).

Módulo hidropónico: conjunto operativo del sistema NFT conformado por reservorio, bomba, red de tuberías, canales o tubos de cultivo y solución nutritiva recirculante. En esta investigación, el módulo constituye una unidad operativa del sistema, pero no la unidad experimental del análisis estadístico.

Tubo de cultivo NFT: canal o conducto del sistema hidropónico NFT donde se establecen las plantas y circula la solución nutritiva. En esta investigación, cada tubo de cultivo constituyó una unidad experimental, debido a que sobre este se consolidó la información de las plantas evaluadas

para el análisis estadístico.

Unidad experimental: menor unidad del experimento sobre la cual se aplica y evalúa una combinación de tratamiento dentro del diseño experimental. En la presente investigación correspondió a cada tubo de cultivo del sistema hidropónico NFT, conformado por cuatro plantas de espinaca. El valor utilizado en el análisis estadístico fue el promedio de las cuatro plantas establecidas en cada tubo.

Unidad de observación: elemento sobre el cual se realizan las mediciones directas de las variables de respuesta. En esta investigación correspondió a la planta de espinaca evaluada dentro de cada tubo de cultivo.

Submuestra: planta evaluada dentro de una misma unidad experimental. Las cuatro plantas ubicadas en cada tubo compartieron condiciones comunes de sustrato, flujo de solución nutritiva y microambiente, por lo que no fueron consideradas repeticiones independientes; su promedio representó el dato de la unidad experimental.

Sustrato: medio físico que sostiene la planta y contribuye a regular la retención de agua, la aireación y la estabilidad del entorno radical en sistemas de cultivo sin suelo (Sonneveld and Voogt, 2009; Ferrarezi et al., 2024).

Espuma fenólica: material de soporte inerte, poroso y uniforme, empleado comúnmente en la germinación, establecimiento y sostén inicial de plántulas por su capacidad de retener humedad y facilitar el desarrollo radicular.

Fibra de coco: sustrato orgánico renovable obtenido del mesocarpio del coco, caracterizado por su capacidad de retención de humedad, aireación y soporte radical. Su calidad puede variar según el grado de lavado, granulometría y salinidad inicial (Machado et al., 2021; Evans and Stamps, 1996).

Solución nutritiva: mezcla acuosa de sales fertilizantes que aporta los macro y micronutrientes esenciales para el crecimiento y rendimiento de las plantas en sistemas hidropónicos (Sonneveld and Voogt, 2009).

Solución nutritiva completa de referencia tipo Yamazaki: formulación nutritiva balanceada empleada como base técnica para el cultivo hidropónico de hortalizas de hoja. Esta formulación está compuesta por una mezcla de sales inorgánicas de alta solubilidad que garantizan el suministro de macronutrientes esenciales; principalmente contiene nitrato de potasio (KNO_3), nitrato de calcio tetrahidratado ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), fosfato monoamónico ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) y sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). A través de estos compuestos, la solución aporta

los niveles idóneos de nitrógeno (en forma de nitratos y amonio), potasio, calcio, fósforo, magnesio y azufre. Asimismo, incluye una dotación completa de micronutrientes (hierro quelatado, boro, manganeso, zinc, cobre y molibdeno) vitales para el metabolismo y desarrollo foliar. En esta investigación, la composición estándar con todos estos elementos se estableció como el nivel óptimo teórico (100 %), utilizándose como referencia exacta para formular y evaluar las concentraciones proporcionales reducidas al 75 % y aumentadas al 125 % (Gao et al., 2020).

Concentración de la solución nutritiva: nivel relativo de la oferta total de nutrientes con respecto a una formulación de referencia. En esta investigación se expresó como 75 %, 100 % y 125 % de la solución nutritiva completa de referencia tipo Yamazaki, y se controló operativamente mediante la preparación de la solución y el seguimiento de la conductividad eléctrica (Fathidarehnijeh et al., 2024).

pH: medida del grado de acidez o alcalinidad de la solución nutritiva, que influye en la disponibilidad y absorción de nutrientes por las raíces (Gillespie et al., 2021).

CE o EC (conductividad eléctrica): indicador operativo de la concentración iónica total de la solución nutritiva, expresado comúnmente en mS/cm o dS/m. En sistemas hidropónicos, permite realizar el seguimiento del manejo nutricional y verificar la diferenciación entre niveles de concentración (Fathidarehnijeh et al., 2024).

Agua fuente: agua utilizada para la preparación, reposición y ajuste de la solución nutritiva. En esta investigación correspondió al agua potable distribuida por SEDA Ayacucho, cuya calidad puede influir en el pH inicial, la conductividad eléctrica y el balance iónico efectivo de la solución.

Volumen de agua repuesto: cantidad de agua añadida al sistema para restituir el nivel operativo de la solución nutritiva durante el ciclo de cultivo. En esta investigación se registró como indicador operativo descriptivo por tratamiento.

Consumo de agua: volumen acumulado de agua repuesta durante el ciclo de cultivo, asociado principalmente a la transpiración de las plantas, evaporación y pérdidas inevitables del sistema. En esta investigación se interpretó como variable operativa descriptiva.

Eficiencia de uso de agua (EUA): relación entre la biomasa fresca producida y el volumen acumulado de agua repuesta durante el ciclo productivo. En esta investigación se expresó en g/L y se utilizó como indicador operativo para comparar el desempeño hídrico de los tratamientos.

Crecimiento: conjunto de cambios cuantificables del desarrollo vegetativo de la planta. En esta investigación se evaluó mediante altura de planta y número de hojas.

Rendimiento: respuesta productiva del cultivo expresada en términos de biomasa cose-

chada. En esta investigación se evaluó mediante biomasa fresca sin raíz, biomasa seca sin raíz y porcentaje de materia seca. Los días a cosecha se consideraron como criterio metodológico del ciclo de cultivo y no como variable comparativa principal, debido a que la cosecha se realizó a los 42 días después del trasplante.

Materia seca: proporción de biomasa que permanece después de eliminar el contenido de agua del tejido vegetal mediante secado. Se calcula a partir de la relación entre biomasa seca y biomasa fresca, y permite verificar la acumulación real de materia vegetal.

Hidroponía inteligente: enfoque de producción hidropónica que integra sensores, automatización, monitoreo y registro de variables operativas para mejorar la precisión, estabilidad y trazabilidad del sistema productivo (Sulaiman et al., 2025).

Tratamiento: combinación específica de un tipo de sustrato y un nivel de concentración de solución nutritiva. En esta investigación, los tratamientos resultaron del arreglo factorial entre dos sustratos y tres concentraciones nutritivas, generando seis combinaciones: espuma fenólica con 75 %, 100 % y 125 %, y fibra de coco con 75 %, 100 % y 125 %.

Diseño de bloques completos al azar (DBCA): diseño experimental en el que las unidades experimentales se agrupan en bloques para controlar fuentes de variación no atribuibles a los tratamientos. En esta investigación, el DBCA se aplicó con arreglo factorial 2×3 , seis tratamientos y seis bloques.

Arreglo factorial 2×3 : estructura experimental que permite evaluar simultáneamente dos factores. En esta investigación, el primer factor fue el tipo de sustrato, con dos niveles, y el segundo factor fue la concentración de la solución nutritiva, con tres niveles.

Pseudorreplicación: error metodológico que ocurre cuando submuestras que comparten una misma unidad experimental son tratadas como repeticiones independientes. En esta investigación se evitó este problema al considerar el tubo NFT como unidad experimental y al utilizar el promedio de las cuatro plantas por tubo para el análisis estadístico.

CAPÍTULO III.

METODOLOGÍA

3.1 Tipo y nivel de investigación

3.1.1 Enfoque de la investigación

La investigación presentó un enfoque cuantitativo, debido a que se basó en la medición objetiva, el registro sistemático y el análisis estadístico de variables agronómicas, productivas y operativas del cultivo de espinaca (*Spinacia oleracea* L.) producido bajo un sistema hidropónico NFT inteligente y recirculante.

3.1.2 Tipo de investigación

La investigación fue de tipo aplicada, porque estuvo orientada a generar información técnica útil para mejorar el manejo de la espinaca hidropónica mediante la comparación de sustratos y concentraciones de solución nutritiva Yamazaki, con énfasis en crecimiento, rendimiento y eficiencia de uso de agua.

3.1.3 Nivel de investigación

El estudio correspondió a un nivel explicativo-experimental, debido a que evaluó el efecto de dos factores de manejo, tipo de sustrato y concentración de solución nutritiva, sobre variables de respuesta del cultivo. Asimismo, permitió analizar si la respuesta de la espinaca dependía de la interacción entre ambos factores.

3.1.4 Diseño y distribución experimental

Se empleó un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con arreglo factorial 2×3 . Los factores evaluados fueron el tipo de sustrato y la concentración de solución nutritiva Yamazaki. El factor sustrato estuvo conformado por dos niveles: espuma fenólica y fibra de coco; mientras que el factor concentración nutritiva estuvo conformado por tres niveles: 75 %, 100 % y 125 % de la solución nutritiva Yamazaki. La combinación de ambos factores originó seis tratamientos factoriales.

Tabla 3.1. Tratamientos evaluados en el sistema hidropónico NFT

Tratamiento	Sustrato	Solución Yamazaki	Descripción
T1	Espuma fenólica	75 %	Espuma fenólica con solución nutritiva Yamazaki al 75 %.
T2	Espuma fenólica	100 %	Espuma fenólica con solución nutritiva Yamazaki al 100 %.
T3	Espuma fenólica	125 %	Espuma fenólica con solución nutritiva Yamazaki al 125 %.
T4	Fibra de coco	75 %	Fibra de coco con solución nutritiva Yamazaki al 75 %.
T5	Fibra de coco	100 %	Fibra de coco con solución nutritiva Yamazaki al 100 %.
T6	Fibra de coco	125 %	Fibra de coco con solución nutritiva Yamazaki al 125 %.

Nota. Cada tratamiento correspondió a una combinación específica entre tipo de sustrato y concentración de solución nutritiva Yamazaki.

El experimento estuvo conformado por 36 unidades experimentales distribuidas en seis bloques. Cada unidad experimental correspondió a un tubo de cultivo NFT, dentro del cual se establecieron cuatro plantas de espinaca. Las plantas ubicadas en cada tubo fueron consideradas submuestras o unidades de observación; por tanto, el dato utilizado en el análisis estadístico correspondió al promedio de las cuatro plantas evaluadas por tubo. Esta decisión permitió mantener la correspondencia entre tratamiento, unidad experimental y análisis estadístico, evitando la pseudorreplicación.

El criterio de bloqueo se estableció en función de la posición relativa de los tubos dentro de los módulos hidropónicos. Los tubos se ubicaron en diferentes alturas dentro de la estructura NFT, por lo que pudieron estar expuestos a variaciones de radiación solar, ventilación y microambiente. En consecuencia, cada bloque agrupó tubos ubicados en una posición equivalente dentro de cada módulo, con la finalidad de controlar la variabilidad espacial asociada a la altura y exposición lumínica. De esta manera, el efecto de bloque permitió separar la variación propia de la posición del tubo del efecto atribuible a los tratamientos.

Tabla 3.2. Criterio de bloqueo aplicado en el sistema hidropónico NFT

Bloque	Tubo posicional	Criterio de agrupación
I	Tb1	Tubos ubicados en la primera posición relativa dentro de cada módulo.
II	Tb2	Tubos ubicados en la segunda posición relativa dentro de cada módulo.
III	Tb3	Tubos ubicados en la tercera posición relativa dentro de cada módulo.
IV	Tb4	Tubos ubicados en la cuarta posición relativa dentro de cada módulo.
V	Tb5	Tubos ubicados en la quinta posición relativa dentro de cada módulo.
VI	Tb6	Tubos ubicados en la sexta posición relativa dentro de cada módulo.

Nota. El bloqueo se realizó por posición del tubo dentro de la estructura NFT, con el propósito de controlar la variación asociada a altura, radiación solar, ventilación y microambiente.

La estructura experimental se organizó de manera que cada bloque incluyera los seis tratamientos, permitiendo comparar las combinaciones de sustrato y concentración nutritiva bajo posiciones equivalentes dentro del sistema NFT. Los módulos hidropónicos se utilizaron como unidades operativas para facilitar el manejo diferenciado de cada tratamiento, especialmente la preparación, conducción y recirculación de la solución nutritiva correspondiente.

Tabla 3.3. Estructura experimental por bloques y tratamientos

Bloque	M1	M2	M3	M4	M5	M6
I	T1	T2	T3	T4	T5	T6
II	T1	T2	T3	T4	T5	T6
III	T1	T2	T3	T4	T5	T6
IV	T1	T2	T3	T4	T5	T6
V	T1	T2	T3	T4	T5	T6
VI	T1	T2	T3	T4	T5	T6

Nota. M1–M6 corresponden a módulos operativos asociados al manejo de los tratamientos T1–T6. Tb1–Tb6 corresponden a los tubos ubicados en diferentes posiciones dentro de cada módulo. Cada fila representa un bloque formado por tubos de posición equivalente.

Es importante precisar que el tratamiento correspondió a la combinación factorial entre sustrato y concentración de solución nutritiva, mientras que el módulo constituyó la unidad operativa donde se mantuvo dicha combinación durante el ciclo de cultivo. En ese sentido, módulo y tratamiento estuvieron asociados para fines de manejo del sistema; sin embargo, para el análisis de las variables agronómicas, la unidad experimental fue el tubo NFT. Cada tubo contenía cuatro plantas de espinaca, consideradas submuestras, y el valor analizado correspondió al promedio de dichas plantas. Las variables operativas, como pH, conductividad eléctrica y agua repuesta, se interpretaron de manera descriptiva como indicadores del comportamiento del sistema por tratamiento.

3.1.5 Análisis estadístico de datos

El análisis estadístico se realizó sobre los promedios por tubo NFT, debido a que el tubo constituyó la unidad experimental. Para las variables agronómicas finales se aplicó análisis de varianza correspondiente a un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial 2×3 .

El modelo aditivo lineal utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + B_k + S_i + C_j + (SC)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

- Y_{ijk} = valor observado de la variable evaluada.
- μ = media general del experimento.
- B_k = efecto del bloque k , asociado a la posición del tubo dentro del sistema NFT.
- S_i = efecto del sustrato i .
- C_j = efecto de la concentración de solución nutritiva Yamazaki j .
- $(SC)_{ij}$ = efecto de la interacción entre sustrato y concentración nutritiva.
- ε_{ijk} = error experimental aleatorio.

Previo al análisis de varianza, se verificaron los supuestos de normalidad de residuos mediante la prueba de Shapiro–Wilk y homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. Cuando el análisis de varianza evidenció diferencias significativas, las medias fueron comparadas mediante la prueba de Tukey al 5 % de significancia.

Las variables agronómicas sometidas a análisis inferencial fueron altura final de planta, número final de hojas, biomasa fresca sin raíz y biomasa seca sin raíz. Las variables pH, conductividad eléctrica, agua repuesta y eficiencia de uso de agua fueron analizadas de manera descriptiva, debido a que su finalidad principal fue interpretar el comportamiento operativo del sistema NFT durante el ciclo de cultivo.

El procesamiento de datos se realizó en RStudio. Previamente, la base de datos fue revisada para verificar consistencia de unidades, identificación de tratamientos, correspondencia entre bloques y tubos, ausencia de valores atípicos por error de digitación y correcta consolidación de los promedios por unidad experimental.

3.1.6 Variables evaluadas

Conforme a la operacionalización de variables establecida en el Capítulo I, la recolección de datos contempló las siguientes variables:

- **Crecimiento vegetativo:** altura de planta (cm) y número de hojas verdaderas por planta, medidos semanalmente. Para el análisis se utilizó el promedio de las cuatro plantas evaluadas por tubo.
- **Rendimiento:** biomasa fresca sin raíz (g planta^{-1}), biomasa seca sin raíz (g planta^{-1}) y porcentaje de materia seca. La biomasa fresca se registró inmediatamente después de la cosecha y la biomasa seca se determinó luego del secado en estufa.

- **Materia seca:** se calculó a partir de la relación entre biomasa seca y biomasa fresca, mediante la siguiente expresión:

$$MS(\%) = \left(\frac{BS}{BF} \right) \times 100$$

Donde MS es materia seca, BS es biomasa seca sin raíz y BF es biomasa fresca sin raíz.

- **Variables operativas del sistema:** pH, conductividad eléctrica (CE), volumen de agua repuesta y consumo total de agua. Estas variables permitieron describir la estabilidad química y operativa del sistema NFT.
- **Eficiencia de uso de agua:** se calculó relacionando la biomasa fresca total producida con el volumen total de agua repuesta durante el ciclo de cultivo:

$$EUA = \frac{\text{Biomasa fresca total producida (g)}}{\text{Agua total repuesta (L)}}$$

La EUA se expresó en g L^{-1} .

3.2 Ámbito temporal y espacial

3.2.1 Ámbito temporal

El ensayo comprendió un ciclo de 42 días, desde el trasplante realizado el 03 de febrero de 2025 hasta la cosecha efectuada el 17 de marzo de 2025. Las evaluaciones de crecimiento se realizaron semanalmente después del trasplante, mientras que las variables de rendimiento se determinaron al momento de la cosecha.

3.2.2 Ámbito espacial

El experimento se desarrolló en la ciudad de Huamanga, departamento de Ayacucho, Perú, en un área acondicionada para la instalación y operación de un sistema hidropónico NFT inteligente y recirculante. El ambiente experimental permitió implementar los módulos de cultivo, reservorios, sistema de bombeo, red de recirculación, sensores y equipos de monitoreo necesarios para el manejo del cultivo.

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

La población estuvo conformada por plantas de espinaca (*Spinacia oleracea* L.) cultivadas bajo condiciones hidropónicas en el sistema NFT inteligente y recirculante implementado para la investigación.

3.3.2 Muestra experimental

La muestra experimental estuvo conformada por 144 plantas de espinaca, distribuidas en 36 tubos de cultivo NFT. Cada tubo contenía cuatro plantas, las cuales fueron consideradas submuestras. Para fines del análisis estadístico, se trabajó con 36 datos experimentales por variable final, correspondientes al promedio de las cuatro plantas evaluadas en cada tubo.

