

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA**



**“BIOFORTIFICACIÓN DEL CULTIVO HIDROPÓNICO DE
LA LECHUGA (*Lactuca sativa* L.) CON HIERRO”**

Presentada por:

RONALD ALEXIS CORTEZ LÁZARO

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO
MAGISTER SCIENTIAE EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA**

Lima - Perú

2023

Document Information

Analyzed document	Tesis sustentada Ronald Cortez.docx (D156060432)
Submitted	2023-01-16 18:14:00
Submitted by	JUAN MENDOZA CORTEZ
Submitter email	jmendoza@lamolina.edu.pe
Similarity	0%
Analysis address	jmendoza.unalm@analysis.arkund.com

Sources included in the report

Entire Document

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA
"BIOFORTIFICACIÓN DEL CULTIVO HIDROPÓNICO DE LA LECHUGA (*Lactuca sativa* L.) CON HIERRO"
Presentado por: RONALD ALEXIS CORTEZ LÁZARO
TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGISTER SCIENTIAE EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

Lima - Perú 2022

DEDICATORIA

A Dios por la vida, por la salud y la fuerza para enfrentar cada día con optimismo y fe.

A mi familia que con su amor y cariño en todo momento inspiro mi lucha por ser mejor persona.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Juan Waldir Mendoza Cortez, patrocinador de la tesis, por su valiosa contribución y orientación científica en el desarrollo de la presente investigación.

Al comité consejero, Dr. Erick Espinoza Núñez y la Mg. Sc. María de Lourdes Tapia y Figueroa, por contribuir en la mejora del presente trabajo de investigación. Al Dr. Oscar Oswaldo Loli Figueroa y

a todos mis profesores, que contribuyeron en esta nueva etapa de mi formación académica. A la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Agraria La Molina, por permitirme formar parte de su gran familia. A la Universidad Nacional de Cañete, por brindarme las facilidades de uso del laboratorio y sus equipos para el desarrollo de la tesis. Al centro de producción EcoVerduras, por brindarme las facilidades del uso de sus instalaciones durante el desarrollo de la tesis.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN 1 II. REVISIÓN DE LITERATURA 3 2.1 Generalidades sobre el cultivo de lechuga 3 2.2 El hierro en la planta 4 2.3 Biofortificación 6 2.4 Biodisponibilidad de hierro en humanos 9 2.5 Modelamiento del crecimiento en plantas 11 III. MATERIALES Y MÉTODOS 12 3.1 Localidad 12 3.2 Clima 13 3.3 Material vegetal 13 3.4 Diseño experimental y tratamientos 14 3.5 Variables evaluadas 14 3.5.1 Masa de la materia fresca y seca (g planta⁻¹) 14 3.5.2 Área foliar (cm² planta⁻¹) 14 3.5.3 Determinación de N-NO₃⁻, K⁺ y Ca⁺⁺ en el extracto celular (ppm) 15 3.5.4 Concentraciones foliares de Fe (ppm), N, P y K (%) 15 3.6 Conducción del Experimento 16 3.7 Análisis de datos 19 IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 20 4.1 Masa de la materia fresca y seca 20 4.2 Área foliar \bar{y} Marcador no definido. 4.3 Contenidos de NO₃⁻, K⁺ y Ca⁺⁺ en el extracto celular del pecíolo 26 4.4 Concentraciones foliares de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y hierro (Fe) 29 4.5 Análisis de crecimiento en la época de invierno 34 4.5.1 Materia fresca de hojas (MFH) y raíces (MFR) 34 4.5.2 Materia seca de hojas (MSH) y raíces (MSR) 37 4.5.3 Área foliar (AF) 39 4.6 Análisis de crecimiento en la época de verano 40 4.6.1 Materia fresca de hojas (MFH) y raíces (MFR) 40 4.6.2. Materia seca de hojas (MSH) y raíces (MSR) 44 4.6.3. Área foliar (AF) 47

V. CONCLUSIONES 49 VI. RECOMENDACIONES 50 VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 51 VIII. ANEXOS 62

ÍNDICE DE TABLAS Tabla 1:

Referencia de ingesta diaria de hierro en el cuerpo humano. 4

Tabla 2: Contenido nutricional promedio de hojas de lechuga producidos en un sistema hidropónico. 6 Tabla 3: Temperaturas y humedades relativas durante el desarrollo de los experimentos. 13 Tabla 4: Composición de la solución nutritiva utilizada en los experimentos realizados en las épocas de invierno y verano. 16 Tabla 5: Resumen del análisis de varianza conjunto de los experimentos y promedios para materia

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA**

**“BIOFORTIFICACIÓN DEL CULTIVO HIDROPÓNICO DE LA
LECHUGA (*Lactuca sativa* L.) CON HIERRO”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO
MAGISTER SCIENTIAE**

Presentada por:

RONALD ALEXIS CORTEZ LÁZARO

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. Oscar Loli Figueroa
PRESIDENTE

Dr. Juan Mendoza Cortez
ASESOR

Dr. Erick Espinoza Núñez
MIEMBRO

M.Sc. María de Lourdes Tapia y Figueroa
MIEMBRO

DEDICATORIA

A Dios por la vida, por la salud y la fuerza para enfrentar cada día con optimismo y fe.

A mi familia que con su amor y cariño en todo momento inspiro mi lucha por ser mejor
persona.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Juan Waldir Mendoza Cortez, patrocinador de la tesis, por su valiosa contribución y orientación científica en el desarrollo de la presente investigación.

Al comité consejero, Dr. Erick Espinoza Núñez y la Mg. Sc. María de Lourdes Tapia y Figueroa, por contribuir en la mejora del presente trabajo de investigación.

Al Dr. Oscar Oswaldo Loli Figueroa y a todos mis profesores, que contribuyeron en esta nueva etapa de mi formación académica.

A la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Agraria La Molina, por permitirme formar parte de su gran familia.

A la Universidad Nacional de Cañete, por brindarme las facilidades de uso del laboratorio y sus equipos para el desarrollo de la tesis.

Al centro de producción EcoVerduras, por brindarme las facilidades del uso de sus instalaciones durante el desarrollo de la tesis.

ÍNDICE GENERAL

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 Generalidades sobre el cultivo de lechuga	3
2.2 El hierro en la planta.....	4
2.3 Biofortificación.....	6
2.4 Biodisponibilidad de hierro en humanos	9
2.5 Modelamiento del crecimiento en plantas	11
III. MATERIALES Y MÉTODOS	12
3.1 Localidad	12
3.2 Clima	13
3.3 Material vegetal	13
3.4 Diseño experimental y tratamientos	14
3.5 Variables evaluadas	14
3.5.1 Masa de la materia fresca y seca (g planta ⁻¹).....	14
3.5.2 Área foliar (cm ² planta ⁻¹)	14
3.5.3 Determinación de N-NO ₃ ⁻ , K ⁺ y Ca ⁺⁺ en el extracto celular (ppm).....	15
3.5.4 Concentraciones foliares de Fe (ppm), N, P y K (%)	15
3.6 Conducción del Experimento	16
3.7 Análisis de datos.....	19
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
4.1 Masa de la materia fresca y seca	20
4.2 Área foliar.....	23

4.3	Contenidos de NO_3^- , K^+ y CA^{++} en el extracto celular del pecíolo.....	26
4.4	concentraciones foliarES de nitrógeno (n), fósforo (p), potasio (k) y hierro (fe).....	29
4.5	Análisis de crecimiento en la época de invierno	34
4.5.1	Materia fresca de hojas (MFH) y raíces (MFR).....	34
4.5.2	Materia seca de hojas (MSH) y raíces (MSR)	37
4.5.3	Área foliar (AF)	39
4.6	Análisis de crecimiento en la época de verano.....	40
4.6.1	Materia fresca de hojas (MFH) y raíces (MFR).....	40
4.6.2	Materia seca de hojas (MSH) y raíces (MSR)	43
4.6.3	Área foliar (AF)	46
V.	CONCLUSIONES	48
VI.	RECOMENDACIONES	49
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
VIII.	ANEXOS.....	60

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1: Referencia de ingesta diaria de hierro en el cuerpo humano.....	4
Cuadro 2: Contenido nutricional promedio de hojas de lechuga producido en hidroponia.....	6
Cuadro 3: Temperatura y humedad relativa durante el desarrollo de los experimentos	13
Cuadro 4: Composición de la solución nutritiva utilizada en el experimento	16
Cuadro 5: Análisis de varianza conjunto de los experimentos y promedios de materia fresca de hojas y raíces de plantas de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’	21
Cuadro 6: Análisis de varianza conjunto de los experimentos y promedios de materia fresca de hojas y raíces de plantas de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’	24
Cuadro 7: Análisis de varianza conjunto de los experimentos y promedios del área foliar de plantas de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’	26
Cuadro 8: Análisis de varianza conjunto de los experimentos y promedios para el contenido de NO^3^- , K^+ y Ca^{++} en el extracto celular del pecíolo de hojas de plantas de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, a los 35 días después del trasplante (DDT)	28
Cuadro 9: Análisis de varianza conjunto de los experimentos para las concentraciones foliares de N, P, K y Fe en plantas de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, a los 35 días después del trasplante	29
Cuadro 10: Promedios y significancia estadística de las concentraciones de N, P, K y Fe, determinadas en el limbo foliar de hojas de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’ a los 35 días después del trasplante.....	33

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ubicación de la empresa EcoVerduras - Zona del experimento.....	12
Figura 2: A: Lavado y desinfección de los canales de cultivo. B: Plantines de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, en hidroponía	17
Figura 3: A: Plantines de lechuga, con características deseables para el trasplante. B: Trasplante de plantines.....	18
Figura 4: Asperjado de hierro sobre plantas de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’. A: A los 10 DDT. B: A los 20 DDT	18
Figura 5: Acumulación de la materia fresca de hojas (MFH) y raíces (MFR) de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, de acuerdo a los tratamientos evaluados durante la época de invierno....	36

ÍNDICE DE ANEXO

	Página
Anexo 1: Tabla peruana de composición en 100 g de alimentos de tres tipos de lechugas.....	60
Anexo 2: Distribución aleatorizada de los tratamientos según el diseño experimental propuesto (R: repeticiones; T: tratamientos).....	61
Anexo 3: Análisis de elementos en el agua utilizada para la preparación de la solución nutritiva para el presente estudio.	62
Anexo 4: Determinación de la masa de la materia fresca de hojas y raíces en el laboratorio de la Universidad Nacional de Cañete (A). Muestras secadas en estufa para la determinación de la masa de la materia seca de hojas y raíces (B)	63
Anexo 5: Masa seca de hojas y raíces de muestras de lechugas (A). Determinación del área foliar mediante el Software IMAGEN J (B).	63
Anexo 6: Resultados de la evaluación del extracto celular del peciolo en hojas de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, en la época de invierno.....	64
Anexo 7: Resultados de la evaluación del extracto celular del peciolo en hojas de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, en la época de verano.	65
Anexo 8: Resultados de las concentraciones foliares de N, P, K y Fe en la lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, en la época de invierno.	66
Anexo 9: Resultados de las concentraciones foliares de N, P, K y Fe en la lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, en la época de verano.....	67

RESUMEN

El hierro (Fe) es un elemento esencial ya que juega un rol importante en diversos procesos fisiológicos de todos los organismos vivos. En los humanos, la deficiencia de este nutriente puede provocar anemia, una patología que afecta a millones de personas. La biofortificación agronómica de hortalizas es una estrategia para aumentar la concentración de hierro en los alimentos y, consecuentemente, la ingesta de micronutrientes por parte de la población. En ese sentido, fueron realizados dos experimentos, en las épocas de invierno y verano, con el objetivo de evaluar el efecto de la aspersión foliar de diferentes concentraciones de Fe (2, 4 y 6 mg l⁻¹) y momento de aplicación (100 por ciento a los 10 días después del trasplante-DDT; 100 por ciento a los 20 DDT; 50 por ciento a los 10 y 20 DDT), sobre la masa de la materia fresca y seca; área foliar; concentraciones de NO₃⁻, K⁺ y Ca⁺⁺ en el extracto celular del peciolo; concentraciones foliares de N, P, K y niveles de biofortificación con Fe en hojas de plantas de lechuga, híbrido Waldmans Green, cultivado en hidroponía. También fue realizado el análisis de crecimiento. Fue utilizado el diseño completamente aleatorizado, con arreglo factorial 3x3+1, con cinco repeticiones por tratamiento. El aumento de la concentración de Fe no afectó la masa de la materia fresca y seca de hojas y el área foliar. Por otro lado, la dosis más alta de Fe (6 mg l⁻¹) tuvo efectos negativos sobre las concentraciones de NO₃⁻, K⁺ y Ca⁺⁺, en la época de verano. Se verificó biofortificación eficiente en hojas de lechugas a partir de 4 mg l⁻¹ Fe, siendo mayor en condiciones de verano.

Palabras clave: *Lactuca sativa*, hidroponía, micronutrientes, nutrición mineral.

ABSTRACT

Iron (Fe) is an essential element since it plays an important role in various physiological processes of all living organisms. In humans, the deficiency of this nutrient can cause anemia, a pathology that affects millions of people. The agronomic biofortification of vegetables is a strategy to increase the concentration of iron in food and, consequently, the intake of micronutrients by the population. In this sense, two experiments were carried out, in the winter and summer seasons, with the aim of evaluating the effect of foliar spraying of different concentrations of Fe (2, 4 and 6 mg l⁻¹) and application time (100 per cent at 10 days after transplant-DAT; 100 per cent at 20 DAT; 50 per cent at 10 and 20 DAT), on the mass of fresh and dry matter; leaf area; concentrations of NO₃⁻, K⁺ and Ca⁺⁺ in the cell extract of the petiole; foliar concentrations of N, P, K and biofortification levels with Fe in leaves of lettuce plants, hybrid Waldmans Green, grown in hydroponics. Growth analysis was also performed. A completely randomized design was used, with a 3x3+1 factorial arrangement, with five repetitions per treatment. The increase in Fe concentration did not affect the mass of fresh and dry leaf matter and leaf area. On the other hand, the highest dose of Fe (6 mg l⁻¹) had negative effects on the concentrations of NO₃⁻, K⁺ and Ca⁺⁺, in the summer season. Efficient biofortification was verified in lettuce leaves from 4 mg l⁻¹ Fe, being higher in summer conditions.

Keywords: *Lactuca sativa*, hydroponics, micronutrients, mineral nutrition.

I. INTRODUCCIÓN

Dentro de los micronutrientes esenciales, tanto para las plantas como para los humanos, el hierro (Fe) tiene marcada importancia debido a que participa en diversos procesos como la respiración, la fotosíntesis y el transporte de oxígeno (Römheld y Nikolic 2021, Giordano *et al.* 2019).

La deficiencia de micronutrientes es un fenómeno generalizado, siendo más preponderante en los países en desarrollo. Dos mil millones de personas padecen anemia en todo el mundo y, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la principal causa de este problema es la deficiencia de Fe en la dieta humana (Ramos-Padilla *et al.* 2020). En el Perú, este problema todavía está presente en las zonas rurales donde el acceso a la disponibilidad de alimentos de calidad es un problema (Alva *et al.* 2020).

Dentro de las diversas tecnologías utilizadas para solucionar este problema, la biofortificación agronómica con diversos nutrientes, entre ellos el hierro, tiene destaque ya que puede ayudar a incrementar el contenido nutricional de las partes comestibles de las plantas y, de esta manera, reducir los problemas causados por su deficiencia en las personas.

Diversos trabajos a nivel global fueron realizados sobre la biofortificación con Fe en diferentes cultivos de consumo masivo como maíz, papa, arroz, yuca, frijol y trigo (Monserrate *et al.* 2009), verificándose incrementos en su contenido. Por otro lado, cultivos como la lechuga, también pueden ser utilizados para ese propósito, debido a su corto ciclo y fácil manejo, además de ser una de las hortalizas de hoja más cultivadas y consumidas en el mundo (Saavedra *et al.* 2017). Según Ccahua *et al.* (2020), en el Perú el consumo per cápita de lechuga alcanza valores de 1.8 kg por persona.

Actualmente, existe una elevada demanda por productos que tengan alto contenido mineral y bioactivo enriquecido, impulsada por el creciente interés de la sociedad en

productos frescos de calidad nutricional y funcional superior. En ese sentido, el bioenriquecimiento de las hortalizas de hoja con micronutrientes esenciales como el hierro, es un medio eficaz para solucionar la deficiencia de este en la población carente.

En ese contexto, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones y momentos de aplicación de hierro, vía foliar, sobre la producción, nutrición y biofortificación de plantas de lechuga cultivadas en el sistema hidropónico NFT (Nutrient Film Technique).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 GENERALIDADES SOBRE EL CULTIVO DE LECHUGA

Pertenece a la familia de las compuestas y es una de las hortalizas de hoja de mayor importancia económica en el mundo. De acuerdo con la FAO (2021), la producción mundial de lechuga fue de 27 millones de toneladas, de los cuales 15 millones corresponden a Asia y 3 millones a Estados Unidos. En el Perú, el consumo per cápita anual es de 1.8 kg, cifras cercanas a México, con 2.5 kg (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI] 2012, Soto *et al.* 2010).

Es una planta anual glabra con una raíz primaria delgada y un tallo erecto de 30 a 100 cm de altura, ramificado en la parte superior. Las hojas están dispuestas en espiral, formando una roseta densa. Su forma es oblonga a elíptica transversa, orbicular a triangular, indivisa a pinnatisecta. El margen de la hoja es entero a setoso dentado, a menudo rizado. Las hojas del tallo son elípticas oblongas con una base cordada. La inflorescencia (capitulum, cabeza) se compone de 7–15 (35) lígulas amarillas (flósculos). Las cabezas forman una panícula corimbosa, densamente bracteada. La antocianina se encuentra en los cotiledones y hojas verdaderas, tallos y lígulas. El involucre mide de 10 a 15 mm de largo, cilíndricas brácteas involucrales son lanceoladas anchas a estrechas, de color verde claro, con márgenes blancos, erectas en la etapa de madurez del fruto. El fruto es un aquenio tiene de 5 a 7 costillas setosas a cada lado, un pico y un vilano blanco. Su longitud (incluido el pico) es de 6 a 8 mm y su color es blanco, crema, gris, marrón o negro. La raíz es de tipo pivotante y denso, y mide aproximadamente 30 cm de longitud (Křístková *et al.* 2008, Thompson *et al.* 1998).

Estudios recientes han demostrado los efectos saludables del consumo de lechuga en la prevención de enfermedades cardiovasculares, además de tener propiedades antioxidantes como resultado del alto nivel de carotenoides y fenoles compuestos y ser fuente de ácido fólico, diversas vitaminas (A, C, K) y de fibra dietética que tiene un efecto

positivo en el buen funcionamiento del aparato digestivo (Shatilov *et al.* 2019, Sularz *et al.* 2020). Sin embargo, las variedades más consumidas a nivel mundial resultan tener un bajo valor nutricional respecto a variedades tradicionales y parientes silvestres. En ese sentido, la tendencia demuestra que hay un creciente interés entre los consumidores por el impacto de los alimentos en la salud, y los cuales están dispuestos a pagar un precio más alto por productos más saludables y con mayor valor nutricional o con beneficios potenciales en la prevención de enfermedades (Prasad y Shivay 2020, Medina-Lozano *et al.* 2021).

Un problema nutricional asociado a la falta de hierro en los humanos es la anemia, el cual según diversas investigaciones realizadas está más acentuado en los países en vías de desarrollo. Como parámetro de referencia, en el Cuadro 1 se presenta la ingesta diaria de hierro que deben consumir las personas de acuerdo a su edad y condición en la que se encuentran.