El muestreo fue no probabilístico de tipo censal, debido a que se evaluaron todas las plantas establecidas en las unidades experimentales del ensayo. Al momento del trasplante se seleccionaron plántulas con características fenotípicas y sanitarias uniformes, con la finalidad de reducir variabilidad inicial no atribuible a los tratamientos.

3.3.3 Técnica de recolección de datos

Los datos se obtuvieron mediante medición directa, conteo manual, instrumentación electrónica y registro sistemático en fichas de campo y bitácoras de operación. Las variables de crecimiento fueron medidas semanalmente; las variables de rendimiento se registraron al momento de la cosecha; y las variables operativas, como pH, CE y agua repuesta, fueron registradas durante el ciclo de cultivo. Posteriormente, la información fue consolidada, depurada y procesada en RStudio.

3.4 Instrumentos

3.4.1 Equipos, materiales e insumos

Para la ejecución del experimento se emplearon los siguientes materiales, equipos e insumos:

- **Infraestructura NFT:** tubos de cultivo, canastillas, reservorios, bombas de recirculación, red de mangueras, conexiones hidráulicas, estructura de soporte y sistema de retorno de solución nutritiva.

- **Material vegetal e insumos:** plántulas uniformes de espinaca, espuma fenólica, fibra de coco, agua potable distribuida por SEDA Ayacucho y sales minerales para la preparación de la solución nutritiva tipo Yamazaki.
- **Equipos de medición:** medidor de pH, medidor de conductividad eléctrica, balanza digital de precisión, estufa de secado, probetas, recipientes graduados, regla o cinta métrica y fichas de registro.
- **Instrumentos de registro y procesamiento:** bitácoras de campo, fichas semanales de crecimiento, registros operativos del sistema y base de datos consolidada para análisis en RStudio.

3.5 Procedimientos

3.5.1 Instalación y acondicionamiento inicial

Se realizó la limpieza y desinfección de los componentes del sistema NFT, incluyendo tubos de cultivo, canastillas, reservorios, mangueras y accesorios hidráulicos. Posteriormente, se verificó el funcionamiento de las bombas, la circulación de la solución nutritiva, la pendiente de los tubos, el retorno hacia los reservorios y la estabilidad de la estructura de soporte. Los sustratos fueron hidratados y acondicionados antes del trasplante, con la finalidad de asegurar soporte radicular adecuado y uniformidad inicial en las unidades experimentales.

3.5.2 Preparación y manejo de la solución nutritiva

La solución nutritiva se preparó tomando como referencia la formulación tipo Yamazaki. A partir de la solución base se establecieron tres concentraciones relativas: 75 %, 100 % y 125 %. El agua utilizada para la preparación y reposición correspondió a agua potable distribuida por SEDA Ayacucho. Durante el ciclo de cultivo se monitorearon periódicamente el pH y la conductividad eléctrica, realizando los ajustes necesarios para mantener condiciones adecuadas de disponibilidad de nutrientes en el entorno radical.

3.5.3 Trasplante y establecimiento del cultivo

Las plántulas de espinaca fueron seleccionadas considerando uniformidad de tamaño, vigor y sanidad. Posteriormente, se establecieron cuatro plantas por cada tubo de cultivo NFT. Cada tubo recibió la combinación de sustrato y concentración nutritiva corres-

pondiente al tratamiento asignado. El establecimiento del cultivo se realizó procurando mantener condiciones homogéneas de manejo, densidad de plantación y operación hidráulica.

3.5.4 Operación del sistema NFT

Durante el desarrollo del cultivo se mantuvo la recirculación de la solución nutritiva en el sistema NFT. Se verificó periódicamente el funcionamiento de las bombas, el flujo de solución nutritiva, el retorno hacia los reservorios y la ausencia de obstrucciones en los tubos. Asimismo, se registró el volumen de agua repuesta para restituir el nivel operativo de cada tratamiento. Este registro permitió calcular el consumo total de agua y la eficiencia de uso de agua al final del ciclo.

3.5.5 Evaluación del crecimiento

Las variables de crecimiento se evaluaron semanalmente después del trasplante. La altura de planta se midió en centímetros desde la base de la planta hasta el extremo superior de la hoja más desarrollada. El número de hojas se determinó mediante conteo directo de hojas verdaderas. En cada tubo se evaluaron cuatro plantas y se obtuvo el promedio correspondiente a la unidad experimental.

3.5.6 Cosecha y determinación del rendimiento

La cosecha se realizó a los 42 días después del trasplante. Se separó la parte aérea del sistema radicular y se registró la biomasa fresca sin raíz de manera inmediata. Posteriormente, las muestras fueron sometidas a secado en estufa para determinar la biomasa seca sin raíz. Con estos datos se calculó el porcentaje de materia seca y, junto con el volumen de agua repuesta, la eficiencia de uso de agua.

3.5.7 Control de calidad y consolidación de datos

Los registros obtenidos en campo fueron revisados antes del procesamiento estadístico. Se verificó la identificación correcta de tratamiento, módulo, bloque y tubo; la consistencia de unidades de medida; la correspondencia entre las cuatro plantas evaluadas por tubo; y la ausencia de errores evidentes de digitación. Finalmente, se consolidó una base de datos limpia, considerando como dato experimental el promedio por tubo NFT.

CAPÍTULO IV.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

4.1.1 Análisis estadístico general del experimento

Para sustentar estadísticamente los resultados obtenidos, las variables agronómicas finales fueron analizadas mediante un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial 2×3 , considerando dos niveles del factor sustrato y tres niveles del factor concentración de solución nutritiva Yamazaki. La unidad experimental estuvo conformada por un tubo del sistema NFT, en el cual se evaluaron cuatro plantas. La comparación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey, con un nivel de significancia de $p < 0.05$.

Tabla 4.1. Codificación de tratamientos evaluados en el sistema NFT

Tratamiento	Combinación factorial	Sustrato	Solución Yamazaki
T1	Espuma fenólica + 75 %	Espuma fenólica	75 %
T2	Espuma fenólica + 100 %	Espuma fenólica	100 %
T3	Espuma fenólica + 125 %	Espuma fenólica	125 %
T4	Fibra de coco + 75 %	Fibra de coco	75 %
T5	Fibra de coco + 100 %	Fibra de coco	100 %
T6	Fibra de coco + 125 %	Fibra de coco	125 %

El modelo estadístico utilizado para el análisis de las variables agronómicas finales fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + B_k + S_i + C_j + (SC)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde Y_{ijk} representa la observación de la variable evaluada; μ corresponde a la media general; B_k representa el efecto del bloque; S_i expresa el efecto del tipo de sustrato; C_j corresponde al efecto de la concentración de solución nutritiva; $(SC)_{ij}$ representa la interacción entre sustrato y concentración nutritiva; y ε_{ijk} corresponde al error experimental aleatorio.

Tabla 4.2. Análisis de varianza para las variables agronómicas finales

Variable	Fuente de variación	GL	SC	CM	F	p-valor
Altura final	Bloques	5	803.709	160.742	324.418	< 0.001
	Sustrato	1	8.801	8.801	17.763	< 0.001
	Solución nutritiva	2	43.095	21.548	43.489	< 0.001
	Sustrato × solución nutritiva	2	5.976	2.988	6.031	0.007
	Error	25	12.387	0.495	–	–
Número final de hojas	Bloques	5	800.764	160.153	435.461	< 0.001
	Sustrato	1	10.562	10.562	28.720	< 0.001
	Solución nutritiva	2	43.514	21.757	59.158	< 0.001
	Sustrato × solución nutritiva	2	10.667	5.333	14.502	< 0.001
	Error	25	9.194	0.368	–	–
Biomasa fresca sin raíz	Bloques	5	18326.634	3665.327	991.727	< 0.001
	Sustrato	1	365.766	365.766	98.965	< 0.001
	Solución nutritiva	2	766.087	383.043	103.640	< 0.001
	Sustrato × solución nutritiva	2	188.635	94.318	25.520	< 0.001
	Error	25	92.398	3.696	–	–
Biomasa seca sin raíz	Bloques	5	66.175	13.235	187.942	< 0.001
	Sustrato	1	1.960	1.960	27.833	< 0.001
	Solución nutritiva	2	3.691	1.846	26.207	< 0.001
	Sustrato × solución nutritiva	2	0.366	0.183	2.596	0.095
	Error	25	1.761	0.070	–	–

Nota. GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CM = cuadrado medio. El análisis corresponde al modelo DBCA factorial 2×3 con seis bloques. Valores de $p < 0.05$ indican efecto significativo.

El análisis de varianza evidenció efectos significativos del sustrato y de la concentración de solución nutritiva sobre la altura final, el número final de hojas, la biomasa fresca sin raíz y la biomasa seca sin raíz. Asimismo, la interacción sustrato × solución nutritiva fue significativa para altura final, número final de hojas y biomasa fresca sin raíz, lo que indica que la respuesta de la espinaca frente a la concentración nutritiva varió según el tipo de sustrato utilizado. En el caso de la biomasa seca sin raíz, la interacción no fue significativa ($p = 0.095$); sin embargo, los efectos principales de sustrato y solución nutritiva sí

presentaron significancia estadística.

Tabla 4.3. Verificación de supuestos del análisis de varianza

Variable	Shapiro-Wilk	<i>p</i> -valor	Levene	<i>p</i> -valor	CV (%)
Altura final	0.979	0.696	0.348	0.879	3.59
Número final de hojas	0.979	0.720	0.226	0.948	3.01
Biomasa fresca sin raíz	0.988	0.962	0.142	0.981	2.69
Biomasa seca sin raíz	0.986	0.928	0.530	0.751	4.54

Nota. En todos los casos, los *p*-valores fueron mayores que 0.05; por tanto, no se rechazaron los supuestos de normalidad de residuos ni homogeneidad de varianzas. CV = coeficiente de variación.

La verificación de supuestos mostró valores de $p > 0.05$ en las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene para todas las variables evaluadas. Por tanto, no se evidenciaron desviaciones relevantes de la normalidad de los residuos ni de la homogeneidad de varianzas, lo que respalda la pertinencia del análisis de varianza aplicado. Además, los coeficientes de variación oscilaron entre 2.69 % y 4.54 %, valores que reflejan adecuada precisión experimental y consistencia en las mediciones realizadas.

Tabla 4.4. Medias finales, error estándar y grupos de Tukey por tratamiento

Trat.	Combinación factorial	Altura (cm)	Tukey	Hojas (n)	Tukey	BF (g/planta)	Tukey	BS (g/planta)	Tukey
T1	Espuma fenólica + 75 %	17.85 ± 2.04	d	10.79 ± 1.03	bc	62.92 ± 9.43	c	5.32 ± 0.52	c
T2	Espuma fenólica + 100 %	21.19 ± 1.95	a	11.67 ± 1.14	a	76.71 ± 10.66	a	6.13 ± 0.66	ab
T3	Espuma fenólica + 125 %	18.37 ± 2.22	cd	10.50 ± 1.10	bc	65.04 ± 10.03	c	5.36 ± 0.55	c
T4	Fibra de coco + 75 %	19.83 ± 2.50	b	10.29 ± 1.15	c	75.67 ± 10.88	a	6.07 ± 0.57	ab
T5	Fibra de coco + 100 %	21.17 ± 1.80	a	11.00 ± 0.97	b	78.92 ± 9.36	a	6.43 ± 0.63	a
T6	Fibra de coco + 125 %	19.38 ± 2.20	bc	10.88 ± 1.10	b	69.21 ± 10.24	b	5.71 ± 0.73	bc

Nota. Los valores corresponden a media ± error estándar. BF = biomasa fresca sin raíz; BS = biomasa seca sin raíz.

Letras distintas dentro de una misma variable indican diferencias significativas según Tukey ($p < 0.05$).

La comparación de medias mediante Tukey confirmó que los tratamientos T2 y T5 conformaron el grupo estadístico superior para altura final. En número final de hojas, T2 presentó el mejor desempeño, al ubicarse como el único tratamiento dentro del grupo superior. Para biomasa fresca, T2, T4 y T5 fueron estadísticamente superiores, mientras que, en biomasa seca, T5 alcanzó el mayor valor, sin diferir significativamente de T2 y T4. En conjunto, estos resultados evidencian que la solución nutritiva Yamazaki al 100 % favoreció de manera

más consistente la respuesta agronómica de la espinaca, especialmente cuando se combinó con espuma fenólica para el desarrollo foliar y con fibra de coco para la acumulación de biomasa.

Tabla 4.5. Eficiencia de uso de agua e índice integral de desempeño agronómico

Orden	Tratamiento	EUA (g/L)	Índice integral (z)	Interpretación
1	T2: espuma fenólica + 100 %	73.49	1.01	Mejor desempeño integral
2	T5: fibra de coco + 100 %	69.89	0.83	Mayor biomasa seca y alta productividad
3	T4: fibra de coco + 75 %	78.44	0.30	Mayor eficiencia de uso de agua
4	T6: fibra de coco + 125 %	61.29	-0.31	Desempeño intermedio bajo
5	T1: espuma fenólica + 75 %	64.67	-0.84	Bajo desempeño integral
6	T3: espuma fenólica + 125 %	57.60	-0.99	Menor desempeño integral

Nota. EUA = eficiencia de uso de agua, calculada como biomasa fresca total producida entre agua total repuesta. El índice integral corresponde al promedio estandarizado de altura, número de hojas, biomasa fresca, biomasa seca y EUA.

El análisis integral permitió identificar diferencias relevantes en el desempeño agronómico conjunto de los tratamientos. El tratamiento T2, correspondiente a espuma fenólica + 100 %, presentó el mayor índice integral, seguido por T5, fibra de coco + 100 %. Aunque T4, fibra de coco + 75 %, registró la mayor eficiencia de uso de agua, su índice integral fue menor debido a su menor respuesta relativa en número final de hojas. Por ello, desde una evaluación conjunta de crecimiento, biomasa y eficiencia hídrica, T2 fue el tratamiento más equilibrado, mientras que T5 destacó por su producción de biomasa y T4 por su eficiencia en el uso del agua.

4.1.2 Crecimiento semanal de la espinaca

El seguimiento semanal del cultivo permitió describir la evolución de la espinaca desde la primera hasta la sexta semana después del trasplante. Esta evaluación permitió identificar el momento en que los tratamientos empezaron a diferenciarse y reconocer aquellos que mantuvieron una tendencia superior durante el ciclo productivo.

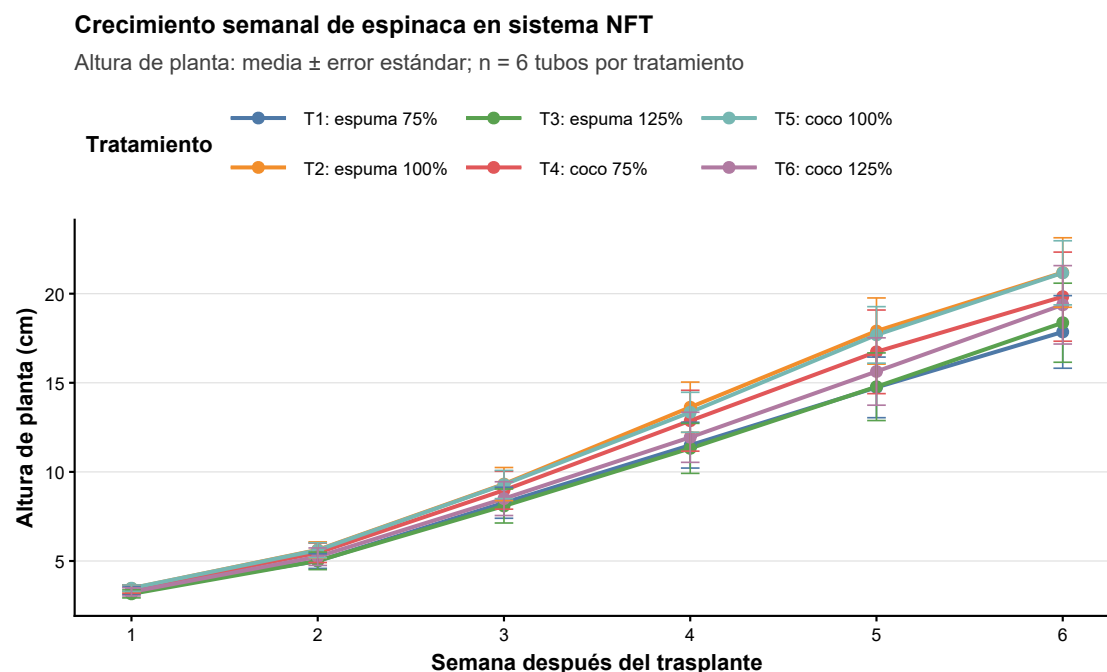


Figura 4.1. Crecimiento semanal de la espinaca en altura de planta bajo sistema NFT.

En la Figura 4.1 se observa un incremento progresivo de la altura de planta en todos los tratamientos durante las seis semanas posteriores al trasplante. Durante las primeras semanas, las diferencias entre tratamientos fueron reducidas; sin embargo, a partir de la tercera y cuarta semana se evidenció una mayor separación entre las curvas de crecimiento. Los tratamientos T2, espuma fenólica + 100 %, y T5, fibra de coco + 100 %, alcanzaron las mayores alturas hacia el final del ciclo, superando visualmente a los tratamientos con 75 % y 125 % de solución nutritiva. Este comportamiento indica que la concentración nutritiva al 100 % favoreció el crecimiento en altura, mientras que el incremento a 125 % no generó una mejora adicional en esta variable.

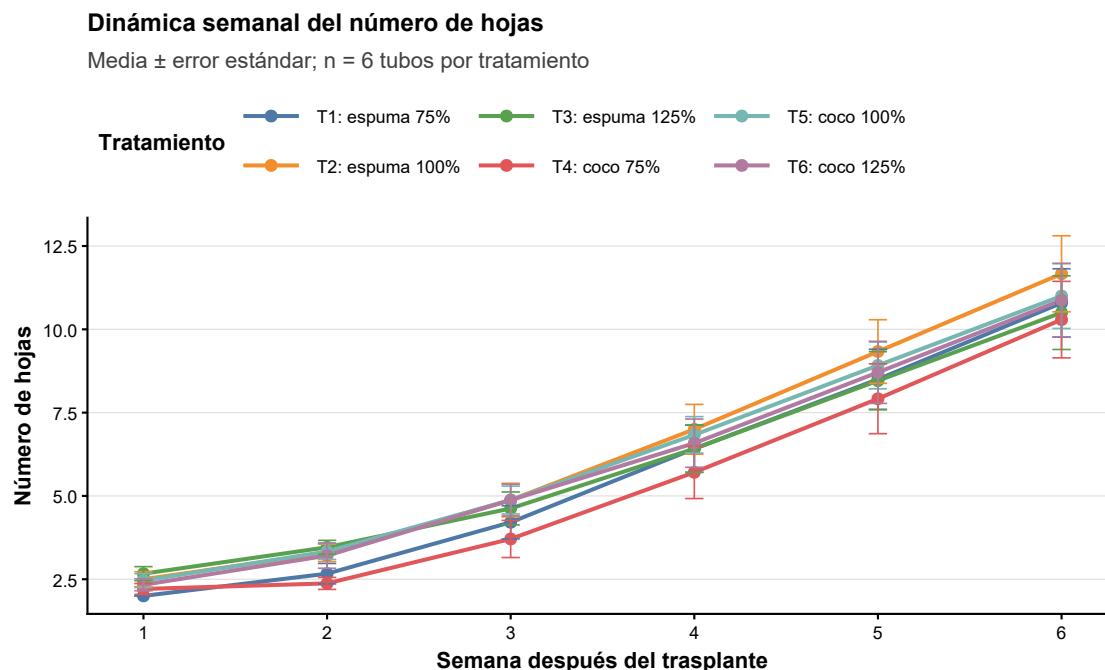


Figura 4.2. Dinámica semanal del número de hojas de espinaca bajo sistema NFT.

En la Figura 4.2 se aprecia que el número de hojas presentó una tendencia creciente en todos los tratamientos. La emisión foliar fue gradual durante las primeras semanas y se intensificó hacia la etapa final del cultivo. El tratamiento T2, espuma fenólica + 100 %, mantuvo la mayor tendencia en número de hojas al final del periodo evaluado. Los tratamientos T5 y T6, correspondientes a fibra de coco con 100 % y 125 %, respectivamente, presentaron respuestas intermedias altas. En contraste, T4, fibra de coco + 75 %, mostró una menor respuesta foliar final. Estos resultados indican que la concentración nutritiva al 100 % favoreció de manera más consistente el desarrollo foliar de la espinaca.

4.1.3 Altura final y número final de hojas

La evaluación final del crecimiento permitió comparar estadísticamente los tratamientos mediante la prueba de Tukey. Las letras ubicadas sobre las barras representan los grupos estadísticos; por tanto, tratamientos con letras diferentes presentan diferencias significativas a un nivel de $p < 0.05$.

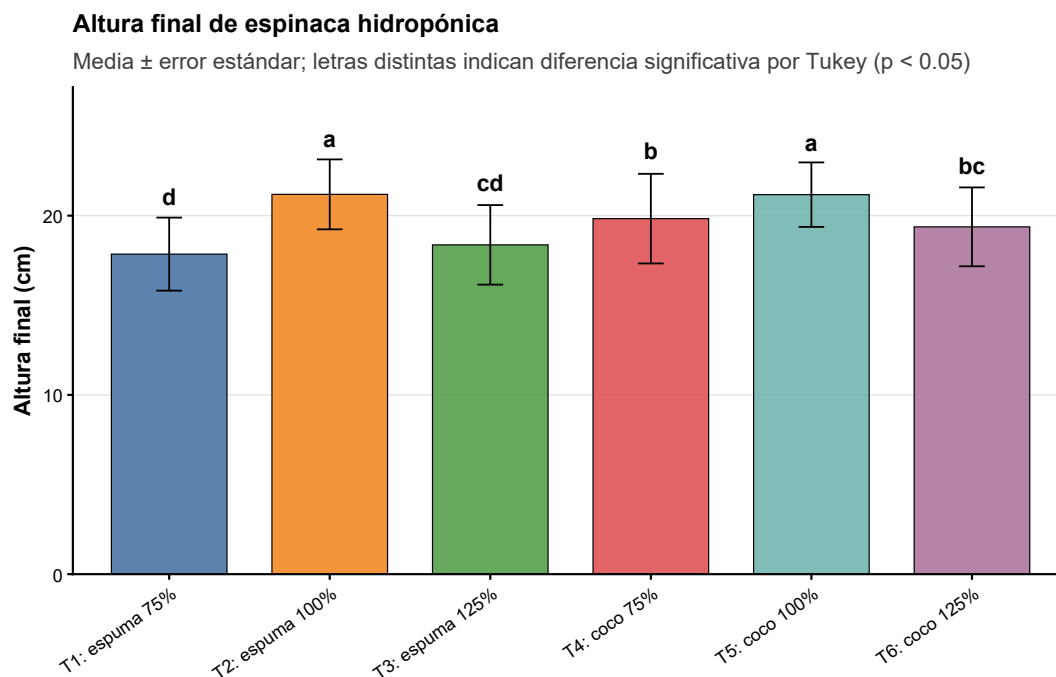


Figura 4.3. Altura final de espinaca hidropónica según tratamiento.

En la Figura 4.3 se observa que los tratamientos T2 y T5 alcanzaron el grupo estadístico superior, identificado con la letra **a**. Ambos tratamientos correspondieron a la concentración de solución nutritiva al 100 %, aplicada en espuma fenólica y fibra de coco, respectivamente. Este resultado confirma que la concentración intermedia fue la más favorable para la altura final de la espinaca. El tratamiento T4, fibra de coco + 75 %, se ubicó en un grupo intermedio con la letra **b**, mientras que T6 presentó una respuesta intermedia baja, identificada con la letra **bc**. Los menores valores correspondieron a T3 y T1, especialmente a T1, espuma fenólica + 75 %, ubicado en el grupo inferior **d**. En consecuencia, la altura final fue favorecida principalmente por la solución nutritiva al 100 %.

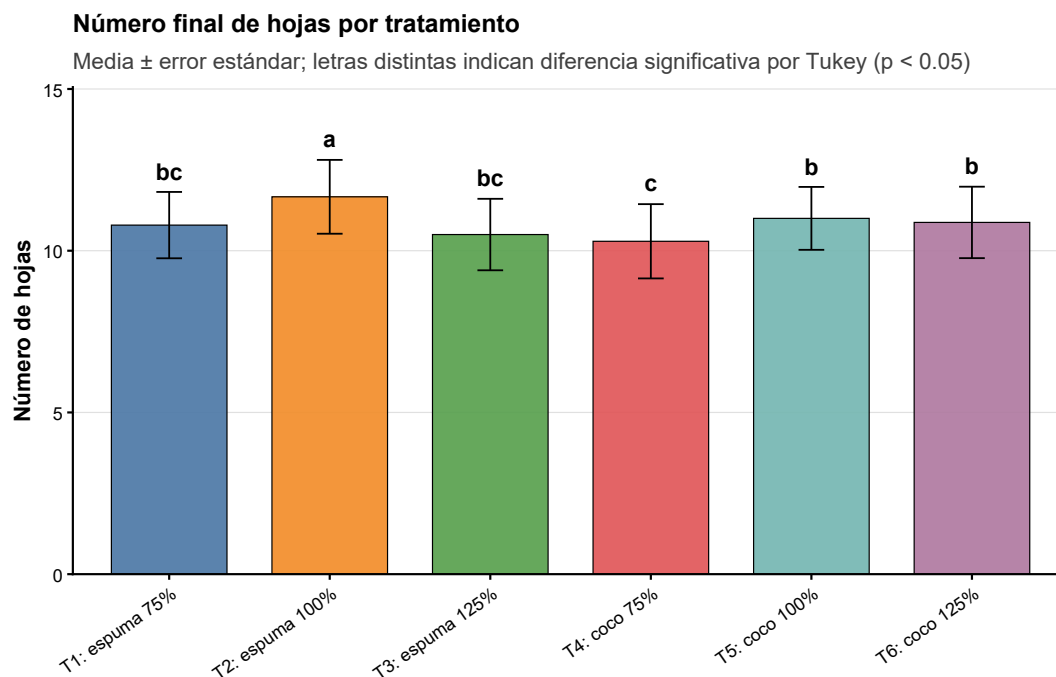


Figura 4.4. Número final de hojas por tratamiento en espinaca hidropónica.

En la Figura 4.4 se muestra que el tratamiento T2, espuma fenólica + 100 %, presentó el mayor número final de hojas y fue el único tratamiento ubicado en el grupo estadístico superior **a**. Los tratamientos T5 y T6 se ubicaron en el grupo **b**, lo que indica un comportamiento foliar intermedio. T1 y T3 compartieron el grupo **bc**, mientras que T4, fibra de coco + 75 %, presentó el menor desempeño foliar y se ubicó en el grupo **c**. Por tanto, para la variable número final de hojas, la mejor respuesta se obtuvo con la combinación de espuma fenólica y solución nutritiva al 100 %.

4.1.4 Producción de biomasa fresca y biomasa seca

La biomasa fresca y la biomasa seca constituyen variables directamente relacionadas con el rendimiento del cultivo. La biomasa fresca representa la producción comercial inmediata, mientras que la biomasa seca expresa la acumulación real de materia orgánica vegetal.

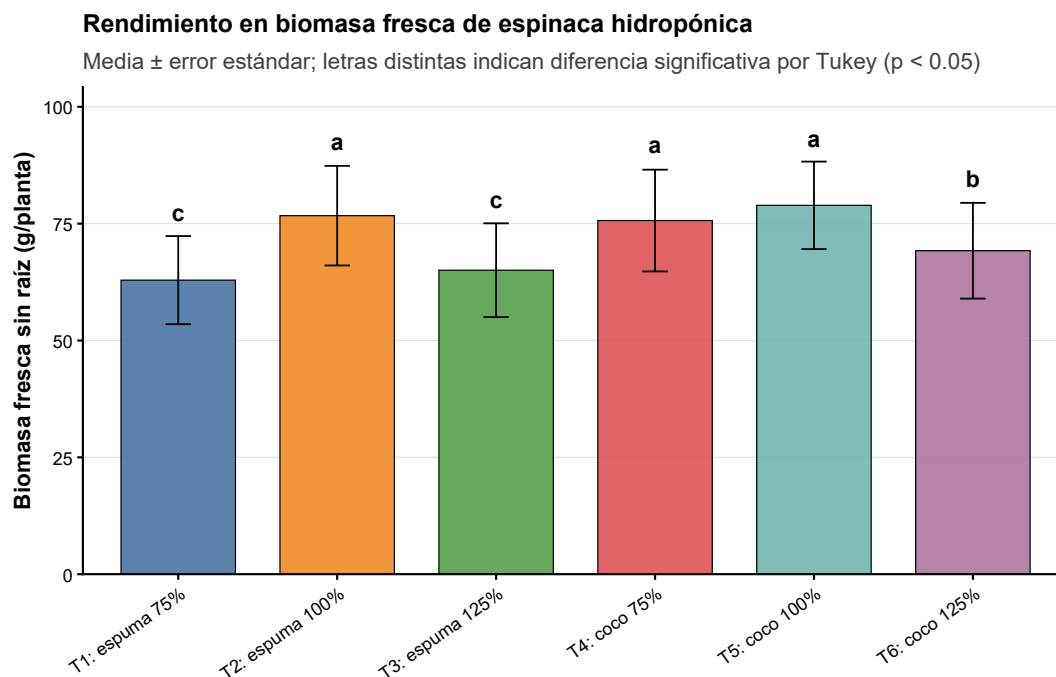


Figura 4.5. Rendimiento en biomasa fresca de espinaca hidropónica.

En la Figura 4.5 se observa que los tratamientos T2, T4 y T5 conformaron el grupo estadístico superior **a** para biomasa fresca sin raíz. Este resultado indica que la mayor producción fresca no dependió exclusivamente de la concentración nutritiva al 100 %, debido a que T4, fibra de coco + 75 %, también alcanzó un rendimiento estadísticamente similar al de los mejores tratamientos. El tratamiento T6, fibra de coco + 125 %, se ubicó en el grupo intermedio **b**, mientras que T1 y T3, ambos con espuma fenólica en concentraciones de 75 % y 125 %, respectivamente, presentaron los menores valores y fueron agrupados con la letra **c**. En términos productivos, la mayor biomasa fresca se obtuvo en T2, T4 y T5.

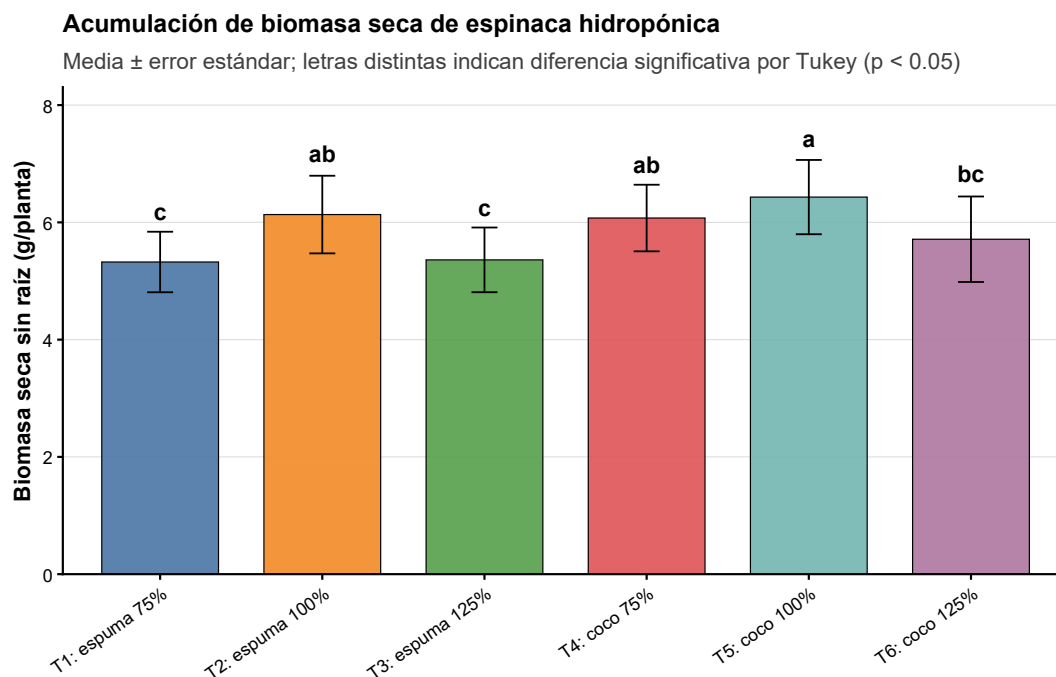


Figura 4.6. Acumulación de biomasa seca de espinaca hidropónica.

En la Figura 4.6 se aprecia que el tratamiento T5, fibra de coco + 100 %, alcanzó la mayor acumulación de biomasa seca y se ubicó en el grupo estadístico superior **a**. Los tratamientos T2 y T4 compartieron el grupo **ab**, lo que indica que no difirieron significativamente del tratamiento con mayor acumulación de biomasa seca. T6 presentó un comportamiento intermedio bajo, identificado con la letra **bc**, mientras que T1 y T3 se ubicaron en el grupo inferior **c**. Estos resultados muestran que la fibra de coco combinada con solución nutritiva al 100 % favoreció la acumulación de materia seca, lo cual refleja una mayor conversión del crecimiento vegetativo en biomasa estructural.

4.1.5 Interacción entre sustrato y concentración nutritiva

La interacción entre sustrato y concentración nutritiva permitió identificar si la respuesta de la espinaca a la solución Yamazaki varió según el tipo de sustrato utilizado.

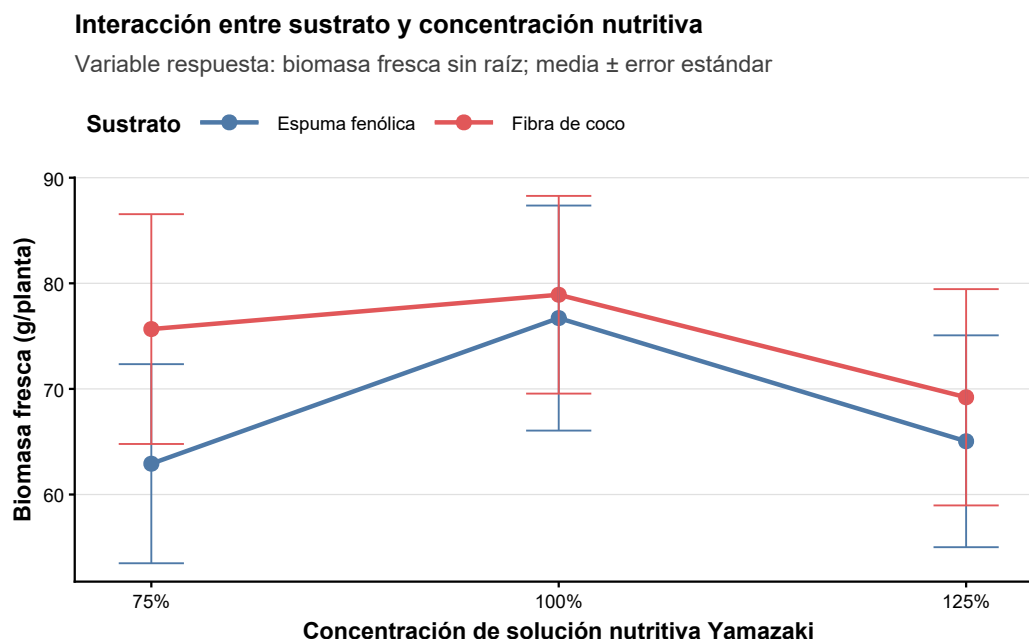


Figura 4.7. Interacción entre sustrato y concentración nutritiva para biomasa fresca sin raíz.