Cuadro 1: Referencia de ingesta diaria de hierro en el cuerpo humano

Infantes		Embarazada	
0 – 6 meses	0.27 mg/día	14 – 18 años	23 mg/día
7- 12 meses	11 mg/día	19 – 50 años	22 mg/día
Niños		Lactación	
1 – 3 años	7 mg/día	14 – 18 años	10 mg/día
4 – 8 años	10 mg/día	19 – 50 años	9 mg/día
Masculino		Femenino	
9 – 13 años	8 mg/día	9 – 13 años	8 mg/día
14 – 18 años	11 mg/día	14 – 18 años	15 mg/día
19 – 70 años	8 mg/día	19 – 50 años	18 mg/día
		50 – 70 años	8 mg/día

FUENTE: (Institute of Medicine 2002)

2.2 EL HIERRO EN LA PLANTA

En las plantas, el Fe es esencial para la fotosíntesis, por lo que es uno de los elementos clave para la fijación de CO₂ y, por lo tanto, para la producción de biomasa. Este proceso conduce a la producción de O₂, que puede reaccionar con el hierro para producir especies reactivas de oxígeno, lo que en última instancia puede ser perjudicial para la integridad celular. Por lo tanto, la homeostasis del hierro debe controlarse estrictamente para evitar

su deficiencia y toxicidad, y que se sabe deterioran drásticamente la fisiología de las plantas, con efectos sobre su desarrollo y crecimiento (Briat *et al.* 2010).

El hierro también cumple un papel activo en la regulación de otros procesos en las plantas como la respiración mitocondrial, biosíntesis de nucleótidos, asimilación de nitrógeno, regulación hormonal, transporte de nutrientes, además de facilitar las reacciones químicas como la hidratación y deshidratación (Mahender *et al.* 2019).

Según Broadley *et al.* (2006), las principales funciones del Fe están relacionadas con los cambios en los estados de las reacciones de óxido-reducción y en la transferencia de electrones, debido a que es un componente de varios sistemas enzimáticos, tales como citocromos, catalasas, citocromo oxidasas, peroxidasas y pigmentos que contienen el grupo 'hemo'. Asimismo, el Fe es parte de la ferredoxina, una proteína importante en la reducción de nitrato y sulfato, asimilación de N₂ y en la producción de energía a través del NADP (Nicotinamide adenine dinucleotide phosphate), además participa indirectamente en la biosíntesis de la clorofila, crecimiento de las raíces y en el control de la síntesis de alanina.

Debido a su baja movilidad, los primeros síntomas de deficiencia de Fe aparecen en las hojas nuevas, llegando a ser cloróticas (excepto las nervaduras que permanecen de color verde), intensificándose conforme aumenta la deficiencia (Samborska-Skutnik *et al.* 2020, Römheld y Nikolic 2021). De acuerdo con Ortega-Maldonado *et al.* (2014), la deficiencia de Fe altera la morfología y fisiología de las hojas, disminuyendo el número de células por unidad de superficie y desorganizando la estructura del cloroplasto, sin afectar el crecimiento de las hojas. Por otro parte, cuando la planta está sometida a un estrés severo por la falta de este micronutriente, disminuye drásticamente la actividad fotosintética, se detiene la división en los meristemos y se inhibe la producción de primordios foliares en los ápices del brote y con ello el crecimiento foliar (Soto *et al.* 2010, Mahender *et al.* 2019).

En los cultivos, el síntoma de la clorosis férrica se presenta principalmente en suelos alcalinos y calcáreos, pues existe un antagonismo entre los carbonatos y el Fe en los suelos. Los bajos niveles de materia orgánica también influyen en el incremento de tal insuficiencia. La fase final de una clorosis férrica, con carencia extrema de Fe, genera

necrosis y muerte de las hojas. Sin embargo, antes de ocurrir esto se observan grandes disfunciones en el aparato fotosintético (Diaz *et al.* 2018, Benavides 2000).

Por otro lado, existe evidencia científica de que aplicaciones excesivas de este nutriente pueden causar efectos fitotóxicos en las plantas, los cuales pueden manifestarse con síntomas de bronceamiento, seguido por la formación de manchas de color marrón de las hojas (Khan *et al.* 2021).

En el Cuadro 2 se puede observar valores promedio del contenido nutricional de hojas de lechuga obtenidas en una producción hidropónica.

Cuadro 2: Contenido nutricional promedio de hojas de lechuga producido en hidroponía

Macronutrientes	Contenido (%)	Micronutrientes	Contenido (ppm)
Nitrógeno	4.20-5.60	Hierro	168-223
Fósforo	0.62-0.77	Manganeso	55-110
Potasio	7.82-13.68	Boro	32-43
Calcio	0.80-1.20	Cobre	6-16
Magnesio	0.24-0.73	Zinc	33-196
Azufre	0.26-0.32	Molibdeno	0.29-0.58

FUENTE: (Mattson 2016)

2.3 BIOFORTIFICACIÓN

Conforme White y Broadley (2009), la dieta de más de dos tercios de la población mundial carece de uno o más elementos minerales esenciales. Este problema, según los autores, puede ser corregido mediante la diversificación de la dieta, la suplementación mineral, el enriquecimiento de los alimentos o el aumento de las concentraciones y/o la biodisponibilidad de los elementos minerales en los productos alimenticios a través de la biofortificación. Los elementos minerales que más comúnmente faltan en la dieta humana son el hierro (Fe), zinc (Zn), cobre (Cu), calcio (Ca), magnesio (Mg), yodo (I) y selenio (Se).

Los cultivos biofortificados tienen mejores características agronómicas y nutricionales en comparación con cultivos no-biofortificados (convencionales), siendo que la biofortificación de cultivos básicos es una estrategia reciente que se suma a otras como la

fortificación industrial de alimentos (Pachón 2010). Conforme el autor, los cultivos biofortificados pueden mejorar la seguridad alimentaria y nutricional de individuos, familias y comunidades de dos maneras; primero, por medio del mejoramiento de las cualidades agronómicas, como el incremento del rendimiento, a través del cual las familias aumentan su producción de alimentos y como consecuencia, su energía (kilocalorías) disponible para consumo; segundo, debido a su mayor contenido de nutrientes, como el hierro y el zinc, las personas pueden consumir más de estos nutrientes esenciales. De esta manera, los cultivos biofortificados tienen varias ventajas y se convierten en una estrategia para abordar la inseguridad alimentaria y nutricional.

Existen dos enfoques para incrementar la concentración de elementos minerales biodisponibles en los cultivos, siendo a través del mejoramiento genético (White y Broadley 2009, Prasad *et al.* 2018) y por medio del manejo agronómico (Prasad y Shivay 2020), en el cual se optimiza la aplicación de fertilizantes minerales y/o se mejora la solubilización y movilización de elementos minerales en el suelo.

La biofortificación agronómica de los cultivos alimentarios, es un método eficiente e importante para aumentar la nutrición humana de las personas en el mundo en desarrollo, además es la forma más rápida y asequible de aumentar el contenido de minerales y algunas moléculas en los cultivos alimentarios (Prasad y Shivay 2020, Lal *et al.* 2020). En ese sentido, en situaciones donde los elementos minerales no se translocan fácilmente a los tejidos comestibles, se pueden realizar aplicaciones foliares de fertilizantes inorgánicos solubles, facilitando la incorporación de elementos minerales esenciales para la nutrición humana antes de su distribución (White y Broadley 2009).

El suministro de Fe a los cultivos se hace en la forma de quelatos, los cuales son compuestos de alta estabilidad capaces de mantener cubierto los iones metálicos como el Fe, de manera que lo protege de cualquier acción desde el exterior evitando su hidrólisis y precipitación, resultando un compuesto con propiedades químicas diferentes a las del metal original. La eficacia del quelato va a depender de su reactividad en el medio en que se apliquen y de la capacidad de la planta en tomar el elemento aportado. Referente al tipo de agente quelatante más usado para el hierro, destaca el EDDHA. Este compuesto puede presentar dos isómeros posicionales, el orto-orto (o,o-EDDHA- ácido etilendiamino-N,N'-di[(ortohidroxifenil) acético]), que a su vez presenta isomería óptica:

isómeros meso y mezcla dl-racémica) de alta estabilidad y eficacia a largo plazo (Lucena 2009, Perea *et al.* 2010).

Dentro de los pocos trabajos encontrados en la literatura con respecto a la biofortificación agronómica de Fe en el cultivo de lechuga para aumentar su concentración, el cual es relativamente bajo (Anexo 1), se relata el realizado por Al-Khazraje y Al-Hamadani (2019), quienes al evaluar el efecto de la aplicación de diferentes dosis de nitrógeno (50,100,150 y 200 kg de N ha⁻¹) junto con la aplicación foliar de hierro y zinc (0 y 240 mg l⁻¹ de Fe, 120 mg l⁻¹ de Zn y 240 +120 mg l⁻¹ de Fe + Zn), verificaron efectos significativos de la aplicación de los micronutrientes, en conjunto, sobre el crecimiento (altura, área foliar, peso seco, diámetro y circunferencia de cabeza y número de hojas comerciales) y sobre el rendimiento y sus componentes.

En trabajo realizado por Giordano *et al.* (2019), evaluando diferentes dosis de Fe (control, 0.015, 0.5, 1.0 y 2.0 mM), aplicados vía solución nutritiva en el sistema NFT, en dos cultivares de lechuga (verde y roja), constataron incrementos de 20.5 por ciento (con 1.0 mM) y 53.7 por ciento (con 2.0 mM) en la concentración de este nutriente en relación al tratamiento control, independiente del cultivar utilizado. Los autores resaltaron que el manejo de la solución nutritiva en el cultivo sin suelo puede servir como práctica cultural efectiva para producir lechugas enriquecidas con Fe de primera calidad, teniendo en cuenta la selección de cultivares como un factor fundamental para obtener productos de calidad.

De acuerdo con Chatterjee *et al.* (2016), ante una situación de deficiencia de Fe en las plantas, se recomienda realizar aplicaciones foliares. Los fertilizantes solubles ricos en este micronutriente, como el sulfato ferroso heptahidratado (FeSO₄ 7H₂O–0.5 g l⁻¹ de agua) o Fe-EDTA (hierro quelado 1 g l⁻¹ de agua), pueden ser aplicados sobre el follaje para su translocación a tejidos comestibles y así, incrementar el contenido de Fe en las hojas. Así mismo, Benavides (2000) recomienda realizar aplicaciones foliares de quelato de hierro (EDTA, DTPA, HEDTA o EDDHA) ante problemas de deficiencia de hierro, resaltando que la solución nutritiva a ser utilizada en la aplicación foliar debe contener entre 0.6 y 1 mg l⁻¹ de Fe.

Aplicaciones foliares realizadas en lechuga con hierro y zinc (control, 150 mg l⁻¹ Fe, 100 mg l⁻¹ Zn y 150 mg l⁻¹ de Fe + 100 mg l⁻¹ de Zn), en dos épocas, por Kenawey (2019), tuvieron efectos positivos sobre la mayoría de las variables relacionadas al crecimiento y rendimiento en comparación a las plantas no tratadas en ambas épocas de evaluación, destacando la aplicación conjunta de Fe y Zn.

La biofortificación con Fe en plantas de lechuga “Parris Island Cos”, mediante aplicaciones foliares en las dosis de 0, 10, 20, 30 y 35 mM l⁻¹ en hidroponía NFT, modifico de manera positiva la biosíntesis de compuestos fitoquímicos y su concentración en hojas de lechuga sin afectar el rendimiento (Preciado-Rangel *et al.* 2022).

2.4 BIODISPONIBILIDAD DE HIERRO EN HUMANOS

El Fe es un mineral muy abundante y un componente esencial para los organismos vivos y, frecuentemente, resulta un factor limitante en el medio debido a que al entrar en contacto con el oxígeno forma óxidos insolubles que limitan su disponibilidad para ser utilizado por los organismos. Es por ello que evolutivamente se han desarrollado diferentes mecanismos celulares para captarlo en su forma biológicamente activa (Forrellat 2016).

De acuerdo con Benavides (2000), en la dieta humana el Fe se encuentra como hierro hemínico (Fe-Hem) en las carnes, o como hierro no hemínico (Fe-No Hem) en los alimentos de origen vegetal, las sales minerales y algunos alimentos de origen animal como la leche y los huevos. El Fe-No Hem es la mayor fuente del mineral en la dieta de las poblaciones de los países en vías de desarrollo. En ese sentido, los diferentes mecanismos de absorción del hierro no hemático en el tracto digestivo se da por solubilización y reducción en el medio gástrico, también por absorción en el duodeno proximal y por mecanismos de reducción del hierro férrico a ferroso en el borde cepillo del enterocito y co-transporte de hierro ferroso y H⁺ a través del transportador de metales divalentes (DMT1) (Gaitán *et al.* 2006). Según las necesidades corporales del nutriente, éste se almacena en la proteína citoplasmática ferritina y se utiliza en los procesos metabólicos celulares o se transporta hacia la sangre (Miret *et al.* 2003).

Según Alcaráz *et al.* (2006), la deficiencia de hierro ocurre porque la mayor parte del mineral se encuentra en forma férrica (no hemático), el cual es difícil de absorber y poco bio-disponible, comportamiento inverso al hierro hemático de origen animal, que presenta una bio-disponibilidad de 2 a 3 veces mayor que la del hierro no hemático. Sin embargo, la escasez de proteína animal en la dieta actual, hace que la deficiencia de hierro sea responsable del 15 por ciento de los casos de anemia en la población mundial.

Por otro lado, existen compuestos que contribuyen a la disminución de la biodisponibilidad de este micronutriente, tal es el caso del fitato y el oxalato. Las legumbres y cereales a pesar de tener un contenido alto de Fe-No Hem, no son buenas fuentes del metal debido a que también son ricos en fitato, un conocido inhibidor de la absorción del Fe-No Hem, atribuyéndose a este como el responsable de la génesis de las anemias ferropénicas. De forma similar actúan los oxalatos que incluyen el ácido oxálico y las sales de sodio y potasio, que se encuentran en mayor cantidad en cultivos como la espinaca, ruibarbo, hojas de betabel, té y cacao, y en menor cantidad en lechuga, apio, calabaza, coliflor, zanahoria, papa, chicharos, frijoles y nabos (Binaghi *et al.* 2011, Mendoza Rodríguez 2017).

De acuerdo a estudios realizados *in vivo* e *in vitro*, algunos minerales están siendo clasificados como antagonistas de la absorción del hierro, los cuales han dado como resultado la disminución de su absorción, debido a la interacción con otros minerales como cobre y zinc, y a la inhibición competitiva con el manganeso (Arredondo *et al.* 2006).

En la literatura se ha verificado que algunos compuestos como la vitamina A pueden incrementar la bio-disponibilidad del hierro no hemático al formar complejos solubles con iones férricos, así mismo, se afirma que la concentración de esta vitamina es uno de los responsables de modular el metabolismo del hierro y por ende su homeostasis. Así también, la presencia de vitamina C o ácido ascórbico en la dieta alimenticia, aumenta la bio-disponibilidad del hierro no hemático, contribuyendo a su capacidad de reducir el ion férrico a su forma ferrosa (soluble), a su acción para formar quelatos solubles y absorbibles a pH alcalino (duodeno) y a su capacidad antioxidante (Gaitán *et al.* 2006, Trinidad *et al.* 2014).

2.5 MODELAMIENTO DEL CRECIMIENTO EN PLANTAS

Desde hace algunos años, con el avance de la tecnología informática se han creado diversas fórmulas matemáticas que son utilizados para describir y explicar diversos procesos, mecanismos e interacciones que ocurren dentro de un sistema biológico. Los modelos “Gompertz”, “Logístico” y de “Verhulst” son ecuaciones curvilíneas comúnmente utilizadas para describir procesos de crecimiento y se aplican ampliamente para establecer modelos matemáticos de características fenotípicas de plantas, como el crecimiento de los rasgos morfológicos. Por otro lado, la regresión no lineal rara vez se utiliza para el análisis estadístico en ensayos de cultivos de hortalizas, y cuando se usa, rara vez se aplica a modelos de producción de crecimiento (Li *et al.* 2022).

En la literatura existen diversos trabajos que fueron realizados para modelar el crecimiento de diversos cultivos de interés económico. Por ejemplo, en el cultivo de girasol, el modelo que describió satisfactoriamente la curva de crecimiento en altura, proporcionando parámetros con interpretaciones prácticas, fue el modelo Logístico, ya que se obtuvo mejor calidad de ajuste, siendo el más adecuado para caracterizar la curva de crecimiento (Martins *et al.* 2021). Así también, en el cultivo de lechuga, variedades Gloriosa, Grandes Lagos y Rubinela, el modelo logístico se ajustó satisfactoriamente para representar las variables relacionadas a la materia fresca y seca de hojas (Carini *et al.* 2020).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LOCALIDAD

La presente investigación se realizó en las instalaciones de la empresa EcoVerduras, ubicado en el Anexo Vista Alegre S/N, distrito de Imperial, provincia de Cañete, departamento de Lima, en las coordenadas $13^{\circ}03'09''$ S y $76^{\circ}22'10''$ O, con altitud de 130 m (Figura 1).

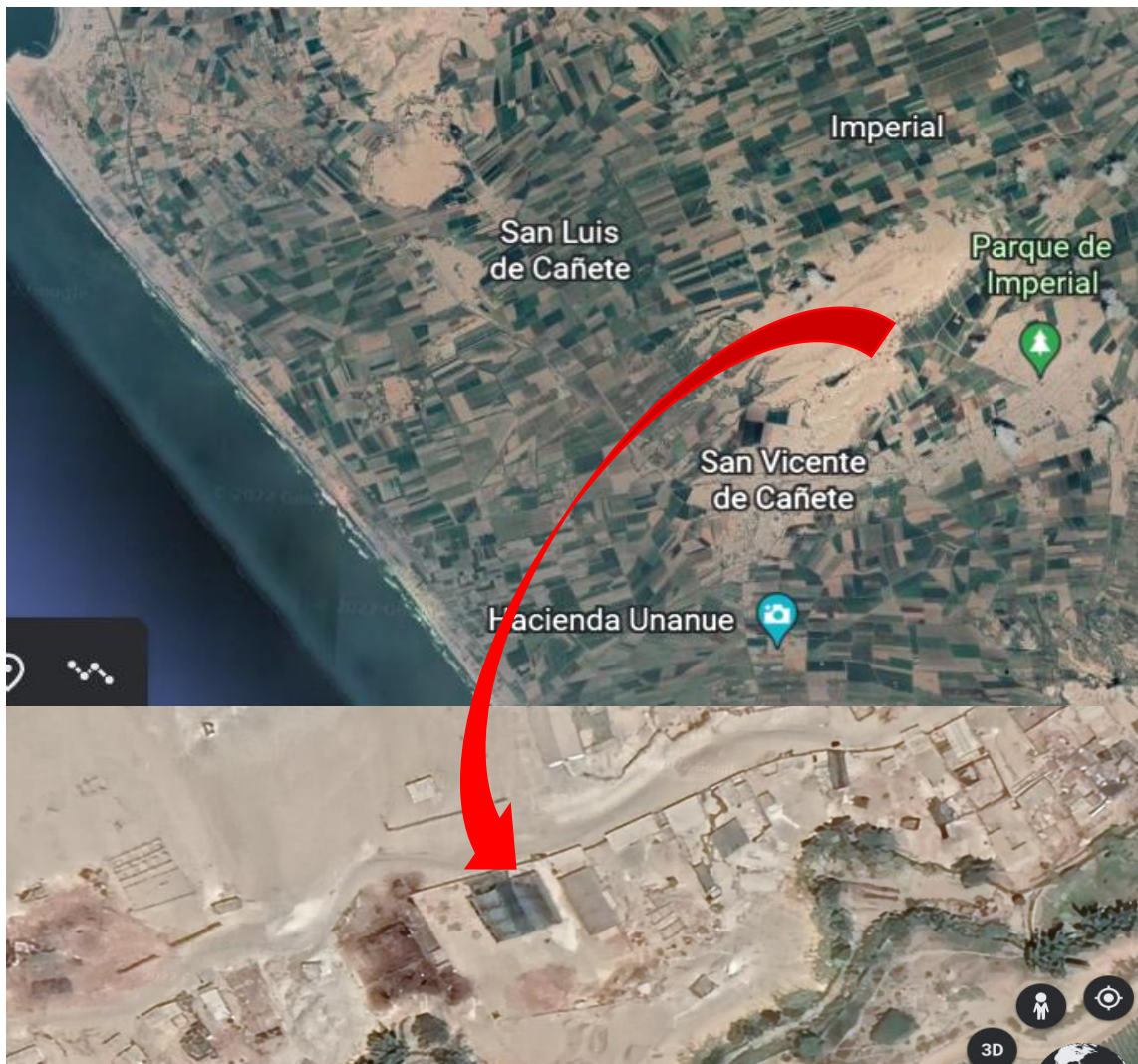


Figura 1. Ubicación de la empresa EcoVerduras - Zona del experimento

3.2 CLIMA

El departamento de Lima se caracteriza por tener un clima tipo E (d) B', el cual corresponde a condiciones de aridez con deficiencia de humedad en todas las estaciones del año (SENAMHI 2021). Registros tomados en el interior de la estructura donde se llevó a cabo los experimentos (Cuadro 3), mostraron promedios de temperatura y humedad relativa durante la época de invierno y verano de 16.4 °C y 84 por ciento y de 21.7 °C y 72.2 por ciento, respectivamente.