En la Figura 4.7 se observa que la biomasa fresca aumentó desde 75 % hasta 100 % de solución nutritiva y posteriormente disminuyó cuando la concentración se elevó a 125 %. Esta tendencia se presentó en ambos sustratos, aunque con diferente magnitud. La fibra de coco mostró valores superiores a la espuma fenólica en las concentraciones de 75 % y 125 %, mientras que, en la concentración de 100 %, ambos sustratos presentaron respuestas cercanas. La ausencia de paralelismo perfecto entre las líneas respalda la existencia de interacción entre el tipo de sustrato y la concentración nutritiva. En términos agronómicos, la concentración al 100 % fue la más favorable para maximizar la biomasa fresca, mientras que la concentración al 125 % no incrementó el rendimiento.

4.1.6 Eficiencia de uso de agua

La eficiencia de uso de agua permitió relacionar la biomasa fresca producida con el volumen total de agua repuesta durante el ciclo de cultivo. Esta variable es relevante en sistemas hidropónicos recirculantes, debido a que permite identificar tratamientos productivos y, al mismo tiempo, eficientes en el uso del recurso hídrico.

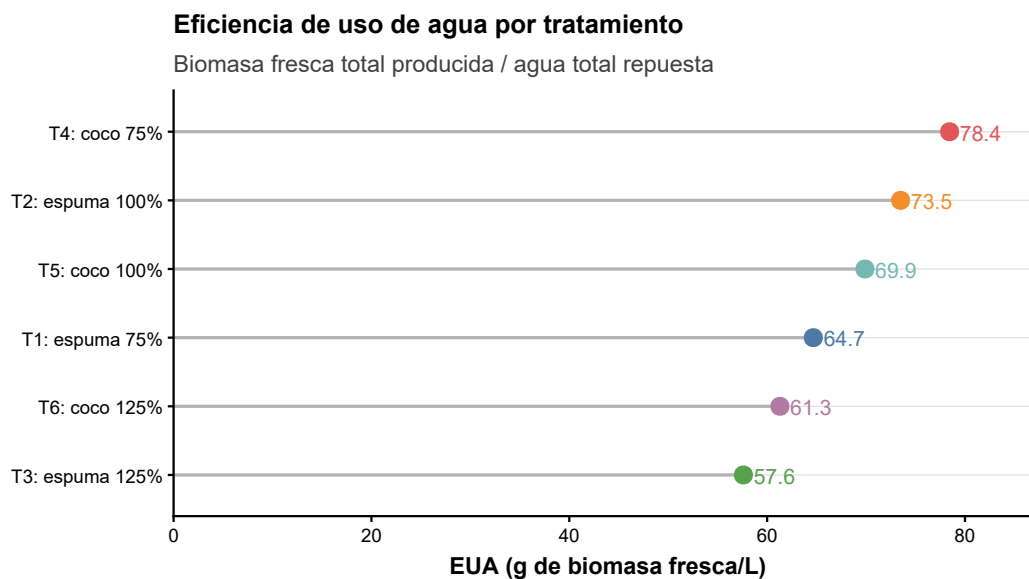


Figura 4.8. Eficiencia de uso de agua por tratamiento.

En la Figura 4.8 se observa que el tratamiento T4, fibra de coco + 75 %, presentó la mayor eficiencia de uso de agua, con 78,4 g de biomasa fresca por litro de agua repuesta. En segundo lugar se ubicó T2, espuma fenólica + 100 %, con 73,5 g/L, seguido de T5, fibra de coco + 100 %, con 69,9 g/L. Los menores valores se observaron en T6 y T3, especialmente en T3, espuma fenólica + 125 %, con 57,6 g/L. Este resultado evidencia que el mayor rendimiento productivo no siempre coincide con la mayor eficiencia hídrica. Por ello, T4 destacó como el tratamiento más eficiente en el uso del agua, mientras que T2 y T5 mantuvieron un equilibrio favorable entre productividad y eficiencia.

4.1.7 Comportamiento operativo de la solución nutritiva

El comportamiento del pH y de la conductividad eléctrica permitió verificar la estabilidad operativa del sistema NFT durante el ciclo de cultivo. Estas variables no representan directamente el rendimiento, pero permiten interpretar las condiciones químicas bajo las cuales se desarrollaron las plantas.

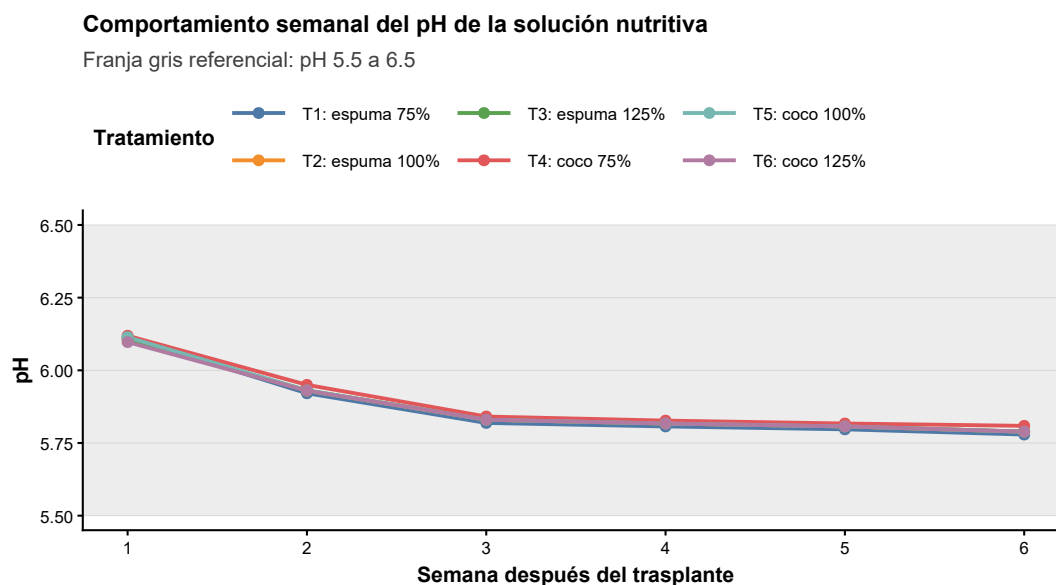


Figura 4.9. Comportamiento semanal del pH de la solución nutritiva.

En la Figura 4.9 se observa que el pH se mantuvo dentro de la franja referencial de 5,5 a 6,5 durante todo el ciclo de cultivo. En la primera semana, los valores se ubicaron alrededor de 6,1 y posteriormente descendieron de manera gradual hasta estabilizarse cerca de 5,8 en las semanas finales. Las diferencias entre tratamientos fueron mínimas, lo que indica que el sistema mantuvo condiciones químicas relativamente uniformes. Este comportamiento sugiere que las diferencias observadas en crecimiento y biomasa no se debieron a desajustes importantes de pH, sino principalmente al efecto de los tratamientos evaluados.

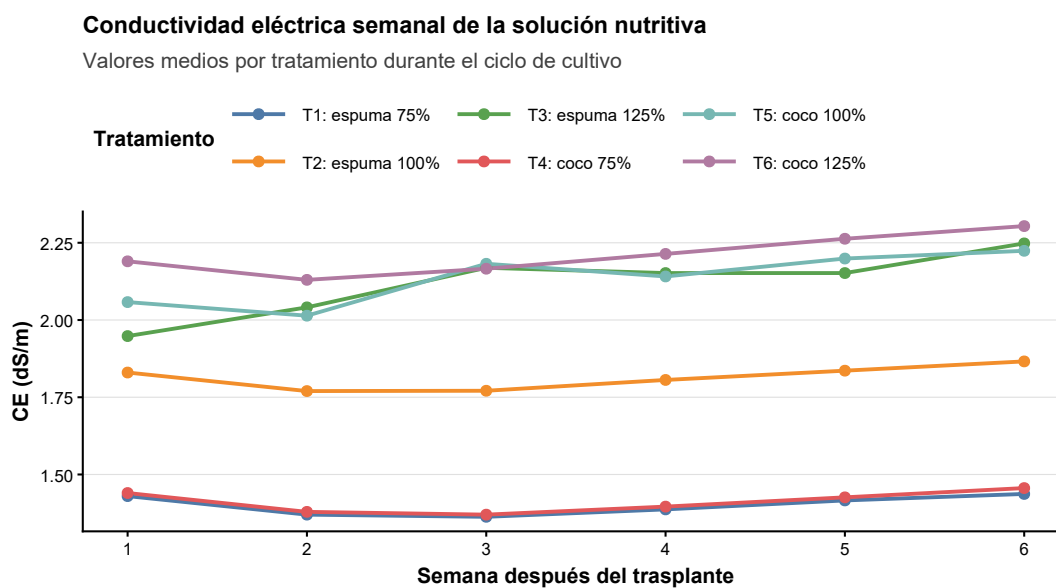


Figura 4.10. Conductividad eléctrica semanal de la solución nutritiva.

En la Figura 4.10 se aprecia que la conductividad eléctrica presentó diferencias entre tratamientos durante todo el ciclo de cultivo. Los tratamientos T1 y T4 mostraron los valores más bajos, mientras que T6 presentó los valores más altos y una tendencia ligeramente ascendente hacia la sexta semana. Los tratamientos T3 y T5 se mantuvieron en niveles altos e intermedios altos, mientras que T2 mostró un comportamiento intermedio. En general, la conductividad eléctrica presentó oscilaciones moderadas, sin variaciones bruscas que evidencien inestabilidad operativa. Este comportamiento confirma que las soluciones nutritivas mantuvieron una diferenciación iónica coherente con las concentraciones evaluadas.

4.1.8 Desempeño integral de los tratamientos

Para integrar la respuesta del cultivo, se evaluó un índice integral de desempeño agronómico construido a partir de variables estandarizadas. Este índice permitió comparar simultáneamente altura final, número final de hojas, biomasa fresca, biomasa seca y eficiencia de uso de agua.

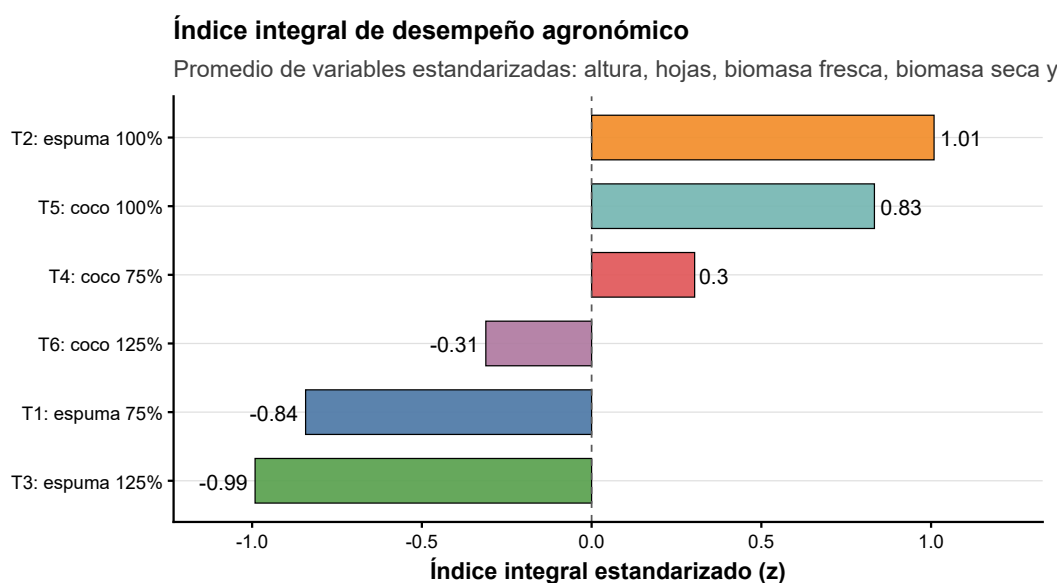


Figura 4.11. Índice integral de desempeño agronómico por tratamiento.

En la Figura 4.11 se observa que el tratamiento T2, espuma fenólica + 100 %, presentó el mayor índice integral de desempeño agronómico, con un valor estandarizado de 1,01. En segundo lugar se ubicó T5, fibra de coco + 100 %, con 0,83, seguido por T4, fibra de coco + 75 %, con 0,30. Estos tres tratamientos presentaron valores positivos, lo que indica un desempeño superior al promedio general del experimento. En contraste, T6, T1 y T3 registraron valores negativos, siendo T3, espuma fenólica + 125 %, el tratamiento con menor

desempeño integral. Por tanto, desde una evaluación conjunta de las variables agronómicas y de eficiencia hídrica, T2 fue el tratamiento más equilibrado, seguido por T5.

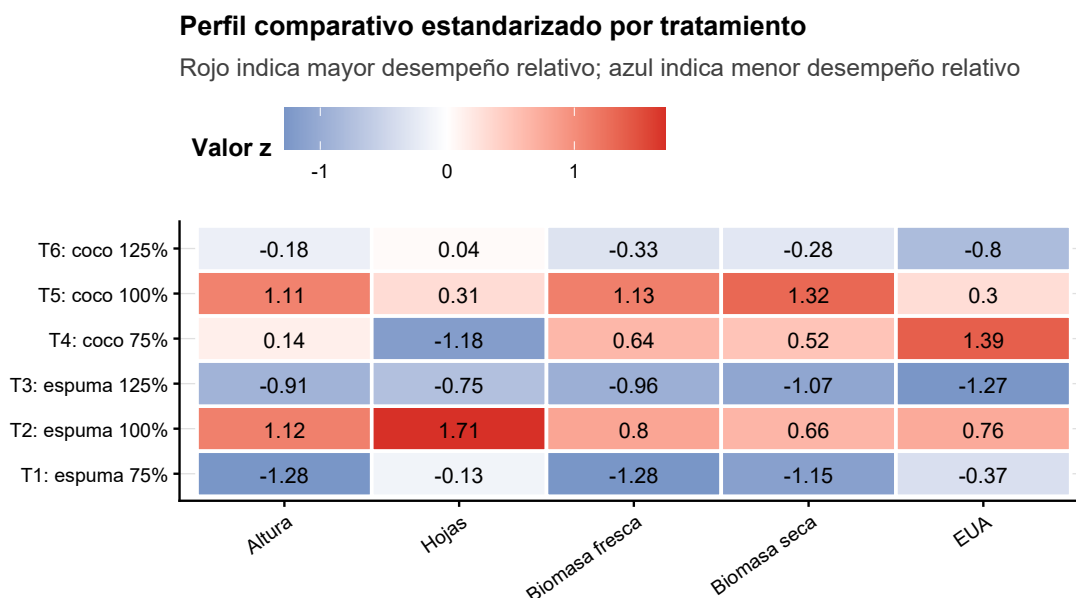


Figura 4.12. Perfil comparativo estandarizado por tratamiento.

En la Figura 4.12 se muestra el perfil estandarizado de cada tratamiento. Los valores positivos, representados en tonos rojos, indican mayor desempeño relativo, mientras que los valores negativos, representados en tonos azules, indican menor desempeño relativo. El tratamiento T2 destacó por presentar valores positivos en todas las variables, especialmente en número de hojas, altura y eficiencia de uso de agua. El tratamiento T5 también mostró un perfil favorable, con alto desempeño en altura, biomasa fresca y biomasa seca. Por su parte, T4 presentó una respuesta destacada en eficiencia de uso de agua y biomasa fresca, aunque mostró menor desempeño relativo en número de hojas. En contraste, T1 y T3 evidenciaron valores negativos en la mayoría de variables, confirmando su menor respuesta agronómica. El mapa de calor permite visualizar que los tratamientos con solución nutritiva al 100 % fueron los más equilibrados dentro del conjunto de variables evaluadas.

4.1.9 Síntesis de los resultados

En conjunto, los resultados muestran que la concentración de solución nutritiva Yamazaki al 100 % generó la respuesta agronómica más consistente en el cultivo hidropónico de espinaca bajo sistema NFT. El tratamiento T2, espuma fenólica + 100 %, presentó el mayor índice integral de desempeño, principalmente por su superioridad en altura final, número

final de hojas y adecuada eficiencia de uso de agua. El tratamiento T5, fibra de coco + 100 %, destacó por su mayor acumulación de biomasa seca y por mantener una respuesta productiva alta, por lo que constituye una alternativa técnicamente favorable. Asimismo, T4, fibra de coco + 75 %, sobresalió por su mayor eficiencia de uso de agua y alto rendimiento en biomasa fresca, aunque no presentó el mejor desempeño en desarrollo foliar.

Los tratamientos con solución nutritiva al 125 % no superaron a los tratamientos con solución al 100 %. Por el contrario, T3 y T6 mostraron menores valores en varias variables, especialmente en eficiencia de uso de agua e índice integral de desempeño. En consecuencia, incrementar la concentración nutritiva por encima del 100 % no mejoró el desempeño agronómico de la espinaca bajo las condiciones evaluadas. De manera general, el tratamiento más equilibrado fue T2, mientras que T5 destacó como alternativa de alta acumulación de biomasa y T4 como el tratamiento más eficiente en el uso del agua.

4.2 Discusión

4.2.1 Desempeño integral del cultivo

En relación con el objetivo general, los resultados demostraron que las combinaciones de sustrato y concentración de solución nutritiva Yamazaki influyeron significativamente en el crecimiento, rendimiento, eficiencia de uso de agua y desempeño integral de la espinaca cultivada bajo sistema hidropónico NFT. El análisis estadístico evidenció efectos significativos del sustrato y de la concentración nutritiva sobre la altura final, número final de hojas, biomasa fresca sin raíz y biomasa seca sin raíz. Asimismo, la interacción sustrato $\times$ solución nutritiva fue significativa para altura final, número final de hojas y biomasa fresca, lo que indica que la respuesta de la espinaca a la concentración nutritiva dependió del tipo de sustrato empleado.

El tratamiento T2, correspondiente a espuma fenólica + solución nutritiva al 100 %, presentó el mayor índice integral de desempeño agronómico, con un valor estandarizado de 1,01. Este resultado se explica porque T2 mostró una respuesta equilibrada en el conjunto de variables evaluadas, destacando principalmente en altura final, número final de hojas y eficiencia de uso de agua. En segundo lugar se ubicó T5, fibra de coco + solución nutritiva al 100 %, con un índice integral de 0,83, tratamiento que destacó especialmente por su mayor acumulación de biomasa seca y alta producción de biomasa fresca. Por tanto, desde una evaluación conjunta, T2 fue el tratamiento más equilibrado, mientras que T5 constituyó una

alternativa productiva de alto rendimiento.

Este comportamiento confirma que el mejor desempeño del cultivo no dependió del incremento máximo de la concentración nutritiva, sino del equilibrio entre solución nutritiva, sustrato y estabilidad del ambiente radical. En sistemas sin suelo, el sustrato no cumple únicamente una función de soporte, sino que influye en la retención de humedad, aireación, disponibilidad de oxígeno y relación agua–nutriente en la zona radical. Al respecto, Savvas and Gruda (2018) señalan que las propiedades físicas y químicas del medio de cultivo son determinantes para el desarrollo de cultivos hidropónicos. De manera complementaria, Sonneveld and Voogt (2009) sostienen que el crecimiento vegetal en sistemas sin suelo depende del equilibrio entre solución nutritiva, conductividad eléctrica, pH y condiciones del sistema radical.

Los tratamientos con solución nutritiva al 100 % fueron superiores o más equilibrados que los tratamientos con 75 % y 125 %. Esto demuestra que una solución nutritiva más concentrada no necesariamente mejora el rendimiento. En el presente estudio, los tratamientos T3 y T6, correspondientes a la concentración al 125 %, no superaron a los tratamientos con 100 %; por el contrario, presentaron menor desempeño integral. Este resultado es coherente con el principio de manejo nutricional en hidroponía, donde la eficiencia no depende de aumentar indiscriminadamente la concentración de sales, sino de mantener una disponibilidad balanceada de nutrientes. Fathidarehniyeh et al. (2024) indican que el manejo adecuado de la solución nutritiva es fundamental para mejorar la eficiencia en el uso de agua y nutrientes en sistemas hidropónicos. De forma similar, Gillespie et al. (2021) señalan que la respuesta de la espinaca a la concentración nutritiva depende del balance iónico, del pH y de la conductividad eléctrica.

En consecuencia, el objetivo general se responde indicando que la concentración Yamazaki al 100 % fue la más favorable para el cultivo hidropónico de espinaca bajo sistema NFT. Dentro de esta concentración, T2 fue el tratamiento con mejor desempeño integral, mientras que T5 destacó por su mayor acumulación de biomasa seca y elevada producción. Esto permite afirmar que el sistema NFT evaluado respondió mejor a una concentración nutritiva completa y equilibrada, antes que a una reducción al 75 % o a un incremento al 125 %.

4.2.2 Crecimiento vegetativo

El primer objetivo específico estuvo orientado a comparar el crecimiento vegetativo de la espinaca, expresado en altura de planta y número de hojas, entre las combinaciones de sustrato y concentración nutritiva. Los resultados mostraron que la altura de planta aumentó progresivamente durante las seis semanas posteriores al trasplante en todos los tratamientos. Las diferencias fueron poco marcadas durante las primeras semanas; sin embargo, a partir de la tercera y cuarta semana se observó una mayor separación entre las curvas de crecimiento, especialmente a favor de los tratamientos con solución nutritiva al 100 %.

En la evaluación final de altura, los tratamientos T2, espuma fenólica + 100 %, y T5, fibra de coco + 100 %, conformaron el grupo estadístico superior según Tukey. Este resultado evidencia que la concentración nutritiva al 100 % favoreció el crecimiento longitudinal de la espinaca independientemente del sustrato utilizado. En contraste, T1, espuma fenólica + 75 %, presentó el menor valor de altura final y se ubicó en el grupo estadístico inferior. La menor respuesta de T1 puede relacionarse con una disponibilidad nutricional limitada, debido a que la concentración al 75 % pudo no cubrir plenamente la demanda del cultivo durante la fase de mayor crecimiento vegetativo.

Para el número final de hojas, el tratamiento T2 fue el único que alcanzó el grupo estadístico superior, lo que demuestra una ventaja clara de la combinación espuma fenólica + solución nutritiva al 100 % en la emisión foliar. Los tratamientos T5 y T6 se ubicaron en un grupo intermedio, mientras que T4 presentó el menor desempeño foliar. Este resultado indica que el número de hojas respondió de manera más favorable a la combinación de espuma fenólica y concentración nutritiva completa. La espuma fenólica, por su homogeneidad física y capacidad de soporte inicial, pudo favorecer una implantación más uniforme de las plantas y una emisión foliar más constante durante el ciclo.

La respuesta observada coincide con la importancia del manejo nutricional en hortalizas de hoja. Según Gao et al. (2020), el crecimiento de espinaca en sistemas controlados depende de la disponibilidad equilibrada de nutrientes y de las condiciones ambientales del cultivo. Asimismo, Bian et al. (2020) señala que el crecimiento de hortalizas de hoja debe evaluarse considerando simultáneamente variables vegetativas y productivas, debido a que un mayor número de hojas no siempre implica mayor rendimiento final si no está acompañado de mayor biomasa o mayor acumulación de materia seca.

En este estudio, T2 fue superior en número de hojas y compartió el grupo superior en altura final con T5. Sin embargo, esta ventaja vegetativa no significa necesariamente que T2 sea superior en todas las variables productivas. T5 presentó mayor biomasa seca y una alta producción de biomasa fresca, lo que demuestra que el crecimiento vegetativo y la acumulación de biomasa no siempre responden de forma idéntica. Por ello, el crecimiento vegetativo debe interpretarse como una parte del desempeño agronómico, pero no como el único criterio para seleccionar el mejor tratamiento.

4.2.3 Rendimiento en biomasa

El segundo objetivo específico estuvo orientado a comparar el rendimiento de la espinaca, expresado en biomasa fresca y biomasa seca sin raíz. Los resultados mostraron diferencias significativas entre tratamientos, evidenciando que la producción de biomasa fue afectada por el sustrato, la concentración nutritiva y, en el caso de la biomasa fresca, por la interacción entre ambos factores.

Para biomasa fresca sin raíz, los tratamientos T2, T4 y T5 conformaron el grupo estadístico superior según Tukey. Esto indica que la mayor producción fresca no dependió exclusivamente de la concentración nutritiva al 100 %, debido a que T4, fibra de coco + 75 %, también alcanzó una respuesta estadísticamente similar a los tratamientos superiores. Este resultado es agronómicamente importante porque muestra que la fibra de coco, incluso con una concentración nutritiva reducida al 75 %, pudo sostener una alta producción de biomasa fresca. No obstante, cuando se considera el desempeño integral y la acumulación de biomasa seca, los tratamientos con solución al 100 % mantuvieron mayor consistencia.

En biomasa seca sin raíz, el tratamiento T5, fibra de coco + 100 %, alcanzó el grupo estadístico superior. Los tratamientos T2 y T4 se ubicaron en el grupo **ab**, lo que indica que no difirieron significativamente del tratamiento de mayor acumulación seca. Este resultado demuestra que T5 no solo produjo alta biomasa fresca, sino que además favoreció una mayor acumulación real de materia orgánica vegetal. La biomasa seca es una variable de alta importancia fisiológica porque expresa la acumulación de fotoasimilados y materia estructural, reduciendo la influencia del contenido de agua presente en los tejidos.

La superioridad de T5 en biomasa seca puede explicarse por las propiedades de la fibra de coco como medio de cultivo. Este sustrato presenta capacidad de retención de humedad y aireación favorable, características que pueden mejorar el ambiente radical y favorecer

la absorción de nutrientes. Machado et al. (2021) reportaron que la fibra de coco puede favorecer el crecimiento y la acumulación de biomasa en espinaca. De manera similar, Abad et al. (2005) y Xiong et al. (2017) señalan que la fibra de coco puede ser un sustrato adecuado para cultivos sin suelo cuando presenta condiciones físicas y químicas apropiadas.

El hecho de que la concentración al 125 % no incrementara la biomasa fresca ni la biomasa seca confirma que el aumento de la concentración nutritiva por encima del nivel de referencia no fue beneficioso bajo las condiciones evaluadas. Öztekin et al. (2018) sostienen que la concentración de la solución nutritiva influye en el crecimiento y rendimiento de espinaca hidropónica, pero su efecto depende del equilibrio de la solución y de la capacidad de absorción de la planta. En este estudio, la concentración al 100 % fue suficiente para sostener mayor acumulación de biomasa, mientras que el 125 % pudo generar una condición menos eficiente por mayor carga iónica o menor balance fisiológico.

En consecuencia, para el rendimiento productivo, T5 fue el tratamiento más favorable en biomasa seca y uno de los mejores en biomasa fresca. T2 también destacó por su alto rendimiento fresco y buen nivel de biomasa seca, mientras que T4 fue competitivo en biomasa fresca. Estos resultados permiten afirmar que la producción de biomasa en espinaca hidropónica fue favorecida principalmente por las combinaciones T2, T4 y T5, con ventaja fisiológica de T5 cuando se considera la acumulación de materia seca.

4.2.4 Interacción entre sustrato y concentración nutritiva

La interacción entre sustrato y concentración nutritiva fue significativa para altura final, número final de hojas y biomasa fresca sin raíz. Este resultado indica que el efecto de la concentración de solución nutritiva no fue igual en espuma fenólica y fibra de coco. En términos agronómicos, esto significa que la respuesta de la espinaca no dependió únicamente de la cantidad de nutrientes suministrados, sino también de la forma en que cada sustrato permitió retener agua, airear la raíz y facilitar el contacto entre la solución nutritiva y el sistema radical.

En biomasa fresca, la interacción mostró que ambos sustratos incrementaron su rendimiento al pasar de 75 % a 100 % de solución nutritiva y luego disminuyeron al incrementarse la concentración a 125 %. Esta tendencia confirma que la concentración al 100 % representó el punto de mejor respuesta productiva. La disminución observada con 125 % sugiere que una mayor concentración de sales no mejoró el crecimiento y pudo generar una condición

menos favorable para la absorción de agua o nutrientes. Según Sonneveld and Voogt (2009), el manejo de la conductividad eléctrica en hidroponía debe buscar un equilibrio entre disponibilidad nutricional y presión osmótica, debido a que soluciones demasiado concentradas pueden limitar la absorción de agua.

La fibra de coco presentó valores superiores a la espuma fenólica en 75 % y 125 %, mientras que en 100 % ambos sustratos presentaron respuestas cercanas. Esto evidencia que la fibra de coco puede amortiguar parcialmente condiciones de menor o mayor concentración nutritiva, posiblemente por su capacidad de retención de humedad y comportamiento físico en la zona radical. Sin embargo, la mayor respuesta integral se logró cuando la concentración se mantuvo al 100 %, lo que confirma que el sustrato por sí solo no determina el rendimiento, sino su combinación con una solución nutritiva equilibrada.

La presencia de interacción también justifica el análisis por tratamientos y no únicamente por efectos principales. En experimentos factoriales, cuando la interacción es significativa, la comparación de combinaciones específicas permite una interpretación más precisa de la respuesta biológica. Este criterio coincide con Montgomery (2020) y Piepho and Edmondson (2018), quienes señalan que en diseños factoriales la interacción permite identificar combinaciones óptimas entre factores y evita conclusiones incompletas basadas solo en promedios generales.

4.2.5 Eficiencia de uso de agua y operación del sistema

La eficiencia de uso de agua permitió relacionar la biomasa fresca producida con el volumen total de agua repuesta durante el ciclo de cultivo. Los resultados mostraron que el tratamiento T4, fibra de coco + 75 %, presentó la mayor eficiencia de uso de agua, con 78,4 g/L. Le siguieron T2, espuma fenólica + 100 %, con 73,5 g/L, y T5, fibra de coco + 100 %, con 69,9 g/L. En contraste, T3, espuma fenólica + 125 %, presentó el menor valor, con 57,6 g/L.

Este resultado demuestra que el tratamiento más eficiente en el uso de agua no necesariamente fue el tratamiento con mayor índice integral ni el de mayor biomasa seca. T4 presentó la mayor eficiencia hídrica debido a que logró producir una alta biomasa fresca en relación con el agua repuesta. Sin embargo, su menor desempeño relativo en número de hojas y su índice integral inferior al de T2 y T5 indican que la eficiencia de agua debe interpretarse junto con las variables de crecimiento y rendimiento. Por tanto, T4 constituye una alternativa

eficiente desde el punto de vista hídrico, mientras que T2 y T5 presentan mejor equilibrio agronómico general.

La mayor eficiencia de T4 puede relacionarse con la capacidad de la fibra de coco para conservar humedad y mantener disponibilidad de agua en la zona radical, incluso con una solución nutritiva al 75 %. Este comportamiento es relevante en contextos donde el recurso hídrico es limitado, ya que permite obtener producción aceptable con menor concentración nutritiva. Sin embargo, desde una perspectiva productiva integral, la reducción de la concentración al 75 % no logró superar el desempeño conjunto de los tratamientos al 100 %.

Respecto al comportamiento operativo, el pH se mantuvo dentro de la franja referencial de 5,5 a 6,5 durante todo el ciclo de cultivo. Esta estabilidad indica que el sistema NFT mantuvo condiciones químicas adecuadas para la disponibilidad de nutrientes. El pH es una variable crítica en hidroponía porque influye en la solubilidad y absorción de elementos minerales. Gillespie et al. (2021) señalan que el pH de la solución nutritiva influye directamente en la absorción de nutrientes y en el crecimiento de la espinaca. En el presente estudio, al mantenerse el pH dentro del rango adecuado, las diferencias observadas entre tratamientos se atribuyen principalmente al efecto de las concentraciones nutritivas y sustratos evaluados, y no a desajustes severos de acidez o alcalinidad.

La conductividad eléctrica presentó diferencias entre tratamientos durante el ciclo de cultivo, coherentes con los niveles de concentración nutritiva aplicados. Los tratamientos con 75 % mostraron valores menores de CE, mientras que los tratamientos con 125 % presentaron valores superiores. Este comportamiento confirma que las soluciones nutritivas mantuvieron una diferenciación iónica durante el cultivo. Según Fathidarehnijeh et al. (2024), el control de la CE en sistemas hidropónicos recirculantes es fundamental porque permite estimar la concentración total de sales y orientar los ajustes nutricionales. Asimismo, Jain and Kaur (2024) y Sulaiman et al. (2025) destacan que el monitoreo de pH y CE es esencial para mantener la estabilidad de sistemas hidropónicos automatizados o inteligentes.

En conjunto, los resultados de operación del sistema indican que las condiciones de pH y CE fueron adecuadas para el desarrollo del cultivo. La mayor eficiencia hídrica correspondió a T4; sin embargo, al integrar crecimiento, biomasa y eficiencia de uso de agua, T2 y T5 se mantuvieron como las combinaciones más favorables para una producción equilibrada.

4.2.6 Desempeño integral y selección técnica del mejor tratamiento

La selección del mejor tratamiento debe realizarse considerando simultáneamente crecimiento, biomasa fresca, biomasa seca y eficiencia de uso de agua. Bajo este enfoque, el índice integral de desempeño permitió ordenar los tratamientos de acuerdo con su comportamiento conjunto. El tratamiento T2, espuma fenólica + 100 %, obtuvo el mayor índice integral, seguido por T5, fibra de coco + 100 %, y T4, fibra de coco + 75 %. Por tanto, T2 fue el tratamiento más equilibrado del experimento.

La superioridad integral de T2 se explica porque combinó el mejor desempeño en número de hojas, alta altura final, alta biomasa fresca y una eficiencia hídrica elevada. Aunque T5 superó a T2 en biomasa seca, y T4 superó a todos los tratamientos en eficiencia de uso de agua, T2 presentó la respuesta más uniforme en el conjunto de variables. Este resultado es importante porque en la producción hidropónica de hortalizas de hoja no basta con maximizar una sola variable; se requiere obtener plantas con buen crecimiento, rendimiento comercial aceptable, acumulación de materia seca y uso eficiente del agua.

El tratamiento T5 debe considerarse como una alternativa altamente favorable, especialmente cuando el criterio principal sea maximizar biomasa seca y mantener alta producción. Su desempeño confirma la importancia de la fibra de coco como sustrato alternativo en sistemas hidropónicos. Machado et al. (2021) reportaron que la fibra de coco puede favorecer la acumulación de biomasa y compuestos de interés en espinaca. Además, Gruda (2022) señala que el desarrollo de medios de cultivo alternativos es una línea relevante para la horticultura moderna, debido a la necesidad de sistemas más sostenibles y eficientes.

El tratamiento T4, aunque no fue el mejor integral, presentó la mayor eficiencia de uso de agua. Este resultado es relevante para zonas con limitaciones hídricas o sistemas productivos donde el objetivo sea reducir el consumo de agua manteniendo un rendimiento aceptable. La producción hidropónica recirculante tiene importancia estratégica en contextos urbanos y periurbanos, debido a que permite producir hortalizas con menor dependencia del suelo agrícola y con mayor control del recurso hídrico. Yang et al. (2024) señala que el diseño del sistema hidropónico y el manejo del agua influyen en el consumo hídrico y la productividad de hortalizas de hoja. Asimismo, Fathidarehnejeh et al. (2024) resaltan que la eficiencia de uso de agua y nutrientes es un criterio clave en la sostenibilidad de los sistemas hidropónicos.

Por otro lado, los tratamientos T1 y T3 mostraron los menores desempeños relati-

vos. T1 pudo verse limitado por la menor disponibilidad nutricional de la solución al 75 %, especialmente al combinarse con espuma fenólica. T3, pese a recibir una solución al 125 %, presentó el menor índice integral, lo que evidencia que el exceso relativo de concentración no favoreció al cultivo. Este resultado refuerza la idea de que la optimización nutricional no consiste en aplicar más nutrientes, sino en suministrarlos en una concentración adecuada para la especie, el sistema y el estado fenológico.

En consecuencia, el tratamiento técnicamente más equilibrado fue T2, espuma fenólica + solución nutritiva Yamazaki al 100 %. Sin embargo, T5, fibra de coco + 100 %, debe ser considerado como una alternativa productiva sobresaliente por su mayor biomasa seca, mientras que T4, fibra de coco + 75 %, representa una alternativa eficiente en uso de agua. Esta diferenciación permite una interpretación más sólida: T2 es el mejor tratamiento integral, T5 es el mejor para acumulación de biomasa seca y T4 es el mejor en eficiencia hídrica.

CAPÍTULO V.