Cuadro 3: Temperatura y humedad relativa durante el desarrollo de los experimentos

Época	Semana	T _{Max.}	T _{Min.}	T _{Prom.}	HR _{Max.}	HR _{Min.}	HR _{Prom.}
		-----°C-----			-----%-----		
Invierno	1	18.2	12.4	15.3	88	79	83.5
	2	18.9	13.7	16.3	87	80	83.5
	3	19.4	12.9	16.1	89	81	85.0
	4	20.1	13.1	16.6	89	77	83.0
	5	21.5	14.1	17.8	90	80	85.0
Verano	1	27.3	16.2	21.7	78	65	71.5
	2	26.8	16.8	21.8	80	60	70.0
	3	27.1	17.5	22.3	85	67	76.0
	4	26.4	16.9	21.6	82	63	72.5
	5	25.9	16.2	21.0	80	62	71.0

T_{Max.}: Temperatura máxima; T_{Min.}: Temperatura mínima; T_{Prom.}: Temperatura promedio; HR_{Max.}: Humedad relativa máxima; HR_{Min.}: Humedad relativa mínima; HR_{Prom.}: Humedad relativa promedio.

3.3 MATERIAL VEGETAL

Se utilizaron plantines de lechuga de la variedad 'Waldmans Green', los cuales fueron provistos por el mismo centro de producción EcoVerduras. Los plantines fueron entregados en la época de invierno a los 35 días después de la siembra (DDS), y en verano a los 31 DDS.

3.4 DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS

Fueron realizados dos experimentos en condiciones de invierno y verano, bajo el diseño de bloque completamente al azar (DBCA), con arreglo factorial $3 \times 3 + 1$, con 5 repeticiones. Los factores evaluados fueron la aplicación de diferentes dosis de Fe ($D_1 = 2 \text{ mg l}^{-1}$, $D_2 = 4 \text{ mg l}^{-1}$ y $D_3 = 6 \text{ mg l}^{-1}$) y momentos de aplicación ($M_1 = 100$ por ciento a los 10 días después del trasplante-DDT; $M_2 = 100$ por ciento a los 20 DDT; $M_3 = 50$ por ciento a los 10 y 20 DDT), que conformaron los siguientes tratamientos: $T_1 = D_1M_1$; $T_2 = D_1M_2$; $T_3 = D_1M_3$; $T_4 = D_2M_1$, $T_5 = D_2M_2$; $T_6 = D_2M_3$; $T_7 = D_3M_1$; $T_8 = D_3M_2$; $T_9 = D_3M_3$, junto con el tratamiento testigo (T_{10}). En el Anexo 2 se muestra la distribución aleatorizada de los tratamientos según el diseño experimental propuesto.

La unidad experimental estuvo compuesta por diez plantas, siendo que las plantas del inicio y final no fueron tomadas en cuenta para la evaluación de las variables. Para el suministro de Fe, fue utilizado hierro al 6 por ciento quelatado con EDDHA, diluida en agua destilada, para evitar la influencia del contenido químico de este en el experimento.

3.5 VARIABLES EVALUADAS

Durante el desarrollo de los experimentos se realizaron las siguientes evaluaciones:

3.5.1 Masa de la materia fresca y seca (g planta^{-1})

Se tomaron muestras a los 7, 14, 21, 28 y 35 DDT, luego en el laboratorio se realizó la separación de la parte aérea y radicular para tomar el peso fresco de cada órgano utilizando una balanza digital. Seguidamente, las muestras fueron puestas a secar en una estufa con circulación forzada de aire a $75 \text{ }^\circ\text{C}$, hasta alcanzar peso constante. Luego del secado, utilizando una balanza digital con una precisión de 0.01 g , se obtuvo las masas secas de las citadas partes de la planta.

3.5.2 Área foliar ($\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$)

Se usaron las hojas que fueron utilizadas para evaluar la masa de la materia fresca antes de su secado. Este procedimiento se repitió para cada muestreo. En este caso, se tomaron fotografías utilizando una cámara semiprofesional, solamente, del limbo foliar de las

hojas y, posteriormente, fueron procesadas utilizando el *software* 'ImageJ', de uso libre, para estimar dicha variable.

3.5.3 Determinación de N-NO₃⁻, K⁺ y Ca⁺⁺ en el extracto celular (ppm)

Al final del experimento, en las plantas que quedaron en cada unidad experimental después de realizar los muestreos para la evaluación de la materia fresca, fueron obtenidas las concentraciones del N-NO₃⁻, K⁺ y Ca⁺⁺ del extracto celular de las nervaduras de las hojas, utilizando medidores portátiles con electrodo selectivo de iones (marca Horiba).

3.5.4 Concentraciones foliares de Fe (ppm), N, P y K (%)

Las muestras colectadas al final del ciclo, fueron debidamente identificadas y enviadas al Laboratorio de Química Agrícola del Instituto Valle Grande para el respectivo análisis de nutrientes.

Las concentraciones de hierro y potasio fueron determinadas por la técnica de Espectrometría de Absorción Atómica por Llamas (FAAS), iCE 3000 Series (Thermo Scientific, Waltham, MA, USA).

El nitrógeno fue determinado mediante la técnica de Dumas, en donde la muestra, primeramente, se combustiona a una temperatura alta en una atmósfera de oxígeno y luego, a través de subsiguientes procesos de oxidación y reducción, el nitrógeno se convierte cuantitativamente en N₂. El resto de los productos volátiles de la combustión se aíslan o se separan. Un detector de conductividad térmica mide el gas nitrógeno (Müller 2017).

En el caso del fósforo, este fue determinado mediante la técnica colorimétrica de metavanadato de amonio (NH₄ VO₃), en un rango de absorción de 430 nm frente a una curva de calibración de K₂HPO₄. En total, se agregaron a los tubos de ensayo 3.5 ml de agua destilada, 500 l de la solución madre y 1 ml de reactivo de fósforo.

3.6 CONDUCCIÓN DEL EXPERIMENTO

En el verano, el experimento fue conducido en el interior de un módulo con cubierta de malla “raschel” (50 por ciento de sombra) y en el invierno sin la cubierta de malla. El sistema hidropónico NFT, instalado dentro del módulo, conformados por canales de polipropileno de cultivo hidropónico, de 23 cm de ancho, con reutilización y recirculación de la solución nutritiva, los cuales fueron instaladas sobre estructuras de madera que sirvieron como soporte (Figura 2A). Cada tratamiento estuvo dispuesto conforme al diseño experimental propuesto.

La formulación de la solución nutritiva utilizada en los experimentos se muestra en el Cuadro 4. Esta formulación fue hecha por el Centro Internacional de Hidroponía y Nutrición Mineral (CIHNM) de la UNALM, la cual fue modificada de acuerdo con los resultados del análisis del agua (Anexo 3). Además, en esta formulación se evitó las fuentes de Fe, visto que fue uno de los factores en estudio.

Cuadro 4: Composición de la solución nutritiva utilizada en el experimento

SN	Fuente	Cantidad (g)	Solución Concentrada	DxL SN
A	Fosfato monoamónico	550	5 l	5 ml
	Nitrato de Potasio	350		
	Nitrato de Amonio	180		
	Sulfato de Magnesio Heptahidratado	220		
B	Quelato This Zn 20 %	25	2 l	2 ml
	Quelato This Mn 17 %	20		
	Quelato This Cu 15 %	10		
	Ácido Bórico - INKABOR	1.2		
C	Nitrato de Calcio	450	1 l	1 ml

SN: Solución Nutritiva; DxL SN: Dosis por litro de Solución Nutritiva

La recirculación y oxigenación de la solución nutritiva se realizó mediante una electrobomba centrífuga de 1 Hp, marca Humboldt, desde el tanque colector hacia los canales de cultivo mediante la tubería de distribución y el cual retornaba al tanque colector por las tuberías de drenaje. El encendido de la electrobomba se ejecutó de forma manual en la hora programada, siendo el tiempo de recirculación de 15 minutos y la frecuencia de recirculación a las 7:00, 11:00, 12:00, 13:00, 15:00 y 18:00 horas.

Antes de colocar los plantines en los canales de cultivo durante las épocas de invierno y verano, estos fueron lavados y limpiados interna y externamente (Figura 2A). Se tuvo especial cuidado en limpiar el interior de los canales, el cual fue realizado utilizando una escobilla que era deslizado por el interior mediante un alambre ubicado en ambos extremos del canal, asegurando de esa manera la eliminación de cualquier residuo vegetal que hubiera quedado de la cosecha anterior. A continuación, se realizó la desinfección utilizando hipoclorito de sodio al 4 por ciento y, seguidamente, se hizo el enjuague con agua hasta por tres veces.

Los plantines de lechuga del híbrido ‘Waldmans Green’, fueron producidos en sustrato de arena hasta 15 DDS. A partir de ahí, fueron colocados en pequeños vasos de plástico y llevados hacia un sistema hidropónico flotante (Figura 2B) hasta su posterior trasplante a los canales definitivos.

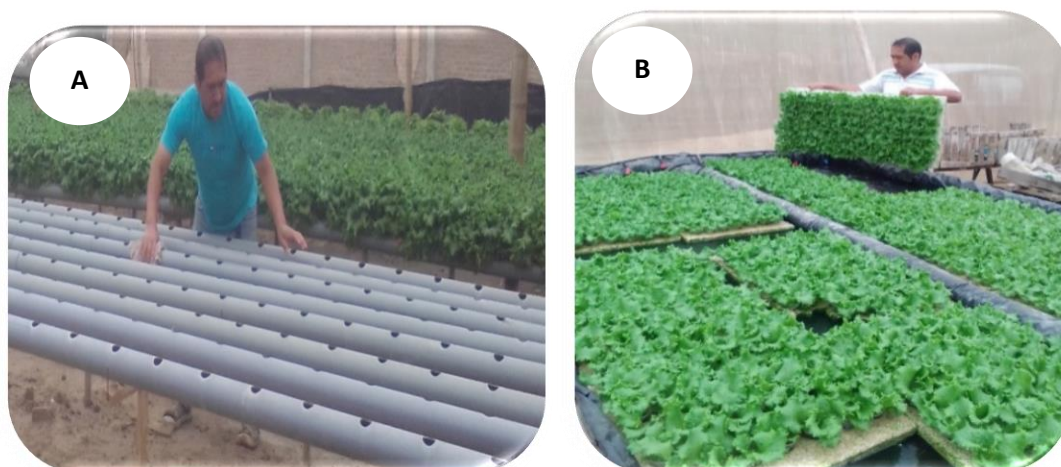


Figura 2: A: Lavado y desinfección de los canales de cultivo. B: Plantines de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, en hidroponía

Los plantines de lechuga que alcanzaron características deseables para el trasplante a los 35 y 31 DDS, en invierno y verano, respectivamente, tenían de tres a cuatro hojas

verdaderas, 15 cm de altura y raíces blancas sin presencia de daños por patógenos (Figura 3A). En ese sentido, fueron seleccionados los plantines que poseían dichas características para iniciar el experimento con uniformidad de plantas (Figura 3B).

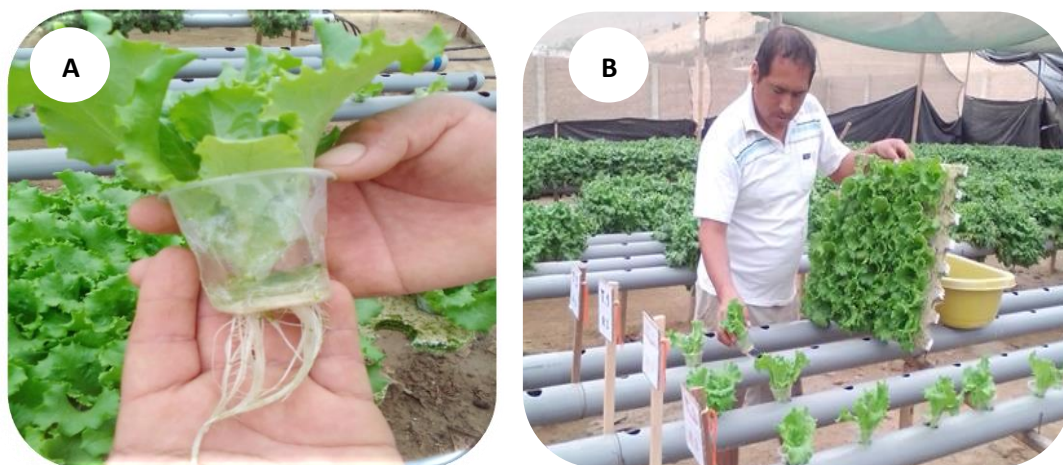


Figura 3: A: Características de plantines deseables para el trasplante. B: Trasplante de plantines

El asperjado del hierro sobre las hojas se realizó con un pulverizador manual, marca Jacto. La secuencia de aplicación de las dosis de Fe se inició con la menor concentración continuando hasta la mayor concentración, con la finalidad de no tener alteración ni contaminación entre los tratamientos.

A los 10 DDT se realizó el primer asperjado de Fe y debido a la poca cobertura de la planta en esa época, no fue necesario utilizar cortinas para aislar la unidad experimental tratada (Figura 4A). Sin embargo, a partir del segundo asperjado si fue necesario el uso de cortinas de protección, para evitar la contaminación entre los tratamientos (Figura 4B).



Figura 4: Asperjado de hierro sobre plantas de lechuga, híbrido 'Waldmans Green'. A: A los 10 DDT. B: A los 20 DDT

3.7 ANÁLISIS DE DATOS

Los datos obtenidos en los experimentos realizados en las épocas de invierno y verano fueron sometidos al análisis de variancia por la prueba F. Seguidamente, cuando la relación del mayor y menor cuadrado medio del residuo de los experimentos fue inferior a más de cuatro veces, fue realizado el análisis conjunto de los datos. Cuando hubo efecto significativo de los factores en estudio, se realizó la prueba de Tukey al 5 por ciento de probabilidad.

Así también, se hizo el análisis de crecimiento utilizando la función logística, según Rodríguez y Leihner (2006), y su representación fue realizada utilizando el software ORIGIN 6.1. La función logística sigue el modelo:

$$Y = (A / 1 + y^{(-K(X-X_c)})$$

donde:

Y = valor promedio de la característica evaluada.

A = máximo asintótico (cantidad máxima).

K = tasa promedio de aumento de la cantidad acumulada.

X = tiempo (días).

X_c = tiempo requerido para alcanzar la mitad de la cantidad máxima.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 MASA DE LA MATERIA FRESCA Y SECA

En el análisis conjunto de los experimentos no se verificó efecto significativo de la interacción de los tratamientos evaluados en las épocas de invierno y verano para las variables masa fresca de hojas (MFH) y raíces (MFR), a los 7, 14, 21, 28 y 35 días después del trasplante (DDT) (Cuadro 5). Por otro lado, se constató efecto individual del factor época sobre dichas variables solamente a los 14, 21 y 28 DDT. Así también, hubo efecto significativo del factor época solamente a los 7 y 35 DDT para MFH y MFR, respectivamente (Cuadro 5).

En el Cuadro 5 se puede observar que hubo mayor acumulación de MFH en las condiciones de verano, con excepción de las evaluaciones realizadas a los 7 DDT, cuando se obtuvo el menor valor para esa variable y, a los 35 DDT, donde no se verificó diferencias significativas para las épocas de verano e invierno, obteniéndose un promedio de 128.9 g planta⁻¹. Similar comportamiento fue verificado para la variable MFR a los 14, 21, 28 y 35 DDT en la época de verano, obteniendo valores que fueron superiores en 42.9, 33.9, 34.5 y 54.8 por ciento a los verificados en la época de invierno, respectivamente (Cuadro 5). También, a pesar que se obtuvo mayor MFR a los 7 DDT en la época de verano, este no fue significativamente diferente al observado en la época de invierno.

Evaluando el efecto de la intensidad luminosa y la temperatura en plantas de lechuga cultivadas en cámaras climáticas artificiales, Zhou *et al.* (2022) verificaron que la temperatura fue el principal factor que afectó la fotosíntesis y el crecimiento de la lechuga, obteniendo mayores valores de MFH cuando la temperatura fue de 23 °C. Diferentemente, en este estudio se obtuvieron mayores valores de MFH cuando la temperatura máxima diaria fue superior a 25 °C. Este hecho explica porque mayores valores de MFH fueron obtenidos en el presente estudio, en la época de verano, donde la temperatura promedio fue de 21.7 °C (Cuadro 5).

Cuadro 5: Análisis de varianza conjunto de los experimentos y promedios de materia fresca de hojas y raíces de plantas de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’

Causas de variación	7 DDT		14 DDT		21 DDT		28 DDT		35 DDT	
	MFH	MFR	MFH	MFR	MFH	MFR	MFH	MFR	MFH	MFR
Tratamientos (T)	0.72 ^{NS}	0.37 ^{NS}	1.13 ^{NS}	0.52 ^{NS}	1.15 ^{NS}	1.65 ^{NS}	0.15 ^{NS}	0.79 ^{NS}	0.69 ^{NS}	0.54 ^{NS}
Época (E)	35.28 ^{**}	1.40 ^{NS}	102.02 ^{**}	234.91 ^{**}	246.32 ^{**}	3234.94 ^{**}	46.41 ^{**}	709.36 ^{**}	1.90 ^{NS}	191.85 ^{**}
T x E	0.44 ^{NS}	1.36 ^{NS}	1.15 ^{NS}	1.06 ^{NS}	0.61 ^{NS}	0.32 ^{NS}	1.16 ^{NS}	1.07 ^{NS}	0.75 ^{NS}	1.76 ^{NS}
Época	-----g planta ⁻¹ -----									
Invierno	13.98 a [#]	2.70 a	28.03 b	4.30 b	73.35 b	6.37 b	107.13 b	7.02 b	131.7 a	11.99 b
Verano	11.26 b	2.88 a	48.82 a	10.02 a	116.1 a	18.77 a	153.83 a	20.87 a	126.2 a	21.86 a

*, **, ^{NS} = Significativo al 5, 1 por ciento y no significativo por la prueba F, respectivamente. [#] Medias con la misma letra en la columna no difieren estadísticamente ($p \leq 0.05$) por la prueba de Tukey. DDT: Días después del trasplante, MFH: Masa Fresca de Hoja, MFR: Masa Fresca de Raíz.

Así como fue verificado para las variables MFH y MFR, no se constató efecto significativo de la interacción de los tratamientos y épocas sobre la masa seca de hojas (MSH) y raíces (MSR) a los 7, 14, 21, 28 y 35 DDT (Cuadro 6). Por otra parte, fue verificado efecto significativo del factor época sobre la MSH y MSR en todas las etapas de muestreo, excepto a los 14 DDT para la MSR y a los 28 y 35 DDT para MSH.