CONCLUSIONES

En relación con el objetivo general, se concluye que las combinaciones de tipo de sustrato y concentración de solución nutritiva Yamazaki influyeron en el crecimiento, rendimiento, eficiencia de uso de agua y desempeño integral de la espinaca (*Spinacia oleracea* L.) cultivada en un sistema hidropónico NFT inteligente y recirculante bajo condiciones de Huamanga, Ayacucho. El tratamiento T2, correspondiente a espuma fenólica $\times$ solución nutritiva Yamazaki al 100 %, presentó el mejor desempeño agronómico integral, con un índice estandarizado de 1,01, debido a su respuesta equilibrada en altura final, número de hojas, biomasa fresca, biomasa seca y eficiencia de uso de agua. En segundo lugar, destacó el tratamiento T5, fibra de coco $\times$ solución nutritiva Yamazaki al 100 %, con un índice integral de 0,83, principalmente por su mayor acumulación de biomasa seca y alta producción de biomasa fresca. En conjunto, los resultados evidencian que la concentración nutritiva al 100 % fue la más adecuada para el cultivo hidropónico de espinaca en el sistema NFT evaluado.

En relación con el primer objetivo específico, se concluye que el crecimiento vegetativo de la espinaca, expresado en altura de planta y número de hojas, presentó diferencias entre las combinaciones factoriales evaluadas. La mayor altura final se obtuvo con el tratamiento T2, espuma fenólica $\times$ 100 %, con 21,19 cm, seguido muy de cerca por T5, fibra de coco $\times$ 100 %, con 21,17 cm; ambos tratamientos conformaron el grupo estadístico superior según la prueba de Tukey. Asimismo, el mayor número final de hojas se registró en T2, con 11,67 hojas por planta, ubicándose como el tratamiento de mejor respuesta foliar. Por tanto, la solución nutritiva Yamazaki al 100 % favoreció el crecimiento vegetativo de la espinaca, especialmente cuando se combinó con espuma fenólica.

En relación con el segundo objetivo específico, se concluye que el rendimiento de la espinaca, evaluado mediante biomasa fresca y biomasa seca sin raíz, fue influenciado por la combinación de sustrato y concentración nutritiva. En biomasa fresca, los tratamientos T2, T4 y T5 conformaron el grupo estadístico superior, lo que demuestra que estas combinaciones presentaron los mayores rendimientos comerciales. Numéricamente, T5, fibra de coco $\times$ 100 %, alcanzó la mayor biomasa fresca, con 78,92 g/planta, seguido por T2, con 76,71 g/planta, y T4, con 75,67 g/planta. En biomasa seca, T5 registró el mayor valor, con 6,43 g/planta, ubicándose en el grupo estadístico superior. Estos resultados indican que la fibra de coco asociada a la solución nutritiva Yamazaki al 100 % favoreció la mayor acumulación de materia seca en la espinaca.

En relación con el tercer objetivo específico, se concluye que el comportamiento operativo del sistema NFT fue adecuado durante el ciclo de cultivo, debido a que el pH de la solución nutritiva se mantuvo dentro de la franja referencial de 5,5 a 6,5, condición favorable para la disponibilidad y absorción de nutrientes. La conductividad eléctrica presentó diferencias coherentes con las concentraciones nutritivas aplicadas, observándose valores menores en los tratamientos al 75 %, valores intermedios en los tratamientos al 100 % y valores superiores en los tratamientos al 125 %. Asimismo, la eficiencia de uso de agua permitió diferenciar los tratamientos desde el criterio hídrico, destacando T4, fibra de coco $\times$ solución nutritiva al 75 %, con 78,4 g/L, seguido por T2, con 73,5 g/L, y T5, con 69,9 g/L. Por tanto, el sistema NFT mantuvo condiciones operativas estables y permitió identificar a T4 como la mejor alternativa en eficiencia hídrica.

En relación con el cuarto objetivo específico, se concluye que la mejor combinación de sustrato y concentración nutritiva, considerando el desempeño integral, fue T2, espuma fenólica $\times$ solución nutritiva Yamazaki al 100 %. Este tratamiento ocupó el primer lugar en el índice integral de desempeño agronómico, con 1,01, debido a su comportamiento equilibrado en crecimiento, biomasa y eficiencia de uso de agua. Sin embargo, T5, fibra de coco $\times$ 100 %, debe considerarse como una alternativa productiva sobresaliente por presentar la mayor biomasa fresca y la mayor biomasa seca, mientras que T4, fibra de coco $\times$ 75 %, destacó como la mejor alternativa cuando el criterio principal es la eficiencia hídrica. Además, la interacción significativa entre sustrato y concentración nutritiva en altura final, número final de hojas y biomasa fresca confirma que la respuesta del cultivo dependió de la combinación específica de ambos factores. Finalmente, el incremento de la solución nutritiva al 125 % no representó una ventaja agronómica ni operativa, por lo que, bajo las condiciones del presente estudio, la solución nutritiva Yamazaki al 100 % constituye la concentración más recomendable para la producción hidropónica de espinaca en sistema NFT.

CAPÍTULO VI.

RECOMENDACIONES

Se recomienda utilizar la combinación espuma fenólica × solución nutritiva Yamazaki al 100 %, correspondiente al tratamiento T2, cuando se busque el mejor desempeño agronómico integral en espinaca hidropónica bajo sistema NFT inteligente y recirculante. Esta combinación debe priorizarse porque presentó el mayor índice integral, con una respuesta equilibrada en crecimiento, biomasa y eficiencia de uso de agua.

Se recomienda emplear la solución nutritiva Yamazaki al 100 % para favorecer el crecimiento vegetativo de la espinaca, especialmente cuando se utilice espuma fenólica como sustrato. Esta recomendación se sustenta en que T2 alcanzó la mayor altura final y el mayor número de hojas por planta, por lo que constituye la mejor alternativa cuando el objetivo sea promover el desarrollo foliar.

Se recomienda considerar la combinación fibra de coco × solución nutritiva Yamazaki al 100 %, correspondiente al tratamiento T5, cuando el objetivo principal sea maximizar la producción de biomasa fresca y seca. Este tratamiento debe priorizarse en sistemas donde se busque mayor rendimiento comercial y mayor acumulación de materia seca en espinaca.

Se recomienda mantener el monitoreo periódico del pH, la conductividad eléctrica y el volumen de agua repuesta durante todo el ciclo de cultivo, a fin de asegurar la estabilidad operativa del sistema NFT. Asimismo, cuando el criterio principal sea la eficiencia hídrica, se recomienda considerar la combinación fibra de coco × solución nutritiva Yamazaki al 75 %, correspondiente al tratamiento T4, debido a que presentó la mayor producción de biomasa fresca por litro de agua repuesta.

Se recomienda manejar la solución nutritiva Yamazaki al 100 % como concentración principal para la producción hidropónica de espinaca en sistemas NFT bajo condiciones similares a Huamanga, Ayacucho. No se recomienda emplear la solución Yamazaki al 125 % como manejo estándar, debido a que no mejoró el desempeño agronómico ni la eficiencia hídrica frente al 100 %.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad, M., Fornes, F., Carrión, C., Noguera, V., Noguera, P., Maquieira, A., and Puchades, R. (2005). Physical properties of various coconut coir dusts compared to peat. *HortScience*, 40(7):2138–2144.
- Bian, Z., Wang, Y., Zhang, X., Li, T., Grundy, S., Yang, Q., and Cheng, R. (2020). A review of environment effects on nitrate accumulation in leafy vegetables grown in controlled environments. *Foods*, 9(6):732.
- Bren d'Amour, C., Reitsma, F., Baiocchi, G., Barthel, S., Güneralp, B., Erb, K.-H., Haberl, H., Creutzig, F., and Seto, K. C. (2017). Future urban land expansion and implications for global croplands. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(34):8939–8944.
- Ccahua Zamora, A., Huerta, E., Pérez, B., and Zúñiga, T. (2020). Estudio de prefactibilidad de un proyecto de producción de lechuga iceberg, espinaca baby y tomate cherry.
- Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN) – INDECI (2024). Informe de emergencia n.º 087-19/01/2024: Déficit hídrico en el departamento de ayacucho. Technical report, Instituto Nacional de Defensa Civil.
- Chillcce Prado, J. H. (2023). Construcción y evaluación de un sistema aeropónico vertical asistido por la plataforma arduino en la producción de lechuga, ayacucho, 2022. Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.
- Evans, M. R. and Stamps, R. H. (1996). Source variation in physical and chemical properties of coconut coir dust. *HortScience*, 31(6):965–967.
- Fathidarehniyeh, E., Nadeem, M., Cheema, M., Thomas, R., Krishnapillai, M., and Galagedara, L. (2024). Current perspective on nutrient solution management strategies to improve the nutrient and water use efficiency in hydroponic systems. *Canadian Journal of Plant Science*, 104(2):88–102.
- Ferrarezi, R. S., Qin, K., Nguyen, L. X., Poole, S. D., Cárdenas-Gallegos, J. S., de Oliveira, H. F. E., and Housley, M. J. (2024). Multi-season evaluation of substrates for optimized arugula and lettuce production in hydroponics. *HortScience*, 59(3):403–411.
- Gao, W., He, D., Ji, F., Zhang, S., and Zheng, J. (2020). Effects of daily light integral and led spectrum on growth and nutritional quality of hydroponic spinach. *Agronomy*, 10(8):1082.

- Gillespie, D. P., Papio, G., and Kubota, C. (2021). High nutrient concentrations of hydroponic solution can improve growth and nutrient uptake of spinach (*spinacia oleracea* l.) grown in acidic nutrient solution. *HortScience*, 56(6):687–694.
- Gobierno Regional Ayacucho (2023). Declaran en emergencia a 28 distritos de ayacucho por peligro inminente ante déficit hídrico. Nota de prensa.
- Granda Delgado, R. H. (2022). Diseño de un sistema de control automático de ph y conductividad eléctrica para garantizar el balance de la solución nutritiva de un sistema hidropónico nft en la facultad de agronomía de la universidad nacional pedro ruiz gallo.
- Gruda, N. S. (2022). Advances in soilless culture and growing media in today's horticulture—an editorial. *Agronomy*, 12(11):2773.
- Hurlbert, S. H. (1984). Pseudoreplication and the design of ecological field experiments. *Ecological Monographs*, 54(2):187–211.
- Inca Sánchez, S. A. and Roselló Moreno, H. G. (2013). Automatización y control del sistema nft para cultivos hidropónicos.
- Ingar-de la Cruz, L. M., Toledo-Choquehuanca, J. J. M., Quispe-Condori, A., Andrés-Orizano, J. Á., Ortiz-Morera, N. C., Ramírez-Rojas, M. A., Macavilca-Villar, P. M., Solórzano-Acosta, R. A., and Cruz-Luis, J. A. (2023). *Guía técnica de cultivos hidropónicos*. Instituto Nacional de Innovación Agraria, Lima, Perú.
- Jain, S. and Kaur, M. (2024). Design and implementation of an iot-based automated ec and ph control system in an nft-based hydroponic farm. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(1):13078–13081.
- Janampa Huamaní, M. (2018). Niveles de estiércol de ovino y formas de siembra en el rendimiento de espinaca (*Spinacia oleracea* l.) canaán, 2750 msnm - ayacucho.
- Jayo Huamán, J. C. (2018). Niveles de guano de isla y dosis de microorganismos eficaces en el rendimiento de espinaca (*Spinacia oleracea* l.) canaán, 2750 msnm - ayacucho.
- Machado, R. M. A., Alves-Pereira, I., Ferreira, R., and Gruda, N. S. (2021). Coir, an alternative to peat: Effects on plant growth, phytochemical accumulation, and antioxidant power of spinach. *Horticulturae*, 7(6):127.
- Maneejantra, N., Tsukagoshi, S., Lu, N., Supaibulwatana, K., Takagaki, M., and Yamori, W. (2016). A quantitative analysis of nutrient requirements for hydroponic spinach (*Spinacia oleracea* l.) production under artificial light in a plant factory. *Journal of Fertilizers and Pesticides*, 7(2):170.

- Montgomery, D. C. (2020). *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 10 edition.
- Municipalidad Provincial de Huamanga (2025). Plan de desarrollo urbano de la ciudad de ayacucho 2021–2031. Publicación oficial en gob.pe. Consulta: 2026-03-01.
- Öztekin, G. B., Uludağ, T., and Tüzel, Y. (2018). Growing spinach (*spinacia oleracea* l.) in a floating system with different concentrations of nutrient solution. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16(3):3333–3350.
- Piepho, H.-P. and Edmondson, R. N. (2018). A tutorial on the statistical analysis of factorial experiments with qualitative and quantitative treatment factor levels. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 204(5):429–455.
- Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Tignor, M., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A., and Rama, B., editors (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Prado Allica, K. (2018). Efecto de tres concentraciones de nitrato de calcio en el rendimiento de lactuca sativa l. “lechuga”, en cultivo hidropónico, ayacucho – 2017. Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.
- Presidencia del Consejo de Ministros (PCM) (2023). Decreto supremo n.º 104-2023-pcm. Normas legales del Estado peruano. Declara estado de emergencia por peligro inminente ante déficit hídrico.
- Quispe, D. R. C. (2016). Cultivo hidropónico de espinaca mediante nft: diseño e implementación de un sistema de control. Perfiles de Ingeniería, Universidad Ricardo Palma. Referencia nacional sobre sistema NFT aplicado a espinaca.
- Resh, H. M. (2022). *Hydroponic food production: A definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower*. CRC Press, Boca Raton, FL, 8 edition.
- Riaño-Castillo, E. R. et al. (2019). Changes in nutrient levels in hydroponic solution of baby spinach (*Spinacia oleracea* l.), for future application in aquaponics. *Orinoquia*, 23(1):73–82.
- Savvas, D. and Gruda, N. S. (2018). Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry: A review. *European Journal of Horticultural Science*, 83(5):280–293.
- Senthamizh, R. S. R. and Anbarasan, A. P. (2025). Urban agriculture in a changing world: A thematic review of global trends, innovations, governance, and pathways to sustainability. *Frontiers*

in Sustainable Food Systems, 9:1624426.

- Sonneveld, C. and Voogt, W. (2009). *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*. Springer, Dordrecht.
- Sulaiman, H., Yusof, A. A., and Mohamed Nor, M. K. (2025). Automated hydroponic nutrient dosing system: A scoping review of pH and electrical conductivity dosing frameworks. *AgriEngineering*, 7(2):43.
- UN-Habitat (2022). World cities report 2022: Envisaging the future of cities. Technical report, United Nations Human Settlements Programme, Nairobi.
- Xiong, J., Tian, Y., Wang, J., Liu, W., and Chen, Q. (2017). Comparison of coconut coir, rockwool, and peat cultivations for tomato production: Nutrient balance, plant growth and fruit quality. *Frontiers in Plant Science*, 8:1327.
- Yamazaki, K. (1982). *Nutrient solution culture*. Pak-kyo Co., Tokyo, Japan. In Japanese.
- Yang, T., Samarakoon, U., and Altland, J. E. (2024). Growth, phytochemical concentration, nutrient uptake, and water consumption of butterhead lettuce in response to hydroponic system design and growing season. *Scientia Horticulturae*, 332:113201.

ANEXOS

Anexo A. Base consolidada de crecimiento y rendimiento de espinaca

Ficha técnica del anexo. Consolidado de registros semanales de crecimiento y rendimiento de espinaca (*Spinacia oleracea* L.) cultivada en Sistema hidropónico NFT inteligente y recirculante. La unidad de presentación es el **tubo hidropónico**; cada valor corresponde al promedio de cuatro plantas evaluadas por tubo.

Responsable: Espino Curi David Helcias

Lugar: Huamanga, Ayacucho

Inicio de evaluación: 10/02/2025

Cosecha: 17/03/2025

Unidad de registro: Tubo hidropónico: promedio de cuatro plantas evaluadas.

Tabla A.1. Codificación de tratamientos utilizados en el registro consolidado

Trat.	Sustrato	Solución	Descripción operativa
T1	Espuma fenólica	75 %	Espuma fenólica con solución nutritiva Yamazaki al 75 % de concentración.
T2	Espuma fenólica	100 %	Espuma fenólica con solución nutritiva Yamazaki al 100 % de concentración.
T3	Espuma fenólica	125 %	Espuma fenólica con solución nutritiva Yamazaki al 125 % de concentración.
T4	Fibra de coco	75 %	Fibra de coco con solución nutritiva Yamazaki al 75 % de concentración.
T5	Fibra de coco	100 %	Fibra de coco con solución nutritiva Yamazaki al 100 % de concentración.
T6	Fibra de coco	125 %	Fibra de coco con solución nutritiva Yamazaki al 125 % de concentración.

Nota. Trat. = tratamiento. La concentración corresponde a la proporción aplicada de solución nutritiva Yamazaki respecto a la formulación base.

Tabla A.2. Diccionario de variables utilizadas en las tablas consolidadas

Variable	Unidad	Definición	Momento
Alt. S1–S6	cm	Altura promedio semanal de las plantas evaluadas en cada tubo.	Semanas 1–6
Hoj. S1–S6	hojas	Número promedio de hojas por tubo hidropónico.	Semanas 1–6
Δ Alt.	cm	Diferencia entre la altura de la semana 6 y la semana 1.	Final
Δ Hoj.	hojas	Diferencia entre el número de hojas de la semana 6 y la semana 1.	Final
PF	g	Peso fresco sin raíz registrado al momento de cosecha.	Cosecha
PS	g	Peso seco sin raíz, posterior al secado en estufa.	Cosecha
MS	%	Porcentaje de materia seca calculado a partir de peso seco y peso fresco.	Cosecha

Tabla A.3. Resumen descriptivo por tratamiento de las principales variables finales

Trat.	Mód.	Sustrato	Sol.	Alt. S6	Hoj. S6	PF	PS	MS	Δ Alt.	Δ Hoj.
T1	M1	Espuma fenólica	75 %	17,85 $\pm$ 4,99	10,79 $\pm$ 2,51	62,92 $\pm$ 23,09	5,32 $\pm$ 1,26	8,88 $\pm$ 1,44	14,52 $\pm$ 4,48	8,79 $\pm$ 2,51
T2	M2	Espuma fenólica	100 %	21,19 $\pm$ 4,78	11,67 $\pm$ 2,80	76,71 $\pm$ 26,10	6,13 $\pm$ 1,62	8,19 $\pm$ 0,79	17,72 $\pm$ 4,31	9,17 $\pm$ 2,28
T3	M3	Espuma fenólica	125 %	18,37 $\pm$ 5,43	10,50 $\pm$ 2,71	65,04 $\pm$ 24,57	5,36 $\pm$ 1,35	8,62 $\pm$ 1,25	15,22 $\pm$ 4,89	7,83 $\pm$ 2,28
T4	M4	Fibra de coco	75 %	19,83 $\pm$ 6,12	10,29 $\pm$ 2,81	75,67 $\pm$ 26,66	6,07 $\pm$ 1,39	8,37 $\pm$ 1,21	16,42 $\pm$ 5,56	8,08 $\pm$ 2,54
T5	M5	Fibra de coco	100 %	21,17 $\pm$ 4,41	11,00 $\pm$ 2,38	78,92 $\pm$ 22,93	6,43 $\pm$ 1,55	8,26 $\pm$ 0,47	17,70 $\pm$ 3,97	8,54 $\pm$ 1,91
T6	M6	Fibra de coco	125 %	19,38 $\pm$ 5,39	10,88 $\pm$ 2,71	69,21 $\pm$ 25,09	5,71 $\pm$ 1,79	8,40 $\pm$ 0,59	16,11 $\pm$ 4,83	8,54 $\pm$ 2,32

Nota. Valores expresados como media $\pm$ desviación estándar por tratamiento, considerando seis tubos por tratamiento. Alt. S6 = altura a la semana 6 (cm); Hoj. S6 = hojas a la semana 6; PF = peso fresco sin raíz; PS = peso seco sin raíz; MS = materia seca.

Tabla A.4. Base consolidada por tubo: altura semanal y biomasa final sin raíz

Mód.	Trat.	Sustrato	Sol.	Tubo	Alt. S1 (cm)	Alt. S2 (cm)	Alt. S3 (cm)	Alt. S4 (cm)	Alt. S5 (cm)	Alt. S6 (cm)	Δ Alt. (cm)	PF (g)	PS (g)	MS (%)
M1	T1	Espuma fenólica	75 %	Tb1	3,80	6,00	10,48	14,90	19,38	23,40	19,60	87,50	6,84	7,81
M1	T1	Espuma fenólica	75 %	Tb2	3,90	6,08	10,53	14,88	19,25	23,13	19,23	86,00	6,18	7,18
M1	T1	Espuma fenólica	75 %	Tb3	3,60	5,38	9,03	12,43	15,90	19,40	15,80	74,50	5,93	7,96
M1	T1	Espuma fenólica	75 %	Tb4	3,20	4,78	7,78	10,75	13,43	16,40	13,20	54,50	5,15	9,45
M1	T1	Espuma fenólica	75 %	Tb5	2,90	4,18	6,48	8,73	11,13	13,40	10,50	41,50	4,52	10,88
M1	T1	Espuma fenólica	75 %	Tb6	2,60	3,58	5,33	7,33	9,38	11,40	8,80	33,50	3,34	9,97
M2	T2	Espuma fenólica	100 %	Tb1	3,80	6,60	11,45	17,13	22,55	25,85	22,05	101,25	7,99	7,89
M2	T2	Espuma fenólica	100 %	Tb2	4,05	6,90	11,85	17,55	23,08	26,38	22,33	106,75	7,65	7,17
M2	T2	Espuma fenólica	100 %	Tb3	3,75	6,18	10,48	15,05	19,78	23,78	20,03	89,75	6,80	7,58
M2	T2	Espuma fenólica	100 %	Tb4	3,30	5,23	8,53	12,20	15,85	19,05	15,75	65,25	5,65	8,66
M2	T2	Espuma fenólica	100 %	Tb5	3,10	4,63	7,20	10,48	13,80	16,80	13,70	52,00	4,83	9,28
M2	T2	Espuma fenólica	100 %	Tb6	2,80	4,23	6,40	9,38	12,38	15,28	12,48	45,25	3,89	8,60
M3	T3	Espuma fenólica	125 %	Tb1	3,68	6,10	10,35	14,63	19,40	23,88	20,20	89,75	6,75	7,52
M3	T3	Espuma fenólica	125 %	Tb2	3,78	6,30	10,63	14,95	19,78	24,20	20,42	91,50	6,60	7,21
M3	T3	Espuma fenólica	125 %	Tb3	3,38	5,65	9,25	13,13	16,95	20,75	17,37	78,00	6,13	7,85
M3	T3	Espuma fenólica	125 %	Tb4	3,00	4,73	7,30	10,33	13,38	16,75	13,75	53,50	4,98	9,30
M3	T3	Espuma fenólica	125 %	Tb5	2,70	3,90	5,98	8,08	10,33	13,33	10,63	42,25	4,33	10,24
M3	T3	Espuma fenólica	125 %	Tb6	2,40	3,38	5,03	6,83	8,85	11,33	8,93	35,25	3,39	9,62
M4	T4	Fibra de coco	75 %	Tb1	3,85	6,73	11,38	17,13	22,58	25,88	22,03	101,00	7,59	7,51

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla A.4: altura semanal y biomasa final sin raíz

Mód.	Trat.	Sustrato	Sol.	Tubo	Alt. S1 (cm)	Alt. S2 (cm)	Alt. S3 (cm)	Alt. S4 (cm)	Alt. S5 (cm)	Alt. S6 (cm)	Δ Alt. (cm)	PF (g)	PS (g)	MS (%)
M4	T4	Fibra de coco	75 %	Tb2	4,13	7,05	12,00	17,78	23,50	26,68	22,55	107,00	7,57	7,08
M4	T4	Fibra de coco	75 %	Tb3	3,73	6,00	10,15	14,30	18,80	22,53	18,80	87,00	6,49	7,46
M4	T4	Fibra de coco	75 %	Tb4	3,20	4,93	8,05	11,25	14,25	17,78	14,58	65,25	5,63	8,62
M4	T4	Fibra de coco	75 %	Tb5	2,90	4,23	6,63	8,90	11,25	13,90	11,00	51,00	5,00	9,80
M4	T4	Fibra de coco	75 %	Tb6	2,70	3,83	5,63	7,88	10,05	12,25	9,55	42,75	4,17	9,76
M5	T5	Fibra de coco	100 %	Tb1	3,73	6,35	10,85	15,53	21,08	25,05	21,32	100,25	7,80	7,78
M5	T5	Fibra de coco	100 %	Tb2	4,03	6,85	11,58	16,63	22,15	26,05	22,02	104,25	8,18	7,84
M5	T5	Fibra de coco	100 %	Tb3	3,80	6,25	10,45	14,98	19,98	23,98	20,18	91,75	7,35	8,01
M5	T5	Fibra de coco	100 %	Tb4	3,30	5,23	8,53	12,20	15,85	19,05	15,75	69,25	5,73	8,27
M5	T5	Fibra de coco	100 %	Tb5	3,10	4,65	7,53	10,88	14,23	17,25	14,15	58,00	5,13	8,84
M5	T5	Fibra de coco	100 %	Tb6	2,90	4,33	6,83	9,88	12,85	15,65	12,75	50,00	4,41	8,82
M6	T6	Fibra de coco	125 %	Tb1	3,80	6,33	10,73	15,25	20,28	24,83	21,03	94,75	7,45	7,86
M6	T6	Fibra de coco	125 %	Tb2	3,90	6,53	10,98	15,55	20,58	25,08	21,18	95,75	7,68	8,02
M6	T6	Fibra de coco	125 %	Tb3	3,50	5,93	9,73	13,73	17,78	21,83	18,33	82,25	6,53	7,93
M6	T6	Fibra de coco	125 %	Tb4	3,10	4,93	7,73	11,05	14,25	17,83	14,73	58,50	5,08	8,68
M6	T6	Fibra de coco	125 %	Tb5	2,80	4,13	6,43	8,68	11,25	14,35	11,55	45,50	4,28	9,40
M6	T6	Fibra de coco	125 %	Tb6	2,50	3,63	5,43	7,40	9,68	12,35	9,85	38,50	3,28	8,51

Nota. Alt. S1–S6 = altura promedio semanal; Δ Alt. = Alt. S6 - Alt. S1; PF = peso fresco sin raíz; PS = peso seco en estufa sin raíz; MS = materia seca. Tb = tubo NFT evaluado dentro del tratamiento.

Tabla A.5. Base consolidada por tubo: número promedio de hojas por semana

Mód.	Trat.	Sustrato	Sol.	Tubo	Hoj. S1	Hoj. S2	Hoj. S3	Hoj. S4	Hoj. S5	Hoj. S6	Δ Hoj.
					(hojas)	(hojas)	(hojas)	(hojas)	(hojas)	(hojas)	
M1	T1	Espuma fenólica	75 %	Tb1	2,00	3,50	5,50	8,25	10,75	13,50	11,50
M1	T1	Espuma fenólica	75 %	Tb2	2,00	3,50	5,25	8,25	10,75	13,25	11,25
M1	T1	Espuma fenólica	75 %	Tb3	2,00	3,00	4,75	7,00	9,50	12,00	10,00
M1	T1	Espuma fenólica	75 %	Tb4	2,00	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	8,00
M1	T1	Espuma fenólica	75 %	Tb5	2,00	2,00	3,50	5,00	6,50	8,50	6,50
M1	T1	Espuma fenólica	75 %	Tb6	2,00	2,00	2,25	4,00	5,50	7,50	5,50
M2	T2	Espuma fenólica	100 %	Tb1	3,00	4,00	6,00	8,75	11,75	14,25	11,25
M2	T2	Espuma fenólica	100 %	Tb2	3,00	4,00	6,25	9,00	12,00	15,00	12,00
M2	T2	Espuma fenólica	100 %	Tb3	3,00	3,50	5,50	8,00	10,25	13,00	10,00
M2	T2	Espuma fenólica	100 %	Tb4	2,00	3,00	4,50	6,25	8,25	10,25	8,25
M2	T2	Espuma fenólica	100 %	Tb5	2,00	2,75	3,75	5,25	7,25	9,25	7,25
M2	T2	Espuma fenólica	100 %	Tb6	2,00	2,50	3,25	4,75	6,50	8,25	6,25
M3	T3	Espuma fenólica	125 %	Tb1	3,00	4,00	5,75	8,25	10,75	13,25	10,25
M3	T3	Espuma fenólica	125 %	Tb2	3,00	4,00	6,00	8,25	10,75	13,50	10,50
M3	T3	Espuma fenólica	125 %	Tb3	3,00	3,75	5,25	7,00	9,25	11,50	8,50
M3	T3	Espuma fenólica	125 %	Tb4	3,00	3,00	4,00	6,00	7,75	9,75	6,75
M3	T3	Espuma fenólica	125 %	Tb5	2,00	3,00	3,75	5,00	6,50	8,00	6,00
M3	T3	Espuma fenólica	125 %	Tb6	2,00	3,00	3,00	4,00	5,75	7,00	5,00
M4	T4	Fibra de coco	75 %	Tb1	2,25	2,75	5,00	7,50	10,50	12,75	10,50

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla A.5: número promedio de hojas por semana

Mód.	Trat.	Sustrato	Sol.	Tubo	Hoj. S1 (hojas)	Hoj. S2 (hojas)	Hoj. S3 (hojas)	Hoj. S4 (hojas)	Hoj. S5 (hojas)	Hoj. S6 (hojas)	Δ Hoj. (hojas)
M4	T4	Fibra de coco	75 %	Tb2	3,00	3,00	5,50	8,00	11,00	13,75	10,75
M4	T4	Fibra de coco	75 %	Tb3	2,00	2,50	4,00	6,50	8,75	11,50	9,50
M4	T4	Fibra de coco	75 %	Tb4	2,00	2,00	3,00	5,00	6,75	9,25	7,25
M4	T4	Fibra de coco	75 %	Tb5	2,00	2,00	2,75	4,00	5,75	7,75	5,75
M4	T4	Fibra de coco	75 %	Tb6	2,00	2,00	2,00	3,25	4,75	6,75	4,75
M5	T5	Fibra de coco	100 %	Tb1	2,75	3,75	5,75	8,00	10,00	13,00	10,25
M5	T5	Fibra de coco	100 %	Tb2	3,00	4,00	6,00	8,00	11,00	13,75	10,75
M5	T5	Fibra de coco	100 %	Tb3	3,00	3,75	5,50	8,00	10,25	12,50	9,50
M5	T5	Fibra de coco	100 %	Tb4	2,00	3,00	4,50	6,25	8,00	9,75	7,75
M5	T5	Fibra de coco	100 %	Tb5	2,00	3,00	4,00	5,75	7,50	9,00	7,00
M5	T5	Fibra de coco	100 %	Tb6	2,00	2,50	3,50	5,00	6,75	8,00	6,00
M6	T6	Fibra de coco	125 %	Tb1	2,75	4,00	6,00	8,25	11,00	13,75	11,00
M6	T6	Fibra de coco	125 %	Tb2	3,00	4,00	6,00	8,25	11,00	13,75	10,75
M6	T6	Fibra de coco	125 %	Tb3	2,25	4,00	5,75	7,75	10,00	12,00	9,75
M6	T6	Fibra de coco	125 %	Tb4	2,00	3,00	4,00	6,00	8,00	10,00	8,00
M6	T6	Fibra de coco	125 %	Tb5	2,00	2,25	4,00	5,25	6,25	8,00	6,00
M6	T6	Fibra de coco	125 %	Tb6	2,00	2,00	3,50	4,00	6,00	7,75	5,75

Nota. Hoj. S1–S6 = número promedio de hojas por semana; Δ Hoj. = Hoj. S6 - Hoj. S1. Tb = tubo NFT evaluado dentro del tratamiento.

Anexo B. Base consolidada operativa de pH, conductividad eléctrica y agua repuesta

Ficha técnica del anexo. Consolidado de registros operativos semanales de pH, conductividad eléctrica y agua repuesta durante el cultivo de espinaca (*Spinacia oleracea* L.) en Sistema hidropónico NFT inteligente y recirculante. La unidad de presentación corresponde al **tratamiento por semana**, registrando el comportamiento operativo del sistema NFT durante las seis semanas posteriores al trasplante.

Responsable: Espino Curi David Helcias

Lugar: Huamanga, Ayacucho

Inicio de evaluación: 10/02/2025

Cosecha: 17/03/2025

Unidad de registro: Tratamiento por semana de evaluación.

Aclaración metodológica. Los registros de pH, conductividad eléctrica y agua repuesta corresponden al comportamiento operativo de cada tratamiento/módulo durante el ciclo de cultivo. Estos registros se presentan como evidencia de monitoreo y control del sistema, no como unidades experimentales independientes para análisis inferencial.

Tabla B.1. Codificación de tratamientos utilizados en el registro operativo semanal

Trat.	Mód.	Sustrato	Solución	Descripción operativa
T1	M1	Espuma fenólica	75 %	Espuma fenólica con solución nutritiva Yamazaki al 75 %.
T2	M2	Espuma fenólica	100 %	Espuma fenólica con solución nutritiva Yamazaki al 100 %.
T3	M3	Espuma fenólica	125 %	Espuma fenólica con solución nutritiva Yamazaki al 125 %.
T4	M4	Fibra de coco	75 %	Fibra de coco con solución nutritiva Yamazaki al 75 %.
T5	M5	Fibra de coco	100 %	Fibra de coco con solución nutritiva Yamazaki al 100 %.
T6	M6	Fibra de coco	125 %	Fibra de coco con solución nutritiva Yamazaki al 125 %.

Nota. Trat. = tratamiento; Mód. = módulo operativo. La concentración corresponde a la proporción aplicada de la solución nutritiva Yamazaki respecto a la formulación base.

Tabla B.2. Diccionario de variables operativas utilizadas en las tablas consolidadas

Variable	Unidad	Definición	Momento
pH promedio	–	Valor promedio semanal del pH de la solución nutritiva registrado por tratamiento.	Semanas 1–6
CE promedio	dS m ⁻¹	Conductividad eléctrica promedio semanal de la solución nutritiva.	Semanas 1–6
Agua repuesta	L	Volumen de agua agregado para restituir el nivel operativo de la solución nutritiva.	Semanas 1–6
Agua total	L	Suma del volumen de agua repuesta durante las seis semanas del ciclo de cultivo.	Final
<i>n</i> días	días	Número de días considerados en cada semana de registro operativo.	Semanal

Nota. CE = conductividad eléctrica. En el documento también puede denominarse agua agregada; para mantener coherencia metodológica se emplea el término agua repuesta.

Tabla B.3. Resumen descriptivo operativo por tratamiento durante el ciclo de cultivo

Trat.	Mód.	Sustrato	Sol.	pH prom.	Rango pH	CE prom. (dS m ⁻¹)	Rango CE (dS m ⁻¹)	Agua total (L)	Agua sem. (L)
T1	M1	Espuma fenólica	75 %	5,873 ± 0,128	5,779–6,113	1,401 ± 0,032	1,363–1,437	23,35	3,89 ± 1,87
T2	M2	Espuma fenólica	100 %	5,880 ± 0,122	5,789–6,107	1,813 ± 0,038	1,770–1,866	25,05	4,17 ± 1,97
T3	M3	Espuma fenólica	125 %	5,880 ± 0,122	5,789–6,107	2,118 ± 0,106	1,948–2,248	27,10	4,52 ± 1,98
T4	M4	Fibra de coco	75 %	5,894 ± 0,122	5,809–6,119	1,411 ± 0,035	1,370–1,456	23,15	3,86 ± 1,92
T5	M5	Fibra de coco	100 %	5,881 ± 0,124	5,789–6,114	2,136 ± 0,083	2,014–2,224	27,10	4,52 ± 1,98
T6	M6	Fibra de coco	125 %	5,878 ± 0,118	5,789–6,097	2,211 ± 0,064	2,130–2,304	27,10	4,52 ± 1,98

Nota. Los valores de pH, CE y agua semanal se expresan como media ± desviación estándar de seis semanas de evaluación. Agua total = suma del agua repuesta durante el ciclo de cultivo.