Mayores valores de la MSH se constataron solamente a los 14 y 21 DDT en la época de verano, siendo superiores en 20.1 y 28.9 por ciento a los obtenidos en la época de invierno, respectivamente (Cuadro 6). Por otro lado, el menor valor fue obtenido a los 7 DDT en la época de verano. También, no se evidenció diferencias significativas para la MSH, a los 28 y 35 DDT entre las épocas de verano e invierno, obteniéndose promedios de 8.48 y 9.14 g planta⁻¹, respectivamente.

Excepto para la MSR obtenida a los 7 DDT, fue verificado mayores valores de esa variable a los 21, 28 y 35 DDT en la época de verano (Cuadro 6), siendo superiores en 50, 66.6 y 79.4 por ciento, respectivamente, a los obtenidos en la época de invierno. Así como verificado para la MSH, el menor valor fue obtenido a los 7 DDT en la época de verano. A los 14 DDT, no hubo diferencias estadísticas entre los valores obtenidos en ambas épocas de evaluación, obteniéndose un promedio de 0.33 g planta⁻¹ de MSR.

Así como fue verificado para MFH y MFR, las diferencias observadas para MSH y MSR en las épocas de verano e invierno fue debido, probablemente, al efecto de las mayores temperaturas verificadas en la época de verano (Cuadro 3). Diversos trabajos han mostrado la influencia de este factor sobre la fisiología de las plantas, acelerando o disminuyendo su metabolismo, así como fue verificado por León-Pacheco *et al.* 2022, quienes constataron efecto positivo de la temperatura (promedio de 27.1 °C) sobre variables del crecimiento (número de hojas, diámetro de tallo y masa fresca y seca de hojas) en cultivares de lechuga, White Boston y Romana Parris Islan Coss, cultivados bajo agricultura protegida.

En trabajo realizado por Zhou *et al.* (2019), evaluando el efecto de diferentes intensidades luminosas y de temperaturas, verificaron mayor valor de MSH (5.81 g planta⁻¹) cuando las plantas de lechuga crecieron a 23 °C con 600 mmol m⁻² s⁻¹, cinco semanas después del trasplante. El valor de MSH obtenido por dichos autores fue menor al constatado en el

presente estudio (9.14 g planta⁻¹), el cual fue obtenido a los 35 DDT, independiente de la época evaluada (invierno y verano). Diferentemente, evaluando diferentes temperaturas (25 y 33 °C), Sublett *et al.* (2018) constataron a la cosecha mayor valor de MSH (1.2 g planta⁻¹) de lechuga con la mayor temperatura evaluada, sin embargo, este valor fue muy inferior al verificado en este trabajo. Esta diferencia puede ser debido a los cultivares de lechuga que fueron utilizados, al sistema de cultivo empleado y al ciclo del cultivo.

Temperaturas ambientales cercanas a de 31 °C promueven la floración prematura de la lechuga con disminución de la calidad y pérdida de rendimiento, así mismo, pueden alterar el normal crecimiento del sistema radicular y la asimilación de nutrientes. En ese sentido, las condiciones óptimas de temperatura para el crecimiento normal de la lechuga es de 24 °C, presentando hojas de color verde intenso, buena estructura radicular y materia seca en torno a 7.0 g planta⁻¹ (Thompson *et al.* 1998). Resultados similares fueron obtenidos en el presente estudio para la MSH (9.14 g planta⁻¹).

4.2 ÁREA FOLIAR

De acuerdo a la Tabla 7, y así como verificado para MFH, MFR, MSH y MSR, solamente hubo efecto significativo del factor época sobre el área foliar a los 7, 14, 21, 28 y 35 DDT.

Mayores áreas foliares fueron constatadas a los 14, 21, 28 y 35 DDT en el verano, siendo superiores en 62.0, 59.8, 59.9 y 71.1 por ciento a los obtenidos en la época de invierno, respectivamente. En contraste, el menor valor fue verificado a los 7 DDT para el verano en comparación al invierno (Cuadro 7).

Así como constatado para MFH, MFR, MSH y MSR, la temperatura fue el factor que afecto de manera importante esta variable. Lopes Da Luz *et al.* (2008) obtuvo en promedio 2999 cm² planta⁻¹ de área foliar con una temperatura promedio de 24 °C a los 23 DDT. En contraste, en este estudio se obtuvo menor valor de AF a los 35 DDT. Esta diferencia está asociada al uso de diferentes cultivares y al deterioro fisiológico sufrido por las hojas debido a la temperatura y la etapa de senescencia. En definitiva, el efecto de la temperatura del aire sobre el rendimiento fresco está relacionado con todos los procesos de expansión de la hoja y la masa de brotes y, el contenido de agua de las hojas muestran la misma tendencia cuando la temperatura del aire fue de 24 °C (Carotti *et al.* 2021).

Cuadro 6: Análisis de varianza conjunto de los experimentos y promedios de materia fresca de hojas y raíces de plantas de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’

Causas de variación	7 DDT		14 DDT		21 DDT		28 DDT		35 DDT	
	MSH	MSR	MSH	MSR	MSH	MSR	MSH	MSR	MSH	MSR
Tratamientos (T)	1.23 ^{NS}	0.88 ^{NS}	0.75 ^{NS}	0.34 ^{NS}	0.53 ^{NS}	1.95 ^{NS}	0.32 ^{NS}	1.50 ^{NS}	0.64 ^{NS}	0.96 ^{NS}
Época (E)	386.99 ^{**}	5.30 ^{**}	16.55 ^{**}	0.00 ^{NS}	114.54 ^{**}	367.10 ^{**}	4.20 ^{NS}	194.84 ^{**}	3.17 ^{NS}	50.53 ^{**}
T x E	0.32 ^{NS}	0.88 ^{NS}	1.44 ^{NS}	1.85 ^{NS}	0.66 ^{NS}	0.51 ^{NS}	1.57 ^{NS}	0.46 ^{NS}	0.97 ^{NS}	0.80 ^{NS}
Época	-----g planta ⁻¹ -----									
Invierno	0.94 a [#]	0.16 a	2.06 b	0.33 a	4.97 b	0.37 b	8.83 a	0.48 b	9.40 a	0.82 b
Verano	0.42 b	0.11 b	2.58 a	0.33 a	6.90 a	0.74 a	8.13 a	0.72 a	8.88 a	1.07 a

*, **, ^{NS} = Significativo al 5, 1 por ciento y no significativo por la prueba F, respectivamente. [#] Medias con la misma letra en la columna no difieren estadísticamente ($p \leq 0.05$) por la prueba de Tukey. DDT: Días Después del Trasplante, MSH: Masa Seca de Hoja, MSR: Masa Seca de Raíz.

La alta intensidad luminosa junto a la temperatura son los factores críticos para el cultivo de lechuga en el verano, siendo importante la instalación de una sombra, como el que se hizo en el módulo donde se llevó a cabo el experimento (malla “raschel” al 50 por ciento), para que el cultivo muestre los mecanismos de adaptación más efectivos y se obtengan mejores rendimientos, ya que la sombra reduce la transpiración de la lechuga al interceptar la radiación solar y reducir la temperatura del aire, lo que permite incrementar la tasa de crecimiento en verano. En trabajo realizado por Formisano *et al.* (2021), la cobertura del módulo con sombra blanca (49 por ciento de detección) demuestra ser una práctica agrícola adecuada, el cual generó un microclima adecuado para el crecimiento fuera de temporada de los cultivares más sensibles 'Ballerina', 'Oak leaf' y 'Romaine'.

Según Borowski *et al.* (2015), la luz, la temperatura y el agua, son los principales factores ambientales que influyen en la cantidad y calidad del rendimiento de las plantas, tal es así que en condiciones de deficiencia de luz solar, cuando las plantas son cultivadas en invernaderos, es necesario la iluminación con luz artificial.

Así como fue explicado para las otras variables analizadas, la temperatura juega un papel importante en la producción de hortalizas, por tal razón se ha hecho la clasificación de las mismas por su adaptabilidad a diferentes temperaturas (con respecto a las estaciones).

Aunque la lechuga se considera un cultivo de estación fría y su cultivo es ideal para la época de invierno, temperaturas muy frías pueden tener un efecto severo sobre el crecimiento del cultivo, manifestándose con síntomas relacionadas a quemaduras de hojas y provocando una disminución en las tasas de crecimiento (Lee *et al.* 2015).

En el presente experimento, los promedios de la temperatura y humedad relativa durante la época de invierno y verano fueron de 16.4 °C y 84 % y 21.7 °C y 72.2 %, respectivamente. Así también, la temperatura máxima en este ensayo osciló entre 22 y 24 °C, el cual estuvo dentro del requisito de temperatura óptima (17-27 °C) para el crecimiento de la lechuga.

Cuadro 7: Análisis de varianza conjunto de los experimentos y promedios del área foliar de plantas de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’

Causa de variación	7 DDT	14 DDT	21 DDT	28 DDT	35 DDT
Tratamientos (T)	0.71 ^{NS}	1.23 ^{NS}	0.56 ^{NS}	0.35 ^{NS}	0.47 ^{NS}
Época (E)	178.21 ^{**}	119.51 ^{**}	165.49 ^{**}	93.12 ^{**}	158.75 ^{**}
T x E	0.35 ^{NS}	1.18 ^{NS}	1.32 ^{NS}	1.55 ^{NS}	0.60 ^{NS}
Época	----- cm planta⁻¹ -----				
Invierno	384.00 a [#]	628.39 b	1249.29 b	1861.80 b	2062.80 b
Verano	253.77 b	1013.42 a	2089.48 a	3048.17 a	2899.65 a

**, **, ^{NS} = Significativo al 5, 1 por ciento y no significativo por la prueba F, respectivamente. # Medias con la misma letra en la columna no difieren estadísticamente ($p \leq 0.05$) por la prueba de Tukey.*

4.3 CONTENIDOS DE NO₃⁻, K⁺ Y CA⁺⁺ EN EL EXTRACTO CELULAR DEL PECÍOLO

No se verificó efecto significativo de la interacción entre los factores tratamientos x época sobre el contenido de NO₃⁻, K⁺ y Ca⁺⁺ en el extracto celular del pecíolo de hojas de lechuga a la cosecha (Cuadro 8). Por otro lado, solamente se constató efecto significativo del factor época sobre el contenido de K⁺ y Ca⁺⁺.

Fue verificado mayor contenido de K⁺ en la época de invierno, siendo superior solamente en 4.6 por ciento al verificado en el verano. Diferentemente, fue constatado mayor contenido de Ca⁺⁺ en la época de verano que en invierno, habiendo una diferencia entre ellas de 64.7 ppm, representando el 40.6 por ciento. En el caso del contenido de NO₃⁻, no hubo diferencias estadísticas entre los valores obtenidos para las épocas de invierno y verano, resultando en un valor promedio de 2075.7 ppm. Sin embargo, cabe mencionar que en el invierno el contenido de NO₃⁻ fue 5 por ciento menor al obtenido en el verano (Cuadro 8).

El ligero incremento del NO_3^- y muy significativo del Ca^{++} presentes en el peciolo en verano se atribuye a la mayor transpiración de la planta, debido a las altas temperaturas, ya que el calcio se mueve a través del xilema, principalmente en relación con el flujo de agua que surge de la transpiración lo que provoca un flujo ascendente de NO_3^- y Ca^{++} de la raíz hacia la parte aérea (Sago 2016, Lara-Izaguirre *et al.* 2019). Cabe mencionar que bajo las condiciones del experimento no se observó síntomas de “tipburn”; este desorden fisiológico no es sinónimo de deficiencia de Ca, dado que mientras una deficiencia puede conducir a una reducción o inhibición del crecimiento, el “tipburn” se presenta inclusive en condiciones de abundancia del ion (Kuronuma *et al.* 2020).

Las concentraciones de calcio en toda la planta generalmente aumentan con la intensidad de la luz, de manera similar, las concentraciones de calcio en las hojas exteriores generalmente aumentan con la intensidad de la luz. Por el contrario, las concentraciones de calcio en el interior de las hojas no se ve alterado con diferentes intensidades de luz (Sago 2016). En ese sentido, el uso de mallas sombreadoras de color verde/negro influyen en las características agronómicas de la lechuga, cuando las condiciones son de altas temperaturas, mostrando así mayor producción y rendimiento (Aires *et al.* 2020).

Con relación a los límites del máximo contenido de nitratos en lechuga, la legislación peruana carece de información. Sin embargo, según las normas de la comisión Europea del año 2011, se establecen rangos permitidos entre 3000 y 5000 ppm en hojas de lechuga, los cuales varían según la época (verano e invierno) y condición de producción (invernadero y aire libre) donde los rangos máximos corresponden al verano, bajo condiciones de invernadero (BOE 2011). En contraste, con la presente investigación se alcanzó un valor máximo de 2124 ppm, el cual se encuentra dentro del rango permitido. Así mismo cabe mencionar que la aplicación de fertilizantes nitrogenados influye en la concentración de nitrato en las partes comestibles de la lechuga e incrementan con frecuencia la conductividad eléctrica del medio de cultivo y, por lo tanto, afecta negativamente el rendimiento de la lechuga en crecimiento (Liu *et al.* 2014).

Respecto al K, en trabajo realizado por Sublett *et al.* 2018, se verificó menor contenido de este nutriente (11 por ciento a menos) a una temperatura de 33 °C en relación a 25 °C. Este hecho también fue corroborado en este estudio, en el cual hubo menor contenido de K durante la época de verano, cuando las temperaturas fueron altas. Posiblemente esta

reducción del K esté asociado al efecto antagonista que ocurre con el Ca, ya que este elemento incremento sus niveles en el verano por efecto de la transpiración (Lara-Izaguirre *et al.* 2019, Sago 2016). En ese sentido, Voogt (2002) refiere que el efecto de la nutrición con K debe estudiarse teniendo en cuenta los efectos de este sobre otros cationes, principalmente con Ca y Mg, debido a que el incremento de K responde a una disminución de Ca. Este efecto antagonista, también se pudo observar en el presente experimento, donde se observa una reducción significativa del Ca y el incremento del K (Cuadro 8).

El potasio tiene un impacto significativo en el rendimiento del tallo de lechuga, y la calidad de la misma. Además, contribuye en todas las etapas del crecimiento de la planta al mantener el mayor número de hojas en estado de actividad y vitalidad hasta el final de su ciclo; prolonga el período de crecimiento vegetativo, lo que aumenta la longitud de la cabeza y; favorece la síntesis de carbohidratos y la división celular (Mahmood *et al.* 2022). Así mismo, el potasio junto con la luz regula múltiples procesos biológicos como la germinación de semillas, el crecimiento, la fotosíntesis, la absorción de agua y minerales, la acumulación de biomasa y las respuestas al estrés ambiental en las plantas (Ahammed *et al.* 2022).

Cuadro 8: Análisis de varianza conjunto de los experimentos y promedios para el contenido de NO₃⁻, K⁺ y Ca⁺⁺ en el extracto celular del pecíolo de hojas de plantas de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, a los 35 días después del trasplante (DDT)

Causas de variación	NO ₃ ⁻	K ⁺	Ca ⁺⁺
Tratamientos (T)	1.98 ^{NS}	3.15 ^{NS}	0.78 ^{NS}
Época (E)	2.27 ^{NS}	6.43 [*]	190.60 ^{**}
T x E	0.91 ^{NS}	0.54 ^{NS}	0.90 ^{NS}
Época	-----ppm-----		
Invierno	2027.40 a [#]	1664.00 a	94.62 b
Verano	2124.00 a	1586.00 b	159.36 a

*, **, ^{NS} = Significativo al 5, 1 por ciento y no significativo por la prueba F, respectivamente. [#] Medias con la misma letra en la columna no difieren estadísticamente ($p \leq 0.05$) por la prueba de Tukey.

4.4 CONCENTRACIONES FOLIARES DE NITRÓGENO (N), FÓSFORO (P), POTASIO (K) Y HIERRO (Fe)

Diferentemente a lo verificado para las demás variables analizadas, hubo efecto de la interacción de los factores tratamientos x época sobre las concentraciones de N, P, K y Fe en las hojas de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, a la cosecha (Cuadro 9). Así también, se constató efecto individual del factor época solamente sobre las concentraciones foliares de K y Fe.

Cuadro 9: Análisis de varianza conjunto de los experimentos para las concentraciones foliares de N, P, K y Fe en plantas de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, a los 35 días después del trasplante

Causas de variación	N	P	K	Fe
Tratamientos (T)	1.77 ^{NS}	0.31 ^{NS}	1.53 ^{NS}	0.92 ^{NS}
Época (E)	0.04 ^{NS}	0.03 ^{NS}	68.74*	23.79**
T x E	2.07*	6.97**	8.54**	166.36**

*, **, ^{NS} = Significativo al 5, 1 por ciento y no significativo por la prueba F, respectivamente.

En el desdoblamiento de la interacción se estudió el efecto de los tratamientos en las épocas de invierno y verano para las concentraciones foliares de N, P, K y Fe a los 35 DDT.

Fue corroborado mayor contenido de N en la época de invierno con el T₆ (aplicación fraccionada de 4 mg l⁻¹ de Fe a los 10 y 20 DDT), siendo superior en 21.7 por ciento al menor valor obtenido. Similar hecho fue observado para la época de verano, donde el valor máximo fue obtenido con el T₈ (aplicación de 6 mg l⁻¹ de Fe a los 20 DDT), siendo mayor en 12.9 por ciento al menor valor obtenido. Cabe mencionar que en ambas épocas los menores valores obtenidos del contenido de N corresponden al T₁₀ (testigo). En ese sentido, según Buturi *et al.* (2022), aplicaciones con Fe maximizan los contenidos de N, P, K, S y Zn de las hojas, así como también de Ca, Mg, Mn y B. Así también, no se verifico diferencia significativa entre épocas de cultivo, siendo el contenido de N mayor en la época de invierno que de verano, habiendo una diferencia entre ellas de 4.4 por ciento.

El rango adecuado de N en hojas de lechuga analizado justo antes de la cosecha está entre 2.1 – 5.6 por ciento (Knott 2007). En este estudio, los valores obtenidos del contenido de N en las épocas de invierno y verano se encuentran dentro del rango adecuado según Knott (2007), indicando que no hubo carencia de este nutriente en la planta. El contenido de N a los 35 DDT, en ambas épocas de cultivo fue en promedio 3.9 por ciento, siendo similar al obtenido por Sosa *et al.* (2017) quienes verificaron que la concentración de ese nutriente a los 35 DDT fue de 4.1 por ciento en lechugas cultivadas en suelo.

Los resultados del contenido de P en invierno, indican que la diferencia entre el mayor y menor valor obtenido fue de 23.8 por ciento, los cuales corresponden al T₁ (aplicación de 2 mg l⁻¹ de Fe a los 10 DDT) y T₄ (aplicación de 4 mg l⁻¹ de Fe a los 10 DDT), respectivamente. Esta diferencia en el verano fue de 14.5 por ciento y correspondió a los tratamientos T₁₀ (testigo) y T₆ (aplicación de 4 mg l⁻¹ de Fe a los 10 y 20 DDT). Comparando entre épocas de cultivo, no se verificó diferencias significativas entre ellas, siendo que la mayor concentración de P se obtuvo en el invierno, habiendo solamente una diferencia entre ellas de 7.4 por ciento.

En ambas épocas de evaluación se obtuvo mayor concentración foliar de P con la dosis baja de Fe. Según Guillén-Molina *et al.* (2016), la aspersión foliar con Fe aumenta el contenido de P en el tejido y dosis excesivas la disminuyen, pero estos efectos del Fe no fueron constatados en el presente experimento ya que en condiciones de verano, se verificó mayor nivel de P en el tratamiento testigo (T₁₀) (Cuadro 10), el cual coincide con los resultados obtenidos por Wojciechowska *et al.* (2019), quienes afirman que la nutrición con Fe a través del sustrato, influyó significativamente en el contenido de macronutrientes en las hojas de lechuga, encontrándose correlación negativa entre el nivel de hierro en el sustrato y el contenido de fósforo y calcio en las hojas.