Tabla B.4. Base consolidada operativa semanal: pH, conductividad eléctrica y agua repuesta

Mód.	Trat.	Sustrato	Sol.	Semana	pH prom.	CE prom. (dS m ⁻¹)	Agua repuesta (L)	n días
M1	T1	Espuma fenólica	75 %	1	6,113	1,430	1,50	7
M1	T1	Espuma fenólica	75 %	2	5,921	1,370	2,55	7
M1	T1	Espuma fenólica	75 %	3	5,819	1,363	3,30	7
M1	T1	Espuma fenólica	75 %	4	5,807	1,387	4,10	7
M1	T1	Espuma fenólica	75 %	5	5,797	1,416	5,20	7
M1	T1	Espuma fenólica	75 %	6	5,779	1,437	6,70	7
M2	T2	Espuma fenólica	100 %	1	6,107	1,830	1,50	7
M2	T2	Espuma fenólica	100 %	2	5,930	1,770	2,85	7
M2	T2	Espuma fenólica	100 %	3	5,830	1,771	3,65	7
M2	T2	Espuma fenólica	100 %	4	5,817	1,806	4,45	7
M2	T2	Espuma fenólica	100 %	5	5,807	1,836	5,55	7
M2	T2	Espuma fenólica	100 %	6	5,789	1,866	7,05	7
M3	T3	Espuma fenólica	125 %	1	6,107	1,948	1,80	7
M3	T3	Espuma fenólica	125 %	2	5,931	2,041	3,20	7
M3	T3	Espuma fenólica	125 %	3	5,830	2,169	4,00	7
M3	T3	Espuma fenólica	125 %	4	5,817	2,152	4,80	7

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla B.4: pH, conductividad eléctrica y agua repuesta

Mód.	Trat.	Sustrato	Sol.	Semana	pH prom.	CE prom. (dS m ⁻¹)	Agua repuesta (L)	n días
M3	T3	Espuma fenólica	125 %	5	5,807	2,152	5,90	7
M3	T3	Espuma fenólica	125 %	6	5,789	2,248	7,40	7
M4	T4	Fibra de coco	75 %	1	6,119	1,440	1,35	7
M4	T4	Fibra de coco	75 %	2	5,950	1,379	2,50	7
M4	T4	Fibra de coco	75 %	3	5,841	1,370	3,30	7
M4	T4	Fibra de coco	75 %	4	5,827	1,396	4,10	7
M4	T4	Fibra de coco	75 %	5	5,817	1,426	5,20	7
M4	T4	Fibra de coco	75 %	6	5,809	1,456	6,70	7
M5	T5	Fibra de coco	100 %	1	6,114	2,058	1,80	7
M5	T5	Fibra de coco	100 %	2	5,931	2,014	3,20	7
M5	T5	Fibra de coco	100 %	3	5,830	2,182	4,00	7
M5	T5	Fibra de coco	100 %	4	5,817	2,141	4,80	7
M5	T5	Fibra de coco	100 %	5	5,807	2,199	5,90	7
M5	T5	Fibra de coco	100 %	6	5,789	2,224	7,40	7
M6	T6	Fibra de coco	125 %	1	6,097	2,190	1,80	7
M6	T6	Fibra de coco	125 %	2	5,930	2,130	3,20	7

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla B.4: pH, conductividad eléctrica y agua repuesta

Mód.	Trat.	Sustrato	Sol.	Semana	pH prom.	CE prom. (dS m ⁻¹)	Agua repuesta (L)	n días
M6	T6	Fibra de coco	125 %	3	5,830	2,166	4,00	7
M6	T6	Fibra de coco	125 %	4	5,817	2,214	4,80	7
M6	T6	Fibra de coco	125 %	5	5,807	2,263	5,90	7
M6	T6	Fibra de coco	125 %	6	5,789	2,304	7,40	7

Nota. Los registros corresponden al promedio semanal por tratamiento. CE = conductividad eléctrica. El agua repuesta corresponde al volumen agregado semanalmente para restituir el nivel operativo de la solución nutritiva.

Anexo C. Panel fotográfico del sistema hidropónico NFT

El presente anexo reúne evidencias fotográficas de la implementación, operación, monitoreo, cosecha y procesamiento final de muestras del sistema hidropónico NFT inteligente y recirculante utilizado para el cultivo de espinaca. Las imágenes documentan la secuencia experimental y respaldan las actividades descritas en la metodología.

C.1. Área experimental acondicionada



Figura C.1. Área acondicionada para la implementación del sistema hidropónico NFT.

Nota. La fotografía corresponde al ambiente de azotea donde se implementó el sistema experimental. Se aprecia la cobertura superior, la ventilación natural y el espacio disponible para la instalación de los módulos NFT, reservorios, tuberías y componentes de control.

C.2. Supervisión del área de instalación



Figura C.2. Supervisión del área destinada a la instalación del módulo hidropónico.

Nota. La fotografía registra la verificación del ambiente seleccionado para el desarrollo del trabajo de investigación. Esta revisión permitió constatar las condiciones de espacio, protección y accesibilidad necesarias para la instalación del sistema hidropónico NFT.

C.3. Componentes del sistema hidropónico



Figura C.3. Componentes hidráulicos, eléctricos y electrónicos empleados en el sistema NFT.

Nota. La fotografía presenta los principales componentes empleados en la implementación del sistema: bombas de recirculación, sensores, módulos electrónicos, accesorios hidráulicos y elementos de conexión. Estos componentes conformaron la base operativa del sistema hidropónico inteligente.

C.4. Calibración de sensores

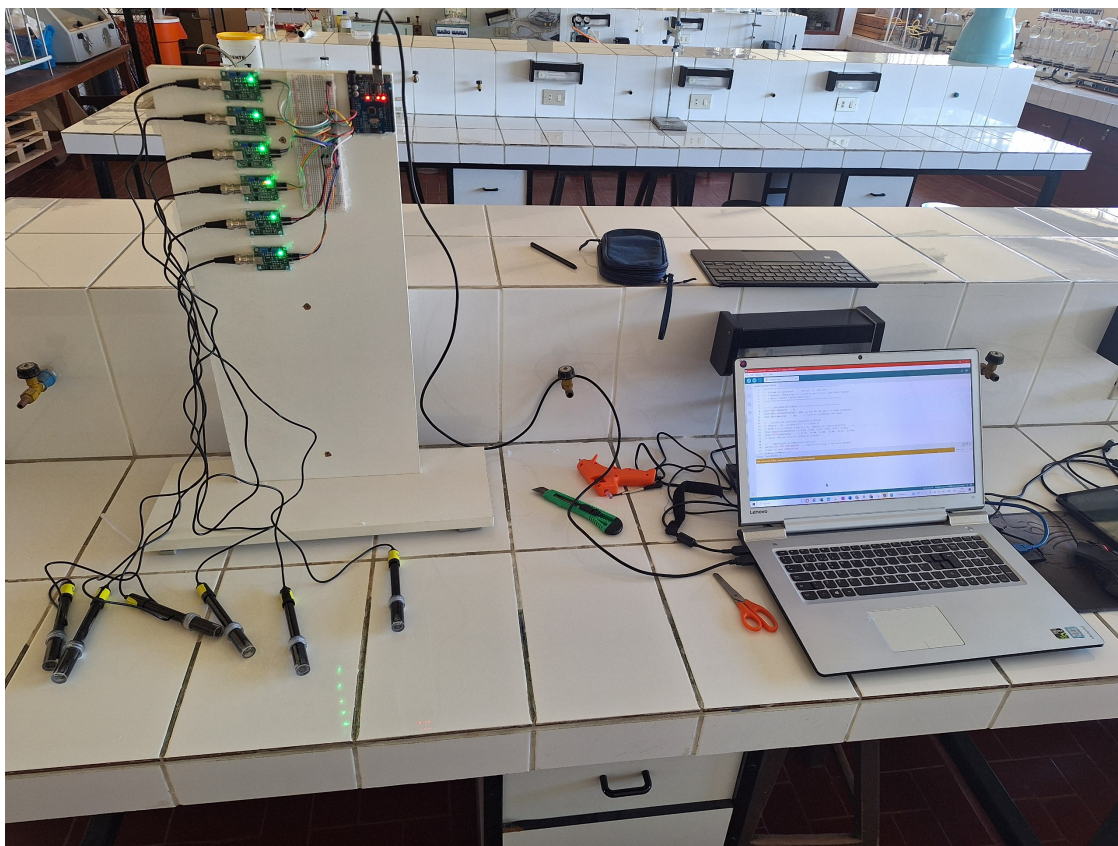


Figura C.4. Calibración y prueba de sensores para el monitoreo de la solución nutritiva.

Nota. La fotografía registra la calibración y verificación de los sensores antes de su instalación en el módulo hidropónico. Esta actividad aseguró la lectura adecuada de las variables relacionadas con la solución nutritiva durante la etapa experimental.

C.5. Estructura de soporte del sistema NFT



Figura C.5. Estructura metálica utilizada como soporte de los canales hidropónicos NFT.

Nota. La fotografía muestra la estructura metálica construida para sostener los canales de cultivo. Esta estructura permitió organizar los tubos en niveles, mantener la estabilidad del sistema y facilitar la circulación de la solución nutritiva.

C.6. Montaje de tubos y canales NFT



Figura C.6. Montaje de tubos, canales y conexiones hidráulicas del sistema NFT.

Nota. La fotografía evidencia el proceso de instalación de los tubos y conexiones hidráulicas. La disposición de los canales permitió conducir la solución nutritiva desde el reservorio hacia las plantas mediante un sistema de recirculación continua.

C.7. Sistema NFT implementado antes del cultivo

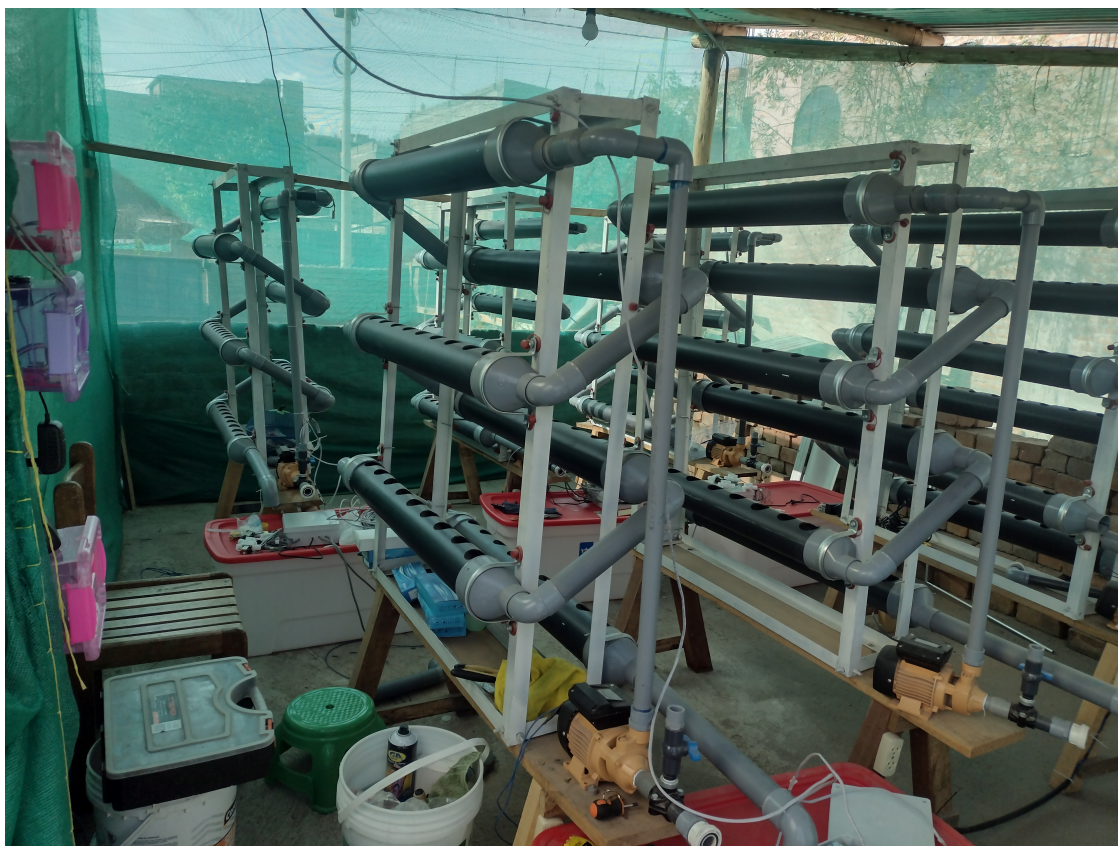


Figura C.7. Sistema hidropónico NFT instalado antes del establecimiento de las plantas.

Nota. La fotografía muestra el sistema NFT instalado con sus canales, reservorios, tuberías y bombas de recirculación. Esta etapa correspondió a la verificación inicial del funcionamiento hidráulico antes del establecimiento del cultivo.

C.8. Sistema de recirculación y control



Figura C.8. Sistema de recirculación y control electrónico del módulo hidropónico NFT.

Nota. La fotografía evidencia la integración entre el reservorio, la bomba, las tuberías de conducción y el módulo electrónico de control. Esta configuración permitió operar el sistema NFT de manera recirculante durante el desarrollo del cultivo.

C.9. Verificación de sensores y conexiones



Figura C.9. Verificación de sensores y conexiones instaladas en el sistema NFT.

Nota. La fotografía registra la revisión de sensores, cableado y conexiones durante el funcionamiento del módulo. Esta verificación permitió mantener la operatividad del sistema de monitoreo durante la ejecución del experimento.

C.10. Monitoreo de la solución nutritiva



Figura C.10. Monitoreo de la solución nutritiva en el reservorio del sistema NFT.

Nota. La fotografía muestra el monitoreo directo de la solución nutritiva contenida en el reservorio. Esta actividad formó parte del control operativo aplicado para conservar condiciones adecuadas durante el crecimiento de la espinaca.

C.11. Sistema NFT durante el desarrollo del cultivo



Figura C.11. Vista general del sistema NFT durante el crecimiento de la espinaca.

Nota. La fotografía presenta el sistema hidropónico en funcionamiento con plantas establecidas en los canales NFT. Se observa la distribución de los módulos, el reservorio, las bombas y las conexiones hidráulicas utilizadas durante la fase vegetativa.

C.12. Crecimiento de espinaca en canales NFT



Figura C.12. Plantas de espinaca en crecimiento dentro de los canales NFT.

Nota. La fotografía evidencia el desarrollo vegetativo de las plantas de espinaca bajo el sistema NFT. El crecimiento foliar observado corresponde a la etapa productiva previa a la cosecha.

C.13. Cosecha de espinaca hidropónica



Figura C.13. Cosecha de espinaca producida en el sistema hidropónico NFT.

Nota. La fotografía registra la cosecha de las plantas de espinaca al finalizar el ciclo experimental. El material vegetal cosechado fue organizado para su evaluación y registro de las variables productivas correspondientes.

C.14. Disposición de plantas cosechadas



Figura C.14. Disposición de plantas cosechadas para la evaluación final del rendimiento.

Nota. La fotografía muestra las plantas cosechadas distribuidas sobre una superficie limpia para su observación, ordenamiento y evaluación. Esta evidencia respalda la etapa final de medición del rendimiento del cultivo.

C.15. Evaluación morfológica y organización de muestras



(a) Medición morfológica de muestra foliar cosechada.



(b) Identificación y organización de muestras por tratamiento.

Figura C.15. Evaluación morfológica y ordenamiento del material vegetal cosechado.

Nota. La Figura C.15 evidencia la medición del material vegetal cosechado y la organización de muestras correspondientes a los tratamientos evaluados. Este procedimiento permitió mantener la trazabilidad durante la fase final de evaluación, diferenciando las muestras destinadas al registro de crecimiento, biomasa fresca y biomasa seca. La identificación por tratamiento fue necesaria para relacionar los resultados productivos con las combinaciones de sustrato y concentración nutritiva evaluadas en el sistema NFT.

C.16. Secado en estufa y procesamiento final de muestras



(a) Ingreso de muestras vegetales a la estufa de secado.



(b) Procesamiento final de muestras cosechadas en laboratorio.

Figura C.16. Secado en estufa y procesamiento final del material vegetal cosechado.

Nota. La Figura C.16 documenta la etapa de secado y procesamiento final del material vegetal cosechado. El secado en estufa permitió determinar la biomasa seca sin raíz y calcular la materia seca, variables necesarias para comparar la acumulación real de biomasa entre tratamientos.

C.17. Pesado inicial de muestras para biomasa seca



(a) T1: pesado inicial.



(b) T2: pesado inicial.



(c) T3: pesado inicial.



(d) T4: pesado inicial.



(e) T5: pesado inicial.



(f) T6: pesado inicial.

Figura C.17. Pesado inicial de muestras foliares por tratamiento antes del secado en estufa.

Nota. La Figura C.17 muestra el registro del peso inicial de las muestras foliares correspondientes a los tratamientos T1, T2, T3, T4, T5 y T6 antes del proceso de secado. Esta etapa permitió cuantificar la biomasa fresca de las muestras destinadas a la determinación de biomasa seca y materia seca.

C.18. Pesado final después de 24 horas de secado



(a) T1: peso seco.



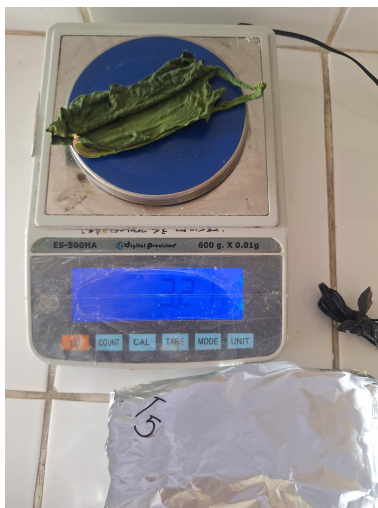
(b) T2: peso seco.



(c) T3: peso seco.



(d) T4: peso seco.



(e) T5: peso seco.



(f) T6: peso seco.

Figura C.18. Pesado final de muestras foliares por tratamiento después de 24 horas de secado en estufa a 55 °C.

Nota. La Figura C.18 documenta el pesado final de las muestras foliares después de 24 horas de secado en estufa a 55 °C. Este procedimiento permitió obtener el peso seco de cada tratamiento y calcular la materia seca, variable utilizada para interpretar la acumulación real de biomasa vegetal. La comparación entre el pesado inicial y el pesado final respalda la evaluación del rendimiento del cultivo.