El contenido de P en hojas de lechuga próximo a la cosecha está en el rango de 0.5 – 0.9 por ciento (Knott 2007). Preciado-Rangel *et al.* (2022) y Sosa *et al.* (2017) reportan valores del contenido de P entre 0.4 y 0.6 por ciento, a los 35 DDT, habiendo una ligera variación según los días de evaluación. En el presente estudio, el promedio del contenido de P entre las épocas de cultivo evaluadas (verano e invierno) fue de 0.58 por ciento, encontrándose dentro del rango adecuado propuesto por Knott (2007).

Referente al K, así como verificado para el N y P, no se constató diferencia significativa entre los tratamientos por época, pero si entre épocas de cultivo. La concentración de K en hojas de lechuga fue mayor en verano, habiendo una diferencia entre el mayor y menor valor obtenido durante esta época de 31.46 por ciento. Esta diferencia se redujo en el invierno a 23.18 por ciento. Los valores adecuados de K en hojas de lechuga analizadas justo antes de la cosecha (60 DDS) se ubican en el rango entre 4.0-8.0 por ciento (Knott 2007). En este estudio, valores similares al rango propuesto por Knott (2007) fueron obtenidos en el verano, contrariamente, en el invierno, los valores de K foliar estuvieron por debajo del rango adecuado propuesto.

La distribución del ion potasio en la célula sigue una estrategia particular, con tendencia a mantener una concentración elevada de K en el citosol y la vacuola funcionando como un orgánulo de almacenamiento del mismo. Además, este macroelemento cumple un papel muy importante en las plantas, como en la apertura estomática donde las células guarda se abren con la acumulación del K y se cierran con su pérdida (Römheld y Nikolic 2021, Beltrán-Morales *et al.* 2019). En ese sentido, es posible que la mayor concentración de K verificado en el experimento realizado durante el verano, se asocie a la intensificación de la apertura y cierre de estomas, proceso este que se ralentiza en el invierno donde se verifica menor concentración del elemento.

Similar comportamiento al verificado en el contenido de K, fue constatado también con el Fe. En el invierno, en el tratamiento control, se verificó la menor concentración de Fe, habiendo una diferencia con el máximo valor obtenido de 29.3 por ciento. El efecto fue aún más significativo cuando se incrementó la temperatura en el verano, habiendo una diferencia de 54.3 por ciento entre la mayor concentración con relación al testigo. Con respecto al comparativo entre épocas de cultivo, hubo mayor concentración de Fe en el verano y el cual fue 55.4 por ciento mayor a la concentración de Fe obtenido en el invierno.

La concentración de Fe en las hojas de lechuga puede variar de acuerdo al sistema de producción y a la dosis utilizada. Se ha verificado en el manejo convencional una concentración de hasta 16 ppm de Fe en el cultivo de lechuga (Reyes *et al.* 2017) y, en el sistema hidropónico (utilizando dosis crecientes de sulfato ferroso en la solución nutritiva), el contenido de este nutriente puede estar entre 78 y 212 ppm.

En el presente trabajo, todos los valores de Fe verificados en el invierno están en el rango considerado adecuado para la lechuga cultivada en invernadero, el cual varía de 50 a 200 ppm (Maynard y Hochmuth 2007). En contraste, en la época de verano los valores de Fe en los tratamientos T₇, T₄, T₅, T₈, T₉ y T₃ están por encima del rango adecuado; dichos tratamientos corresponden a las mayores dosis de Fe del experimento y además que por efecto de la temperatura, hubo incremento en la absorción de nutrientes concentrándose en mayor nivel en las hojas. Particularmente en el caso del Fe, la absorción de nutrientes vía foliar ocurre como resultado de un gradiente que se establece entre la concentración de la disolución aplicada sobre la superficie de la hoja y la correspondiente en el interior de la epidermis (células). Cuando la cutícula seca se humedece, las moléculas de agua interactúan mediante puentes de hidrógeno con los grupos ionizables de las cadenas carbonadas, con lo cual provocan que estas últimas se separen formando canales, poros y cavidades que permiten el transporte de nutrientes, desde la superficie de la hoja hacia las células epidermales (Murillo Castillo *et al.* 2013).

Aplicaciones de Fe a la dosis de 35 $\mu\text{M L}^{-1}$, además de promover una mayor acumulación de Fe en las hojas de lechuga, no tienen efecto negativo sobre el contenido de los demás nutrientes (Preciado-Rangel *et al.* 2022). Por otro lado, según Ghasemi y Ronaghi (2015), elementos como el Mn y Zn tienen efectos antagónicos con el Fe.

Los resultados obtenidos en el presente experimento en relación a la concentración de Fe, coinciden con publicaciones recientes de Buturi *et al.* (2022), quienes mencionan la eficacia de la aplicación foliar de Fe para aumentar su concentración en las hojas de lechuga y mejorar la calidad nutricional de la lechuga cultivada en sistemas de cultivo sin suelo, afirmando que la biofortificación con Fe de la lechuga cultivada sin suelo, en invernadero, es una herramienta eficaz para promover la ingesta dietética de Fe. Así también, dichos autores no solo verificaron incrementos del contenido de Fe en las hojas de lechuga, sino también promoción de una mayor acumulación de compuestos que promueven la salud, agregando así un posible valor de mercado al producto.

Cuadro 10: Promedios y significancia estadística de las concentraciones de N, P, K y Fe, determinadas en el limbo foliar de hojas de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’ a los 35 días después del trasplante

N		P		K		Fe	
-----%		-----%		-----ppm-----		-----ppm-----	
Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano
4.46 a [#] (T ₆)	4.26 a (T ₈)	0.67 a (T ₁)	0.62 a (T ₁₀)	3.71 a (T ₆)	5.53 a (T ₂)	147.95 a (T ₁)	331.83 a (T ₇)
4.25 ab (T ₅)	4.25 a (T ₅)	0.65 a (T ₆)	0.61 ab (T ₈)	3.44 ab (T ₅)	5.27 ab (T ₈)	133.93 ab (T ₅)	314.30 b (T ₄)
4.19 abc (T ₁)	4.06 a (T ₄)	0.60 ab (T ₂)	0.61 a b(T ₅)	3.37 ab (T ₂)	5.18 ab (T ₆)	129.20 bc (T ₆)	266.39 c (T ₅)
3.99 abcd (T ₂)	4.01 a (T ₉)	0.59 abc (T ₅)	0.60 ab (T ₄)	3.34 ab (T ₉)	5.16 ab (T ₇)	124.74 bc (T ₂)	252.88 c (T ₈)
3.94 abcd (T ₉)	3.99 a (T ₂)	0.59 abc (T ₈)	0.60 ab (T ₃)	3.30 ab (T ₇)	5.07 ab (T ₉)	122.68 bc (T ₉)	229.02 d (T ₉)
3.94 abcd (T ₈)	3.94 a (T ₆)	0.58 abc (T ₉)	0.58 ab (T ₉)	3.26 ab (T ₃)	4.89 abc (T ₁₀)	121.39 bcd (T ₇)	201.08 e (T ₃)
3.79 bcd (T ₇)	3.83 a (T ₇)	0.55 bc (T ₇)	0.58 ab (T ₇)	3.25 ab (T ₁)	4.71 bc (T ₅)	119.00 bcd (T ₃)	180.45 f (T ₆)
3.70 bcd (T ₃)	3.80 a (T ₃)	0.54 bc (T ₁₀)	0.57 ab (T ₁)	2.87 b (T ₁₀)	4.33 cd (T ₃)	115.15 cd (T ₄)	178.51 f (T ₁)
3.63 cd (T ₄)	3.72 a (T ₁)	0.53 bc (T ₃)	0.56 ab (T ₂)	2.87 b (T ₄)	3.84 d (T ₄)	113.70 cd (T ₈)	153.89 g (T ₂)
3.49 d (T ₁₀)	3.71 a (T ₁₀)	0.51 c (T ₄)	0.53 a (T ₆)	2.85 b (T ₈)	3.79 d (T ₁)	104.54 d (T ₁₀)	151.39 g (T ₁₀)

[#] Medias con la misma letra en la columna no difieren estadísticamente ($p \leq 0.05$) por la prueba de Tukey.

4.5 ANÁLISIS DE CRECIMIENTO EN LA ÉPOCA DE INVIERNO

4.5.1 Materia fresca de hojas (MFH) y raíces (MFR)

Inicialmente hubo menores valores de MFH hasta los 14 DDT para todos los tratamientos evaluados (Figura 5). Seguidamente, se constató un incremento en la MFH hasta los 28 DDT, habiendo ligeras diferencias entre los tratamientos, siendo no significativas. Así mismo, el incremento en la tasa de acumulación de materia fresca fue de 5.4, 4.92, 4.99, 5.36, 4.88, 5.2, 5.56, 5.18, 5.49 y 4.74 g planta⁻¹ para los tratamientos T₁, T₂, T₃, T₄, T₅, T₆, T₇, T₈, T₉ y T₁₀, respectivamente. Al final del ciclo de la lechuga, se estabilizó la acumulación de masa fresca en las hojas (Figura 5), obteniéndose valores de 114.3 (T₁), 105.3 (T₂), 108.9 (T₃), 112 (T₄), 111.5 (T₅), 110.3(T₆), 113.3(T₇), 118.6 (T₈), 115.3 (T₉) y 105.4 (T₁₀) g planta⁻¹.

Diversas investigaciones reportan que la lechuga es el cultivo más eficiente en generar biomasa de forma rápida. En los primeros estadios, la variedad ‘Waldmans Green’ tiene un crecimiento lineal, luego comienza a generar gran cantidad de hojas, las mismas que crecen a un ritmo acelerado y se convierten en órganos fuente de asimilados para las hojas más jóvenes que aparecen en el transcurso de su ciclo productivo (Barrientos *et al.* 2015).

La temperatura fue el principal factor ambiental que tuvo relevancia sobre el crecimiento de la lechuga. Resultados similares fueron obtenidos por Preciado-Rangel *et al.* (2022) quienes verificaron que la aplicación foliar de hierro no afectó significativamente el peso fresco y seco de la lechuga. En ese sentido, en el presente experimento, aplicaciones foliares de dosis crecientes de Fe hasta 6 mg l⁻¹ en lechuga, var. ‘Waldmans Green’, no afectaron el crecimiento de las hojas.

Con relación al modelo utilizado, Carini *et al.* (2020) constataron que los modelos de crecimiento Logístico y Gompertz, se ajustaron de forma satisfactoria para la materia fresca y seca de hojas y la materia fresca y seca de brotes de los cultivares de lechuga Gloriosa, Pira Verde y Stella, en otoño e invierno. De forma semejante, en el presente estudio el modelo logístico se ajustó adecuadamente a los datos obtenidos para la variable MFH.

De acuerdo a los gráficos, el modelo logístico se caracteriza por presentar tres etapas definidas de acumulación de MFH de la lechuga, var. ‘Waldman Green’, en condiciones de hidroponía, sistema NFT, en la época de invierno. Se inicia con la etapa de crecimiento lento (ECL), luego la etapa de crecimiento rápido (ECR) y finalmente la etapa final del desarrollo vegetativo, donde la planta alcanza la madurez de cosecha, el cual corresponde a los 35 DDT. Según Preciado-Rangel *et al.* (2022), la planta de lechuga alcanza las características organolépticas idóneas para la cosecha a los 30 DDT.

En contraste a lo verificado para la MFH, se observó que la acumulación de MFR tiene de forma general un comportamiento ascendente lineal. La etapa fenológica de la lechuga inicia con la etapa de plántula, continúa con la etapa de roseta, luego con la formación de cabeza, le sigue la madurez (momento de cosecha) y finalmente la floración (Saavedra *et al.* 2017, Camara de Comercio Bogotá 2015). Sin embargo, las evaluaciones realizadas en el presente estudio solo fueron hechas hasta la etapa de madurez. Este hecho explica el comportamiento lineal de la MFR, ya que el sistema radicular continuará su crecimiento con el fin de seguir suministrando agua y nutrientes hasta que la planta alcance la etapa de floración y la cual no fue evaluada. Por tal razón, el modelo que mejor se ajustó para la mayoría de los tratamientos evaluados para la MFR fue la Polinómica Lineal.

Al término del experimento, los valores finales de acumulación de MFR fueron 5.42 (T₁), 4.78 (T₂), 5.95 (T₃), 5.7 (T₄), 4.79 (T₅), 5.71(T₆), 8.23 (T₇), 5.39 (T₈), 7.18 (T₉) y 5.24 (T₁₀) g planta⁻¹ (Figura 5).

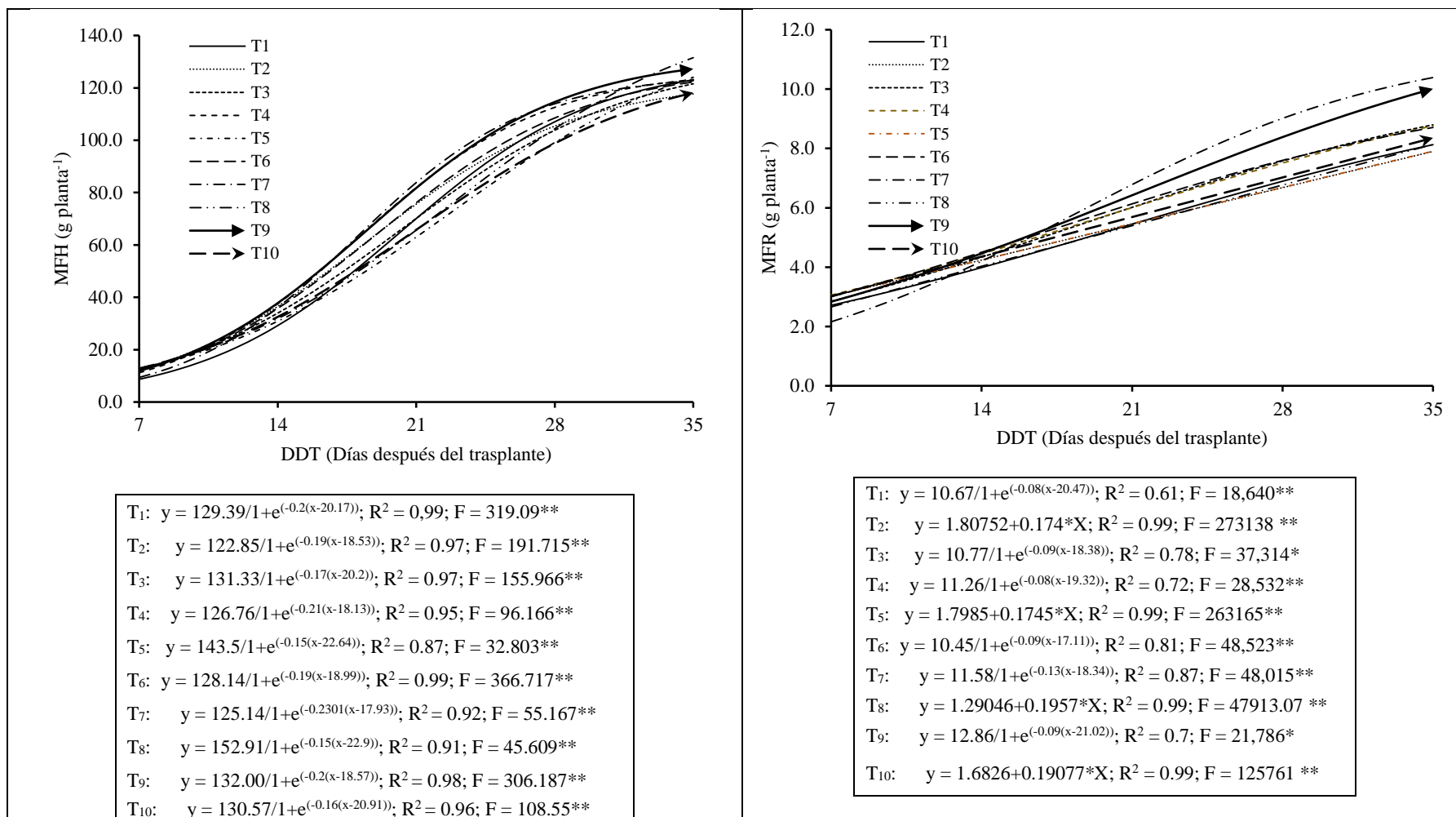


Figura 5: Acumulación de la materia fresca de hojas (MFH) y raíces (MFR) de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, de acuerdo a los tratamientos evaluados durante la época de invierno

4.5.2 Materia seca de hojas (MSH) y raíces (MSR)

La MSH muestra curvas similares a los verificados para la MFH. Desde el trasplante hubo un crecimiento lento hasta los 14 DDT para todos los tratamientos evaluados, seguidamente, se constató un incremento en la MSH hasta los 28 DDT, no habiendo diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 6). En ese período, se verificaron mayores tasas de acumulación de materia fresca cuyos valores fueron 0.38, 0.36, 0.39, 0.39, 0.38, 0.31, 0.38, 0.39, 0.36 y 0.40 g planta⁻¹ para el T₁, T₂, T₃, T₄, T₅, T₆, T₇, T₈, T₉ y T₁₀, respectivamente.

En la última etapa evaluada, se estabilizó la acumulación de MSH, obteniéndose valores de 7.89 (T₁), 7.68 (T₂), 8.13 (T₃), 8.12 (T₄), 8.37 (T₅), 7.05 (T₆), 8.22 (T₇), 8.10 (T₈), 8.07 (T₉) y 8.08 (T₁₀) g planta⁻¹ (Figura 7). Este comportamiento de acumulación de MSH, responde a lo encontrado por (Carini *et al.* 2020), quienes mencionan que los modelos de crecimiento Logístico y Gompertz, se ajustan bien a la acumulación de materia en la lechuga, ya que se constata los tres momentos bien definidos de la acumulación de materia seca.

Así como verificado para la MFR, las curvas de acumulación de la MSR_s tuvieron un comportamiento ascendente lineal, sin diferencias significativas entre los tratamientos. Al finalizar el experimento, los valores acumulados de MSR_s fueron de 0.40 (T₁), 0.44 (T₂), 0.45 (T₃), 0.51 (T₄), 0.37 (T₅), 0.44 (T₆), 0.6 (T₇), 0.45 (T₈), 0.51 (T₉) y 0.86 (T₁₀) g planta⁻¹ (Figura 6). Al igual que la MFR, el modelo que representa mejor la acumulación de MSR desde el trasplante hasta antes de la floración es el Polinómica Lineal.

Cabe resaltar que las variables materia fresca representa la parte comestible de la lechuga, es decir, la parte de mayor interés comercial. Por tanto, la evaluación de la masa fresca tiene mayor relevancia que la materia seca (Carini *et al.* 2020).

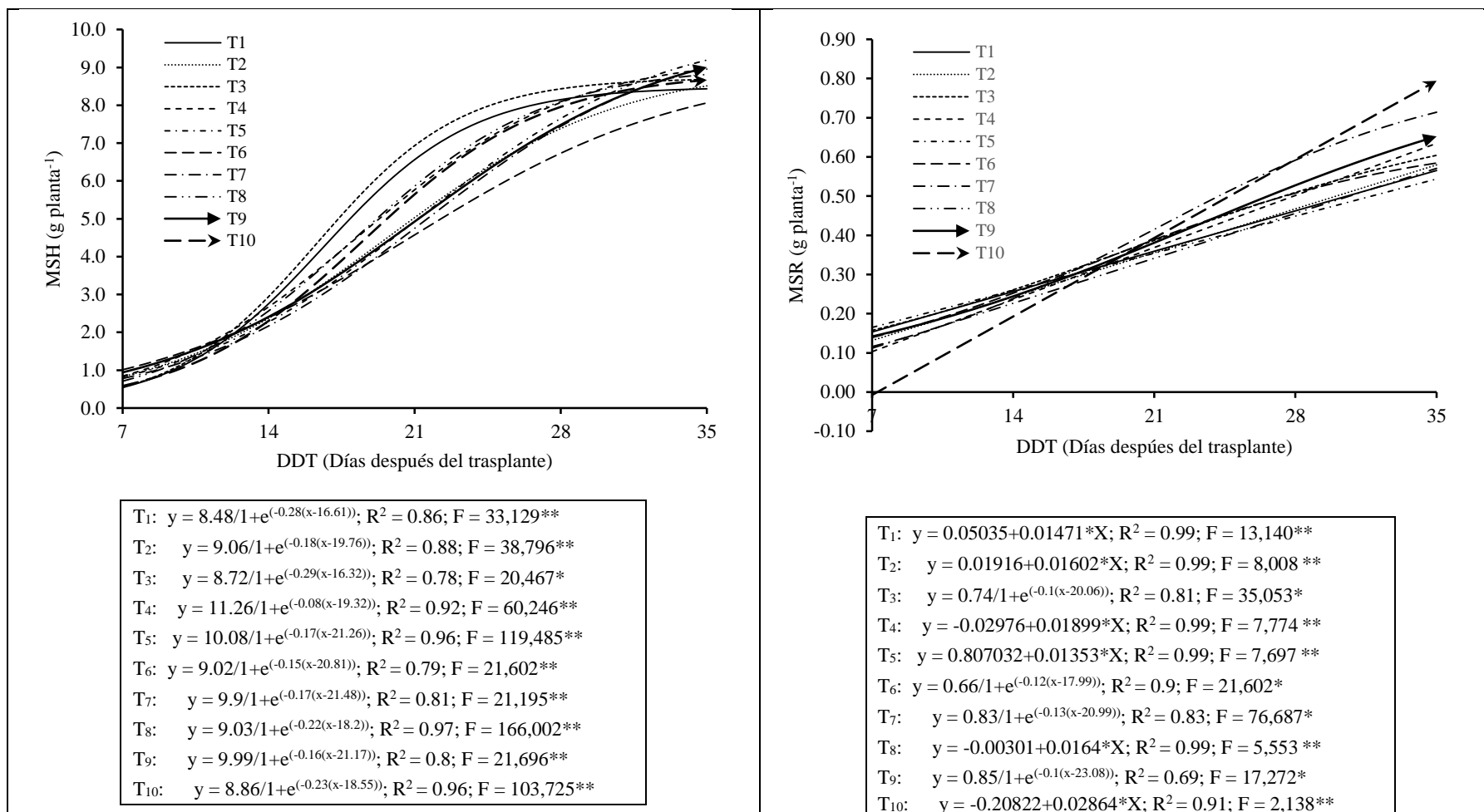


Figura 6: Acumulación de la materia seca de hojas y raíces de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, de acuerdo a los tratamientos evaluados durante la época de invierno

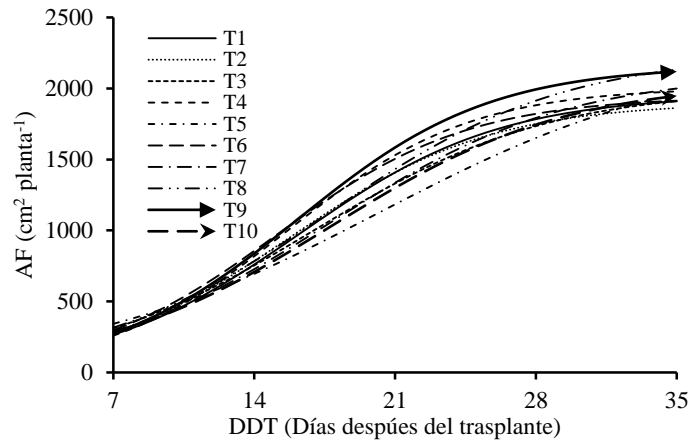
4.5.3 Área foliar (AF)

Inicialmente se constató menores valores de esta variable hasta los 14 DDT para todos los tratamientos evaluados, luego se observó un incremento significativo en el AF hasta los 28 DDT, no constatándose diferencias significativas entre los tratamientos. Dicho incremento, se ve reflejado en los valores de la tasa de acumulación de esta variable de 73.24, 69.04, 70.15, 76.1, 68.31, 68.98, 76.04, 80.84, 82.64 y 74.14 cm² planta⁻¹ para el T₁, T₂, T₃, T₄, T₅, T₆, T₇, T₈, T₉ y T₁₀, respectivamente (Figura 7).

A partir del día 28, se observa que el crecimiento del área foliar se mantiene estable, siendo el momento oportuno para la cosecha. Sin embargo, la planta de lechuga después de la madurez de cosecha se prepara para iniciar la etapa de floración (León-Pacheco *et al.* 2022). Hasta esta etapa la planta mostro valores de acumulación de 1646.13 (T₁), 1581.92 (T₂), 1601.83 (T₃), 1723.15 (T₄), 1620.31 (T₅), 1616.92 (T₆), 1708.39 (T₇), 1818.96 (T₈), 1845.93 (T₉) y 1664.72 (T₁₀) cm² planta⁻¹ (Figura 7).

Las condiciones de invierno, en el cual se desarrolló el experimento, con 16.4 °C de temperatura y 84 por ciento de humedad relativa en promedio, no influyeron sobre la aplicación de los tratamientos en la planta de lechuga, no habiendo diferencias significativas entre ellas. Así mismo, las condiciones de crecimiento descritos para el invierno no afectaron el normal desarrollo del área foliar, aunque la lechuga responde mejor bajo condiciones artificiales de luz LED (Borowski *et al.* 2015). En trabajo realizado por Sakamoto y Suzuki (2015), al evaluar plantas de lechuga con hojas de color rojo, sometidas a temperaturas de 10 y 20 °C en la zona radicular y en el ambiente, respectivamente, verificaron reducción del tamaño de los brotes en comparación con las plantas que fueron sometidas a mayores temperaturas.

Así también, cabe mencionar que la planta de lechuga alcanza valores máximos del AF entre los 60 y 120 días después de la siembra, formando el mayor número de hojas en el interior de su cogollo. Pasado esta etapa de sobre madurez, las hojas continúan expandiéndose hasta dar paso al tallo floral (CCB 2015). Esta etapa en el presente experimento se inició desde los 28 DDT, momento donde se observa que no hay un incremento del AF (Figura 7).



T1:	$y = 1956.1/1 + e^{(-0.2(x-16.27))}$; $R^2 = 0.89$; $F = 55,013^*$
T2:	$y = 1901.92/1 + e^{(-0.2(x-15.78))}$; $R^2 = 0.92$; $F = 77,810^*$
T3:	$y = 2001.54/1 + e^{(-0.17(x-16.97))}$; $R^2 = 0.96$; $F = 149,17^*$
T4:	$y = 2009.35/1 + e^{(-0.22(x-15.75))}$; $R^2 = 0.83$; $F = 35,074^*$
T5:	$y = 2249.82/1 + e^{(-0.13(x-20.2))}$; $R^2 = 0.88$; $F = 44,764^*$
T6:	$y = 1944.46/1 + e^{(-0.21(x-15.14))}$; $R^2 = 0.93$; $F = 94,214^*$
T7:	$y = 2106.48/1 + e^{(-0.17(x-17.76))}$; $R^2 = 0.92$; $F = 70,505^*$
T8:	$y = 2245.53/1 + e^{(-0.17(x-17.68))}$; $R^2 = 0.96$; $F = 136,650^*$
T9:	$y = 2161.12/1 + e^{(-0.21(x-16.18))}$; $R^2 = 0.92$; $F = 77,814^*$
T10:	$y = 2051.73/1 + e^{(-0.17(x-17.79))}$; $R^2 = 0.97$; $F = 198,798^*$

Figura 7: Dinámica del área foliar (AF) de la lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, de acuerdo a los tratamientos evaluados durante la época de invierno

4.6 ANÁLISIS DE CRECIMIENTO EN LA ÉPOCA DE VERANO

4.6.1 Materia fresca de hojas (MFH) y raíces (MFR)

En relación a la MFH, con excepción del T₁, todos los demás iniciaron con un ligero crecimiento hasta los 14 DDT, luego de esta etapa se observa incrementos significativos en la MFH hasta los 28 DDT, constatándose que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 8). Durante ese período se verificaron incrementos en la acumulación de materia fresca de 5.92, 5.67, 5.13, 4.46, 5.17, 4.95, 5.23, 4.69, 4.78 y 4.90 g para el T₁, T₂, T₃, T₄, T₅, T₆, T₇, T₈, T₉ y T₁₀, respectivamente.

Para el tratamiento T₁ se observa que la fase de crecimiento rápido se inicia desde los 14 hasta los 21 DDT, el cual supone el 75 por ciento del total acumulado. Esta ganancia rápida de MFH tuvo efectos en el rápido deterioro de la masa foliar a los 35 DDT, el cual perdió un 20 por ciento del máximo acumulado. En general se observa al final del ciclo de la lechuga, para todos los tratamientos evaluados, una estabilización en la acumulación

de MFH (Figura 8), obteniéndose valores de 128.07 (T₁), 124.53 (T₂), 121.88 (T₃), 103.71 (T₄), 122.79 (T₅), 116.05 (T₆), 115.56 (T₇), 111.13 (T₈), 109.17 (T₉) y 119.27 (T₁₀) g planta⁻¹.

De acuerdo a los valores alcanzados en la acumulación de MFH, el modelo que mejor representa la curva de acumulación de esta variable en condiciones de verano fue el modelo logístico. Similar tendencia de acumulación fue verificado por Li *et al.* (2022) donde identificaron en todo el período de crecimiento tres etapas: la etapa de crecimiento inicial que comienza del día 1 a 5.5 días; luego la etapa de crecimiento rápido de 5.6 a 26.2 días y finaliza con la etapa de senescencia a partir del día 26.3. Semejante dinámica también se observó para la curva de acumulación de la MFR, ajustándose igualmente el crecimiento al modelo logístico.

Por otro lado, en condiciones de verano, Uno *et al.* (2016) mencionan que el cultivo de lechuga cuando presenta altas tasas de crecimiento, está predispuesto al ‘tipburn’. Así mismo, afirman que los sistemas hidropónicos en cultivos protegidos, con frecuencia presentan la ocurrencia de este desorden ya que el aumento del metabolismo de las plantas con reflejos en aumentos de las tasas de crecimiento determina que deba mantenerse un constante flujo transpiratorio con movimiento de iones. Por tanto, cualquier restricción en el movimiento del agua y del Ca en la planta, serán causales para la manifestación del ‘tipburn’ (Yang *et al.* 2018; Lara-Izaguirre *et al.* 2019).

La MFR presenta una curva de crecimiento similar al verificado para la MFH. Desde el trasplante hasta los 14 DDT, se observa menores valores de MFR para todos los tratamientos evaluados, luego se constató un incremento significativo hasta los 28 DDT, en la cual no se observa diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 8). En ese período hubo incrementos en la tasa de acumulación de materia fresca de 0.84, 0.84, 0.73, 0.86, 0.80, 0.64, 0.82, 0.68, 0.64 y 0.70 g para el T₁, T₂, T₃, T₄, T₅, T₆, T₇, T₈, T₉ y T₁₀, respectivamente. Se puede verificar que no hay diferencias significativas entre las tasas de crecimiento.

En la fase final de evaluación se estabilizó la acumulación de MFR (Figura 8), obteniéndose valores de 19.36 (T₁), 19.41 (T₂), 17.32 (T₃), 19.40 (T₄), 18.49 (T₅), 15.98 (T₆), 18.96 (T₇), 16.83 (T₈), 15.61 (T₉) y 16.92 (T₁₀) g planta⁻¹.

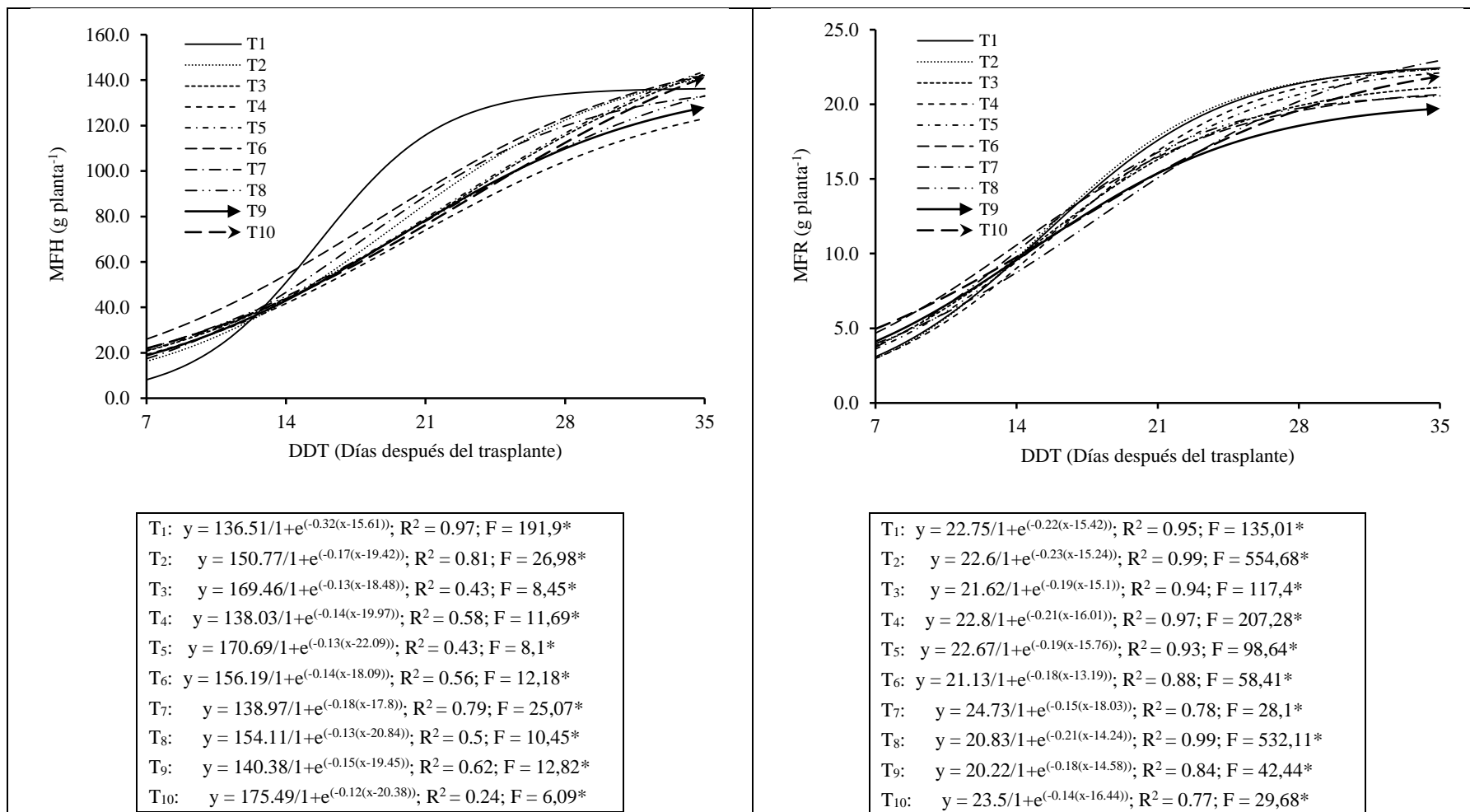


Figura 8: Acumulación de la materia fresca de hojas (MFH) y raíces (MFR) de la lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, de acuerdo a los tratamientos evaluados durante la época de verano

En contraste con el presente experimento, plantas de lechuga de hoja roja, sometida a 20 °C, en la zona radicular aumenta la biomasa de la lechuga cultivada aeropónicamente con respecto a las plantas en condiciones ambientales de 24 °C - 38 °C (Sakamoto y Suzuki 2015). En ese sentido, las condiciones del experimento fueron de 21.7 °C y 72.2 por ciento de humedad relativa en el ambiente.

4.6.2 Materia seca de hojas (MSH) y raíces (MSR)

Con relación a la MSH, todos los tratamientos iniciaron con un ligero crecimiento hasta los 14 DDT, después se constató incrementos significativos hasta los 28 DDT, en la cual no muestra diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 9). En dicho período de crecimiento rápido, los valores alcanzados en la tasa de acumulación de materia seca fueron 0.45, 0.76, 0.39, 0.43, 0.43, 0.46, 0.45, 0.44, 0.43 y 0.47 para el T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9 y T10, respectivamente. En la última etapa de evaluación, se estabilizó la acumulación de masa seca en las hojas, obteniéndose valores finales de 9.01 (T1), 8.08 (T2), 8.07 (T3), 8.65 (T4), 8.46 (T5), 9.21 (T6), 8.97 (T7), 8.82 (T8), 8.27 (T9) y 9.29 (T10) g planta⁻¹.

En contraste con la materia seca obtenida en el invierno; en el verano hubo mayor acumulación de materia seca, debido a las altas temperatura y la alta intensidad de luz incrementan la tasa fotosintética, aumentan el porcentaje de materia seca, los contenidos de ácido ascórbico (AsA) y carbohidratos en la cosecha, además prolonga la vida útil en anaquel del producto, debido a que mejora la energía y los antioxidantes (Min *et al.* 2021).

Referente al crecimiento, según Carini *et al.* (2020) refieren que en condiciones de verano, el modelo logístico presentó un ajuste satisfactorio para las masas fresca y seca de hojas en los cultivares de lechuga Crocantela, Elisa, Rubinela y Vera, siendo así, indicado para describir el crecimiento de los cultivares de lechuga. Resultados similares se encontró en el presente experimento, sin embargo, en contraste al invierno, la acumulación de MSR en el verano, el modelo de crecimiento no se ajusta a una polinómica lineal, tiende mejor ajuste al modelo logístico, aunque no muy pronunciado (Figura 9), este cambio de comportamiento de crecimiento se debe a la reducción de días de la etapas fenológicas de la lechuga, por efecto de las altas temperatura, acelerando la

emisión del tallo floral, y además siendo propenso al desencadenamiento de un desorden fisiológico, denominado Tip burn, por causas de un alta tasa de crecimiento debido a la alta temperatura ocasionando un desbalance nutricional, principalmente el Ca (Castañares 2022).

En ese sentido, cabe mencionar que las altas temperaturas y la alta irradiación propio del verano; son factores limitantes para la agricultura, especialmente en cultivos sensibles como la lechuga, ya que conducen a alteraciones morfofisiológicas que inducen pérdidas de rendimiento y deterioro de la calidad del cultivo, ya que las temperaturas óptimas para el crecimiento de la lechuga oscilan entre 18 y 28 °C, el estrés por altas temperaturas combinado con un día largo induce alteraciones en las relaciones hídricas, la actividad fotosintética, la acumulación de osmolitos y la producción de hormonas (Formisano *et al.* 2021).

Por otro lado, considerar que la lechuga es un cultivo de clima templado, con crecimiento y desarrollo óptimo con temperaturas entre 15,5 y 18,3 °C y con límites inferior y superior de 7,2 y 23,9 °C, respectivamente. Temperaturas superiores a 30 °C, durante la fase vegetativa, acelera los procesos fotosintéticos, reduce la cantidad de azúcares y favorece el desarrollo del tallo floral (Carini *et al.* 2020).

En la fase final del cultivo la acumulación de masa seca en la raíz, tomaron valores de 0.84 (T₁), 0.80 (T₂), 0.76 (T₃), 0.85 (T₄), 0.79 (T₅), 0.82 (T₆), 0.84 (T₇), 0.83 (T₈), 0.89 (T₉) y 0.90 (T₁₀) g planta⁻¹.

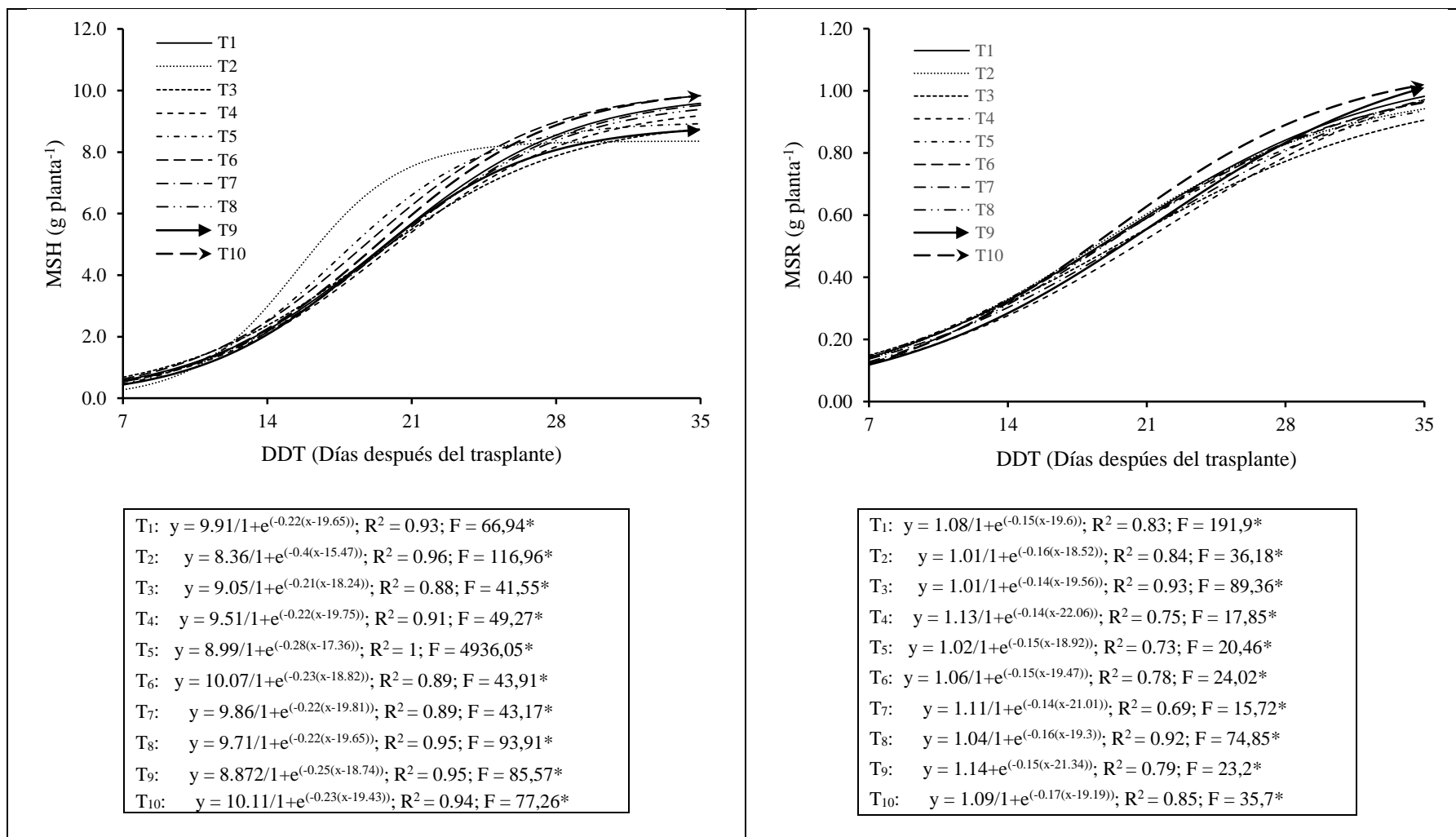


Figura 9: Acumulación de la materia seca de hojas y raíces de la lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, de acuerdo a los tratamientos evaluados durante la época de verano

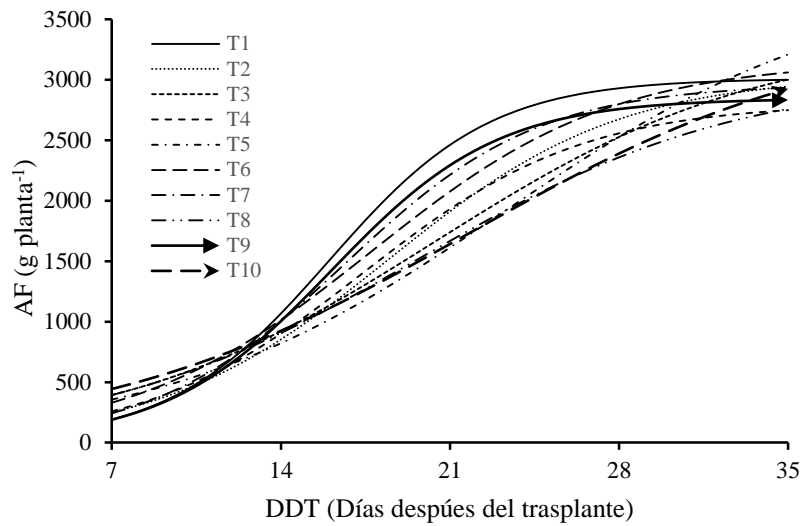
4.6.3 Área foliar (AF)

Así como fue constatado para MFH, MFR, MSH y MSR, hubo incrementos del AF desde el inicio de la evaluación hasta los 14 DDT en todos los tratamientos evaluados (Figura 14). Seguidamente, se constató un incremento acelerado del AF hasta los 21 DDT, no habiendo diferencias significativas entre los tratamientos; luego de esta etapa, la tendencia tiende a ser lineal no ascendente. La tasa de acumulación del AF durante la fase de crecimiento rápido fueron de 133.02, 130.12, 114.79, 118.30, 121.77, 127.37, 128.11, 103.66, 125.23 y 104.63 para el T₁, T₂, T₃, T₄, T₅, T₆, T₇, T₈, T₉ y T₁₀, respectivamente. Finalmente, al término del ciclo de la lechuga el crecimiento del área foliar acumula valores de, 2808.76 (T₁), 2694.57 (T₂), 2610.81 (T₃), 2490.22 (T₄), 2852.25 (T₅), 2729.78 (T₆), 2690.40 (T₇), 2364.67 (T₈), 2642.43 (T₉) y 2481.64 (T₁₀) cm² planta⁻¹.

El modelo de crecimiento del área foliar en la época de verano que presenta mayor ajuste, es el logístico, similar resultado obtuvo Djidonou & Leskobar (2019) en estaciones de primavera y verano, con diferente dosis de nitrógeno, el crecimiento de área foliar siguió patrones logísticos a lo largo del tiempo caracterizados por un aumento lento seguido de un aumento rápido hasta la madurez.

El estrés por altas temperaturas tiene efectos adversos en el crecimiento y la morfología de las plantas. En este estudio, el crecimiento y el peso seco de las plántulas de lechuga disminuyeron significativamente bajo estrés por altas temperaturas.

Por otro lado, el crecimiento del AF bajo condiciones de verano, también son afectados cuando superan el rango óptimo de temperatura, generando estrés en la planta, en ese sentido el oxígeno activo que se acumuló bajo estrés abiótico necesita ser eliminado por los sistemas de enzimas antioxidantes, incluidos los que comprenden el superóxido dismutasa, peroxidasa y catalasa, que trabajan juntos para eliminar las especies reactivas de oxígeno producidas bajo estrés por alta temperatura en las plantas, cabe resaltar que el superóxido dismutasa es la primera línea de defensa para eliminar las especies reactivas de oxígeno (Li *et al.* 2020).



T ₁ :	$y = 3008.2/1 + e^{(-0.3(x-16))}$; R ² = 0.95; F = 99,45*
T ₂ :	$y = 3036.321/1 + e^{(-0.21(x-18.48))}$; R ² = 0.94; F = 86,2*
T ₃ :	$y = 3341.59/1 + e^{(-0.15(x-20.46))}$; R ² = 77; F = 21,31*
T ₄ :	$y = 2805.93/1 + e^{(-0.22(x-17.4))}$; R ² = 1; F = 3717,4 ^{NS}
T ₅ :	$y = 3829.64/1 + e^{(-0.14(x-23.28))}$; R ² = 0.54; F = 9,31 ^{NS}
T ₆ :	$y = 3156.64/1 + e^{(-0.2(x-17.74))}$; R ² = 0.95; F = 102,26*
T ₇ :	$y = 2962.911/1 + e^{(-0.25(x-16.67))}$; R ² = 0.98; F = 216,21*
T ₈ :	$y = 3036.01/1 + e^{(-0.15(x-19.69))}$; R ² = 0.73; F = 20,37*
T ₉ :	$y = 2844.34/1 + e^{(-0.29(x-16.09))}$; R ² = 0.97; F = 170,86*
T ₁₀ :	$y = 3445.03/1 + e^{(-0.13(x-21.73))}$; R ² = 0.55; F = 10,81 ^{NS}

Figura 10: Dinámica del área foliar (AF) de la lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, de acuerdo a los tratamientos evaluados durante la época de invierno

V. CONCLUSIONES

1. Asperjar hierro quelado a dosis de 2, 4, y 6 mg l⁻¹ sobre plantas de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, no tienen efecto significativo sobre la materia fresca y seca de hojas y raíces, así como también sobre el área foliar.
2. Asperjar hierro quelado a 6 mg l⁻¹ sobre plantas de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, incrementa la concentración de Fe en las hojas de lechuga en ambas épocas de producción, pero con predominio en verano, alcanzando valores de 201.08, 229.02, 252.88, 266.39, 314.3 y 331.83 ppm en los tratamientos T₃, T₉, T₅, T₄ y T₇ respectivamente, los cuales están por encima del rango adecuado para el óptimo crecimiento de este cultivo.
3. La biofortificación agronómica del cultivo hidropónico de lechuga bajo las condiciones desarrolladas en el presente experimento, resulta un método eficiente e importante para aumentar los niveles de hierro en las hojas de lechuga.

VI. RECOMENDACIONES

1. Evaluar el efecto de asperjar hierro quelado en otras hortalizas de hoja como el culantro, albahaca, los cuales también tiene alta demanda.
2. Evaluar el efecto de asperjar otros elementos deficientes y esenciales para la dieta humana.
3. Investigar la biofortificación orientado a mejorar la composición nutricional del forraje como el maíz, camote, ya que la ganadería también es un sector de importancia económica en muchos lugares productivos.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aires, ES; Aragão, CA; Gomes, ILS; De Souza, GN; De Andrade, IGV; De Oliveira, ABN; Bezerra, WC; Yuri, JE. 2020. Growth and production of crisphead lettuce cultivars in protected cultivation and high temperatures. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* 15(1). DOI: <https://doi.org/10.5039/AGRARIA.V15I1A6288>.

Al-Khazraje, SNF; Al-Hamadani, FMA. 2019. Effect of nitrogen levels and foliar application with iron and zinc on growth and yield of the (*Lactuca sativa* L.). 9(2):92-106.

Alcaraz López, GM; Bernal Parra, C; Aristizábal Gil, MA; Ruiz Villa, MB; Fox Quintana, JE. 2006. Anemia y anemia por déficit de hierro en niños menores de cinco años y su relación con el consumo de hierro en la alimentación. Turbo, Antioquia, Colombia. *Investigación y Educación en Enfermería* 24(2):16-29.

Alva, B; Cabezas Medina, L; Lopez Huaytalla, S; Patilongo Alarcon, I. 2020. El problema de la anemia: un análisis econométrico para Perú (en línea). Universidad de Lima :1-18. Disponible en <https://repositorio.ulima.edu.pe/handle/20.500.12724/11990>.

Arredondo, M; Martínez, R; Núñez, MT; Ruz, M; Olivares, M. 2006. Inhibition of iron and copper uptake by iron, copper and zinc. *Biological Research* 39(1):95-102. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0716-97602006000100011>.

Barrientos, H; del Castillo, C; García, M. 2015. Análisis De Crecimiento Funcional , Acumulación De Biomasa Y Translocación De Materia Seca De Ocho Hortalizas Cultivadas En Invernadero (en línea). *Revista de Investigación e Innovación Agropecuario y de Recursos Naturales* 2(1):7-118. Disponible en http://www.scielo.org.bo/pdf/riiarn/v2n1/v2n1_a10.pdf.

Beltrán-Morales, FA; Nieto-Garibay, A; Murillo-Chollet, JSA; Ruiz-Espinoza, FH; Troyo-Diequez, E; Alcalá-Jauregui, JA; Murillo-Amador, B. 2019. Inorganic nitrogen,

phosphorus and potassium content of natural fertilizers for use in organic agriculture. *Terra Latinoamericana* 37(4):371-378. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v37i4.520>.

Benavides, MA. 2000. Absorción y asimilación de hierro en las plantas (en línea). *Ciencia UANL* (54):1-13. Disponible en http://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/hierro_en_plantas.pdf.

Binaghi, MJ; Cagnasso, CE; Pellegrino, NR; Drago, SR; González, R; Ronayne, PA; Valencia, ME. 2011. Disponibilidad potencial in vitro de hierro y zinc en una dieta infantil con pan fortificado con distintas fuentes de hierro o con agregado de promotores de la absorción. *Archivos Latinoamericanos de Nutricion* 61(3):316-322.

BOE, DO de la UE. 2011. REGLAMENTO (UE) No 1258/2011 DE LA COMISIÓN DOI: <https://doi.org/https://www.boe.es/doue/2011/320/L00015-00017.pdf>.

Borowski, E; Michałek, S; Rubinowska, K; Hawrylak-Nowak, B; Grudziński, W. 2015. The effects of light quality on photosynthetic parameters and yield of lettuce plants | Wpływ jakości światła na parametry fotosyntetyczne liści sałaty i ich plon. *Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus* 14(5).

Briat, JF; Duc, C; Ravet, K; Gaymard, F. 2010. Ferritins and iron storage in plants (en línea). *Biochimica et Biophysica Acta - General Subjects* 1800(8):806-814. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2009.12.003>.

Broadley, MR; White, PJ; Bryson, RJ; Meacham, MC; Bowen, HC; Johnson, SE; Hawkesford, MJ; McGrath, SP; Zhao, F-J; Breward, N; Harriman, M; Tucker, M. 2006. Biofortification of UK food crops with selenium. *Proceedings of the Nutrition Society* 65(2):169-181. DOI: <https://doi.org/10.1079/pns2006490>.

Buturi, CV; Sabatino, L; Mauro, RP; Navarro-León, E; Blasco, B; Leonardi, C; Giuffrida, F. 2022. Iron Biofortification of Greenhouse Soilless Lettuce: An Effective Agronomic Tool to Improve the Dietary Mineral Intake. *Agronomy* 12(8):1-16. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12081793>.

Camara de Comercio Bogotá, C. 2015. Manual: Lechuga. s.l., s.e. 54 p.

Carini, F; Filho, AC; Pezzini, RV; de Souza, JM; Chaves, GG; Provedi, A. 2020.

Nonlinear models for describing lettuce growth in autumn-winter. *Ciencia Rural* 50(7):1-12. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190534>.

Carini, F; Filho, AC; Ubessi, C. 2020. Fitting a logistic growth model to yield traits in lettuce cultivars growing in summer Ajuste del modelo logístico para caracteres productivos de cultivares de lechuga en condiciones de verano. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 14(1):104-114.

Castañares, JL. 2022. Tipburn en hortalizas de hoja en hidroponia : posibles causas y control. *Revista de Investigacion Agropecuaria* 2:3-9.

Ccahua, ZA; Chaves Huerta, A; Bautista Perez, CA; Chacon Zuñiga, JJ; Guillen Fuentes, KH. 2020. Estudio de prefactibilidad de un proyecto de producción de lechuga Iceberg, Espinaca baby y tomate cherry hidropónicos. s.l., SAN IGNASIO DE LOYOLA. 262 p.

Chatterjee, R; Chowdhury, RS; Dukpa, P; Thirumdasu, RK. 2016. Iron Fortification in Leafy Vegetables: Present Status and Future Possibilities. *Innovare Journal of Agricultural Sciences* 4(4):1-3.

Diaz, A; Espinosa, M; Ortiz, F. 2018. Corrección de la clorosis férrica con quelato EDDHA en cultivos sembrados en suelo alcalino y calcáreo. *Revista Terra Latinoamericana* 36(1):23-30.

Djidonou, D; Leskovar, DI. 2019. Seasonal changes in growth, nitrogen nutrition, and yield of hydroponic lettuce [Cambios estacionales en el crecimiento, la nutrición de nitrógeno y el rendimiento de la lechuga hidropónica]. *HortScience* 54(1):76-85. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13567-18>.

FAO. 2021. La seguridad alimentaria y nutrición en el mundo. s.l., s.e. 1-240 p.

Formisano, L; Ciriello, M; Cirillo, V; Pannico, A; El-Nakhel, C; Cristofano, F; Duri, LG; Giordano, M; Rouphael, Y; De Pascale, S. 2021. Divergent leaf morpho-physiological and anatomical adaptations of four lettuce cultivars in response to different greenhouse irradiance levels in early summer season. *Plants* 10(6):1-18. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10061179>.

Forrellat, BM. 2016. Iron metabolism regulation: Two systems, one goal. *Revista Cubana*

de Hematología, Inmunología y Hemoterapia 32(1):4-14.

Gaitán, D; Olivares G., M; Arredondo O., M; Pizarro A., F. 2006. Biodisponibilidad de Hierro en humanos (en línea). Scielo v.32 n.2:142-148. Disponible en <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182006000200003>.

Ghasemi, FR; Ronaghi, A. 2015. The influence of iron chelate and zinc sulfate on the growth and nutrient composition of chickpea grown on a calcareous soil. 34:35-40.

Giordano, M; El-Nakhel, C; Pannico, A; Kyriacou, MC; Stazi, SR; De Pascale, S; Roupheal, Y. 2019. Iron biofortification of red and green pigmented lettuce in closed soilless cultivation impacts crop performance and modulates mineral and bioactive composition. *Agronomy* 9(6). DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy9060290>.

Institute of Medicine. 2002. Dietary reference intakes for vitamin A, vitamin K, arsenic, boron, chromium, copper, iodine, iron, manganese, molybdenum, nickel, silicon, vanadium, and zinc : a report of the Panel on Micronutrients ... [et al.], Standing Committee on the Scientific Evaluation of Dietary Reference Intakes. s.l., s.e. DOI: <https://doi.org/10.17226/10026>.

Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI]. (2012). Peru: Consumo percapita de los principales alimentos (2008-2009) Encuesta Nacional de Presupuesto Familiares (ENAPREF). Lima, s.e. DOI: https://doi.org/https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1028/.

Kenaway, MK. 2019. Effect of Iron and Zinc Foliar Application and Plant Spacing on Productivity of Oil Lettuce (*Lactuca scariola* var. *Oleifra*) in Calcareous Soils الرش تأثير الجيرية بالأراضي الزيت خس انتاجية على الزراعة ومسافات والزنك بالحديد الورقي. *Journal of Plant Production* 10(8):731-737. DOI: <https://doi.org/10.21608/jpp.2019.58167>.

Khan, S; Akhtar, N; Ur Rehman, S; Shujah, S; Rha, ES; Jamil, M. 2021. Biosynthesized iron oxide nanoparticles (Fe₃O₄ nps) mitigate arsenic toxicity in rice seedlings. *Toxics* 9(1):1-11. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics9010002>.

Knott, JE. 2007. Handbook For Vegetable Growers. s.l., s.e., vol.83. 333 p. DOI: <https://doi.org/10.1097/00010694-195704000-00017>.

Křístková, E; Doležalová, I; Lebeda, A; Vinter, V; Novotná, A. 2008. Description of morphological characters of lettuce (*Lactuca sativa* L.) genetic resources. *Horticultural Science* 35(3):113-129. DOI: <https://doi.org/10.17221/4/2008-hortsci>.

Kuronuma, T; Ando, M; Watanabe, H. 2020. Tipburn incidence and Ca acquisition and distribution in *lisianthus* (*Eustoma grandiflorum* (Raf.) Shinn.) cultivars under different Ca concentrations in nutrient solution. *Agronomy* 10(2). DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10020216>.

Lal, K; Kumari, S; Raj, M; Suvidha, K. 2020. International Web-Conference Biofortification: A sustainable way for checking malnutrition to Iron and Zinc. *Journal of pharmacognosy and phytochemistry* (SP6):380-386.

Lara-Izaguirre, AY; Rojas-Velázquez, AN; Romero-Méndez, MJ; Ramírez-Tobías, HM; Cruz-Crespo, E; Alcalá-Jáuregui, JA; Loredó-Ostí, C. 2019. Crecimiento Y Acumulación De NO_3^- - En Lechuga Hidropónica Con Relaciones Nitrato/Amonio En Dos Estaciones De Cultivo Tt - Growth and NO_3^- - Accumulation in Hydroponic Lettuce With Nitrate/Ammonium Ratios in Two Cultivation Seasons (en línea). *Revista fitotecnia mexicana* 42(1):21-29. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802019000100021&lang=pt%0Ahttp://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v42n1/0187-7380-rfm-42-01-21.pdf.

León-Pacheco, RI; Jaramillo-Noreña, JE; Montes-Pérez, ML; Orozco-Guerrero, AR; Carrascal-Pérez, FF; Villagran Munar, EA; Rodríguez-Roa, AO. 2022. Evaluación agronómica y fisiológica de cinco cultivares de lechuga bajo dos sistemas de agricultura protegida en el departamento de Magdalena. *Avances en Investigación Agropecuaria* 26:79-93. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.53897/RevAIA.22.26.06>.

Li, C; Han, Y; Hao, J; Qin, X; Liu, C; Fan, S. 2020. Effects of exogenous spermidine on antioxidants and glyoxalase system of lettuce seedlings under high temperature (en línea). *Plant Signaling and Behavior* 15(12). DOI: <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1824697>.

Li, Q; Gao, H; Zhang, X; Ni, J; Mao, H. 2022. Describing Lettuce Growth Using Morphological Features Combined with Nonlinear Models. *Agronomy* 12(4), 860:1-10.

DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agronomy12040860>.

Liu, CW; Sung, Y; Chen, BC; Lai, HY. 2014. Effects of nitrogen fertilizers on the growth and nitrate content of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *International Journal of Environmental Research and Public Health* 11(4):4427-4440. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph110404427>.

Lucena, JJ. 2009. El empleo de complejantes y quelatos en la fertilización de micronutrientes. *Ceres* 56(4):527-535.

Mahender, A; Swamy, BPM; Anandan, A; Ali, J. 2019. Tolerance of Iron-Deficient and -toxic soil conditions in Rice. *Plants* 8(2). DOI: <https://doi.org/10.3390/plants8020031>.

Martins, V; Pinto, ACV; Mello, AC; Toebe, M; de Souza, RR; Paraginski, JA; Somavilla, JC. 2021. Nonlinear models in the height description of the Rhino sunflower cultivar. *Ciencia Rural* 52(3). DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210213>.

Mattson, N. 2016. Iron Deficiency of Hydro - ponic Leafy Greens and Herbs. *e-Gro Edible Albert* 1(8):1-5.

Medina-Lozano, I; Bertolín, JR; Díaz, A. 2021. Nutritional value of commercial and traditional lettuce (*Lactuca sativa* L.) and wild relatives: Vitamin C and anthocyanin content. *Food Chemistry* 359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129864>.

Mendoza Rodríguez, MA. 2017. Cultivo de Lechuga (*Lactuca sativa* L.) Hidroponía en sistema recirculante «NFT» Tipo Piramidal con tres niveles de aireación. s.l., Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. 137 p. DOI: <https://doi.org/http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/6359>.

Min, Q; Marcelis, LFM; Nicole, CCS; Woltering, EJ. 2021. High Light Intensity Applied Shortly Before Harvest Improves Lettuce Nutritional Quality and Extends the Shelf Life. *Frontiers in Plant Science* 12(January). DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.615355>.

Miret, S; Simpson, RJ; Mckie, AT. 2003. Physiology and Molecular Biology of Dietary Iron Absorption. *Annual Review of Nutrition* Vol. 23:28:283-301. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev.nutr.23.011702.073139>.

Monserrate, RFA; Pachón, H; Hyman, GG; Vesga Varela, AL. 2009. Metodología para

seleccionar zonas de intervención con cultivos biofortificados. *Revista Panamericana de Salud Pública* 26(5):419-428. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1020-49892009001100006>.

Müller, J. 2017. ¿Dumas o Kjeldahl para el análisis de referencia ? (en línea). *Analytics Beyond Measure, FOSS* (June):1-5. Disponible en https://www.fossanalytics.com/-/media/files/documents/papers/laboratories-segment/the-dumas-method-for-nitrogenprotein-analysis_es.pdf.

Murillo Castillo, RG; Piedra Marín, G; León, RG. 2013. Absorción de nutrientes a través de la hoja. *Uniciencia* 27(1):232-244.

Ortega-Maldonado, JM; Ojeda-Barrios, DL; Élez, T; Odríguez, ADHE; Esús, TEDEJ; Nchondo, RUIZ; Acqueline, YDAJ. 2014. Aspectos relevantes sobre la bioquímica y la fisiología del hierro en plantas. *VIII(614):30-38*.

Pachón, H. 2010. El Impacto Nutricional de Cultivos Biofortificados o Cultivos con Mayor Calidad Nutricional (en línea). *AgroSalud* :1-12. Disponible en www.AgroSalud.org.

Perea, E; Ojeda, D; Hernández, A; Ruiz, T; Martínez, J. 2010. Utilización de quelatos en la agricultura. .

Prasad, BVG; Mohanta, S; Rahaman, S; Bareily, P. 2018. Bio-fortification in Horticultural Crops. (October).

Prasad, R; Shivay, YS. 2020. Agronomic biofortification of plant foods with minerals, vitamins and metabolites with chemical fertilizers and liming (en línea). *Journal of Plant Nutrition* 43(10):1534-1554. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1738464>.

Preciado-Rangel, P; Valenzuela-García, AA; Pérez-García, LA; González-Salas, U; Ortiz-Díaz, SA; Buendía-García, A; Rueda-Puente, EO. 2022. La biofortificación foliar con hierro mejora la calidad nutracéutica y la capacidad antioxidante en lechuga. *Revista Terra Latinoamericana* 40:1-7. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1060>.

Ramos-Padilla, P; Villanueva, M; Vílchez, C; Cárdenas, H. 2020. Valores de Hemoglobina y estado nutricional antropométrico: ecuación de predicción de estatura para niños ecuatorianos menores de 5 años (en línea). *Nutrición Clínica y Dietética*

Hospitalaria 40(3):132-138. DOI: <https://doi.org/10.12873/403ramos>.

Reyes, GM; Gomez-Sanchez, PI; Espinoza, BC. 2017. Tablas de composición de alimentos de Perú (en línea). Ministerio de Salud (ed.). Lima, s.e. 146 p. Disponible en <https://repositorio.ins.gob.pe/xmlui/bitstream/handle/INS/1034/tablas-peruanas-QR.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.

Rodriguez, MW; Leihner, D. 2006. Análisis del crecimiento vegetal. 1.a ed. 20. Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 56 p.

Römheld, V; Nikolic, M. 2021. Handbook of Plant Nutrition. s.l., s.e., vol.96. 251-310 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2021.01.003>.

Saavedra, DRG; Corradini S., F; Antúnez B., A; Felmer E., S; Esta P., P; Sepulveda R., P. 2017. Manual de producción de Lechuga. 1ra. Santiago, s.e. 153 p.

Sago, Y. 2016. Effects of light intensity and growth rate on tipburn development and leaf calcium concentration in butterhead lettuce. HortScience 51(9):1087-1091. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI10668-16>.

Sakamoto, M; Suzuki, T. 2015. Effect of Root-Zone Temperature on Growth and Quality of Hydroponically Grown Red Leaf Lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Red Wave). American Journal of Plant Sciences 06(14):2350-2360. DOI: <https://doi.org/10.4236/ajps.2015.614238>.

Samborska-Skutnik, IA; Kalaji, HM; Sieczko, L; Bąba, W. 2020. Structural and functional response of photosynthetic apparatus of radish plants to iron deficiency (en línea). Photosynthetica 58(Special Issue):205-213. DOI: <https://doi.org/10.32615/ps.2019.132>.

Shatilov, M V.; Razin, AF; Ivanova, MI. 2019. Analysis of the world lettuce market. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 395(1). DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/395/1/012053>.

Sosa, A; Ruiz Ibarra, G; Padilla Cuevas, J; D Etchevers Barra, J; Castellanos Ramos, JZ; Robles de la Torre, RR. 2017. Curva de acumulación de nitrógeno, fósforo y potasio en lechuga (*Lactuca sativa* L.) cv. Coolward. (en línea). ResearchGate (March):125-127.

Disponible en
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsbas&AN=edsbas.A3DAFFC6&site=eds-live>.

Soto, B; Encarnación, E; Herrejón, R; Barrera, DM; Elena, L; Reyes Ponce, Y; Valverde, JP; Zamora, PE; Valverde, JP. 2010. Factores de competitividad del cultivo de lechuga en Santa María Jajalpa, Estado de México (en línea). *Análisis Económico XXV(59):143-154*. Disponible en
[http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/2504/1/36370.pdf%0Ahttp://www.jstor.org/stable/2807995?origin=crossref%0Ahttp://www.chathamhouse.org/sites/files/chathamhouse/public/Research/Energy, Environment and Development/bp0312_pres](http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/2504/1/36370.pdf%0Ahttp://www.jstor.org/stable/2807995?origin=crossref%0Ahttp://www.chathamhouse.org/sites/files/chathamhouse/public/Research/Energy,EnvironmentandDevelopment/bp0312_pres).

Sublett, WL; Barickman, TC; Sams, CE. 2018. Effects of Elevated Temperature and Potassium on Biomass and Quality of Dark Red ‘ Lollo Rosso ’ Lettuce. *Horticulturae* 4,11. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae4020011>.

Sularz, O; Smoleń, S; Koronowicz, A; Kowalska, I; Leszczyńska, T. 2020. Chemical composition of lettuce (*Lactuca sativa* L.) biofortified with iodine by KIO₃, 5-Iodo-, and 3,5-diiodosalicylic acid in a hydroponic cultivation. *Agronomy* 10(7):1-17. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10071022>.

Thompson, HC; Langhans, RW; Arend -Jan, B; Albright, LD. 1998. Shoot and root temperature effects on lettuce growth in a floating hydroponic system [Efectos de la temperatura de los brotes y las raíces en el crecimiento de la lechuga en un sistema hidropónico flotante]. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 123(3):361-364. DOI: <https://doi.org/10.21273/jashs.123.3.361>.

Trinidad, TP; Kurilich, AC; Mallillin, AC; Walczyk, T; Sagum, RS; Singg, NN; Harjani, Y; De Leon, MP; Capanzana, M V.; Fletcher, J. 2014. Iron absorption from NaFeEDTA-fortified oat beverages with or without added vitamin C. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*. 65, 2014(1):124-128. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.3109/09637486.2013.836739>.

Uno, Y; Okubo, H; Itoh, H; Koyama, R. 2016. Reduction of leaf lettuce tipburn using an indicator cultivar (en línea). *Scientia Horticulturae* 210:14-18. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.07.001>.

Voogt, W. 2002. Potassium Management of Vegetables Under. Frontier Research Topic: Soilless Cultivation through an Intensive Crop Production Scheme. Management Strategies, Challenges and Future Directions (potassium for sustainable crop production):347-362.

White, PJ; Broadley, MR. 2009. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets - Iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytologist* 182(1):49-84. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02738.x>.

Wojciechowska, E; Golcz, A; Kozik, E; Mieloszyk, E. 2019. Effect of differentiated iron nutrition on the content of macronutrients in leaves of lettuce (*Lactuca sativa* l. var. capitata l.) cultivated in peat substrate. *Journal of Elementology* 24(1):293-304. DOI: <https://doi.org/10.5601/jelem.2018.23.1.1623>.

Yang, Q; Lu, N; Wang, L; Huang, XQ; Yang, DQ; Sun, J. 2018. Exogenous spermidine promoted Ca²⁺ absorption in lettuce roots and reduced the incidence of tipburn. *Horticultural Science and Technology* 36(5):702-712. DOI: <https://doi.org/10.12972/KJHST.20180070>.

Zhou, J; Li, P; Wang, J. 2022. Effects of Light Intensity and Temperature on the Photosynthesis Characteristics and Yield of Lettuce. *Horticultrae* 8(2):1-11. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticultrae8020178>.

Zhou, J; Li, P; Wang, J; Fu, W. 2019. Growth , Photosynthesis , and Nutrient Uptake at Different Light Intensities and Temperatures in Lettuce. *HortScience* 54(11):1925-1933. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14161-19>.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Tabla peruana de composición en 100 g de alimentos de tres tipos de lechugas

Contenido nutricional	Unidad	Lechuga Americana	Lechuga larga	Lechuga redonda
Energía	kcal	7	12	8
Energía	kJ	28	49	32
Agua	g	96.6	93.4	95.7
Proteínas	g	0.6	1.5	1.3
Grasa total	g	0.1	0.2	0.1
Carbohidratos totales	g	2.4	3.9	2.1
Carbohidratos disponibles	g	1.2	1.8	0.8
Fibra dietaria	g	1.2	2.1	1.4
Cenizas	g	0.3	1.0	0.7
Calcio	mg	52	64	47
Fósforo	mg	20	63	49
Zinc	mg	0.15	0.23	0.18
Hierro	mg	0.1	1.6	1
Vitamina A equivalentes	µg	25	290	370
Tiamina	mg	0.02	0.06	0.06
Riboflavina	mg	0.06	0.08	0.05
Niacina	mg	0.13	0.52	0.48
Vitamina C	mg	1.5	14.5	7.4
Ácido fólico	µg	0	0	0
Sodio	mg	0	0	0
Potasio	mg	0	0	0

Fuente: (Tabla peruana de composición de alimentos 2021).

Anexo 2: Distribución aleatorizada de los tratamientos según el diseño experimental propuesto (R: repeticiones; T: tratamientos)

R ₁	T ₉	T ₆	T ₅	T ₁₀	T ₃	T ₇	T ₄	T ₁	T ₈	T ₂
R ₂	T ₂	T ₃	T ₁₀	T ₆	T ₉	T ₁	T ₈	T ₅	T ₇	T ₄
R ₃	T ₁	T ₅	T ₂	T ₈	T ₇	T ₆	T ₄	T ₃	T ₁₀	T ₉
R ₄	T ₇	T ₆	T ₃	T ₈	T ₄	T ₅	T ₂	T ₉	T ₁	T ₁₀
R ₅	T ₂	T ₅	T ₈	T ₇	T ₉	T ₃	T ₁₀	T ₄	T ₆	T ₁

Donde:

- Factores evaluados:

- Dosis de Fe ($D_1 = 2 \text{ mg l}^{-1}$, $D_2 = 4 \text{ mg l}^{-1}$ y $D_3 = 6 \text{ mg l}^{-1}$)
- Momentos de aplicación ($M_1 = 100$ por ciento a los 10 días después del trasplante-DDT; $M_2 = 100$ por ciento a los 20 DDT; $M_3 = 50$ por ciento a los 10 y 20 DDT)

- Tratamientos:

- $T_1 = D_1M_1$; $T_2 = D_1M_2$; $T_3 = D_1M_3$; $T_4 = D_2M_1$, $T_5 = D_2M_2$; $T_6 = D_2M_3$; $T_7 = D_3M_1$; $T_8 = D_3M_2$; $T_9 = D_3M_3$, junto con el tratamiento testigo (T_{10}).

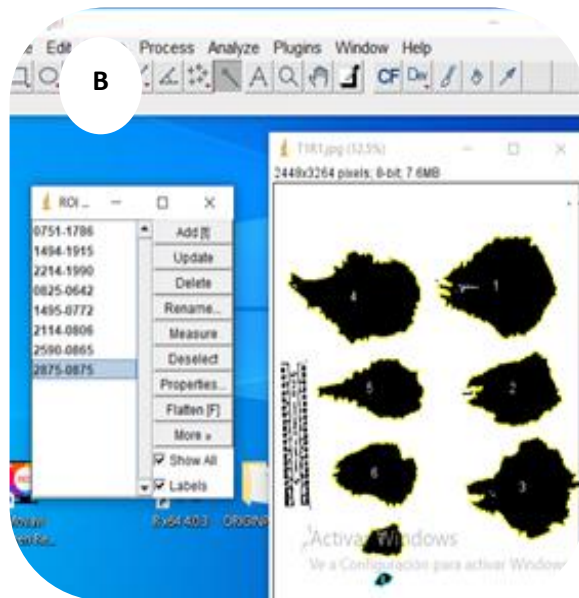
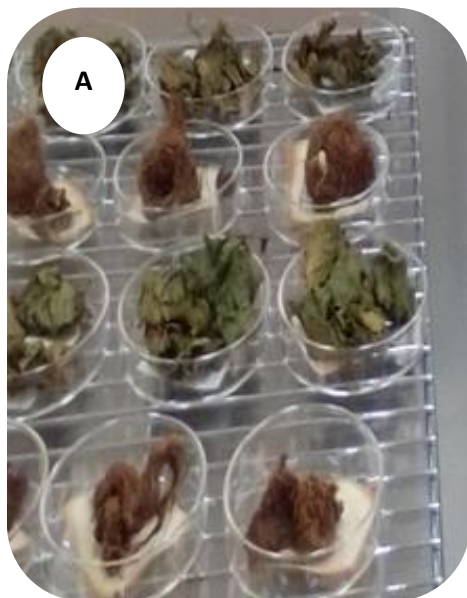
Anexo 3: Análisis de elementos en el agua utilizada para la preparación de la solución nutritiva para el presente estudio

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDAD	MÉTODO	TÉCNICA
pH a 20.6 °C	8.03		EPA 150.1	Electrométrico
Conductividad Eléctrica a 25 °C.	0.81	mS / cm	EPA 120.1	Electrométrico
Calcio (Ca)	4.45	mEq / L	EPA 215.1	FAAS
Magnesio (Mg)	1.37	mEq / L	EPA 242.1	FAAS
Sodio (Na)	3.78	mEq / L	EPA 273.1	FAAS
Potasio (K)	0.02	mEq / L	EPA 258.1	FAAS
Amonio (NH ₄ ⁺)	< 0.01	mEq / L	UNE 77028:1983	Volumétrico
Cloruro (Cl ⁻)	0.93	mEq / L	SM 4500 Cl- B	Argentométrico
Sulfato (SO ₄ ⁻²)	4.03	mEq / L	EPA 375.4	Turbidimétrico
Nitrato (NO ₃ ⁻)	0.65	mEq / L	MEA - 001	Colorimétrico
Carbonato (CO ₃ ⁻²)	< 0.02	mEq / L	SM 2320 B	Volumétrico
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻¹)	3.76	mEq / L	SM 2320 B	Volumétrico
Fósforo (H ₂ PO ₄ ⁻³)	< 0.01	mEq / L	SM 4500-P B,E	Colorimétrico
Cobre (Cu)	< 0.01	ppm	EPA 220.1	FAAS
Zinc (Zn)	0.01	ppm	EPA 289.1	FAAS
Manganeso (Mn)	0.09	ppm	EPA 243.1	FAAS
Hierro (Fe)	0.06	ppm	EPA 236.1	FAAS
Boro (B)	0.02	ppm	ISO 9390 : 1990	Colorimétrico
R. A. S.	2.22		MEA - 002	Cálculo Matemático

Anexo 4: Determinación de la masa de la materia fresca de hojas y raíces en el laboratorio de la Universidad Nacional de Cañete (A). Muestras secadas en estufa para la determinación de la masa de la materia seca de hojas y raíces (B)



Anexo 5: Masa seca de hojas y raíces de muestras de lechugas (A). Determinación del área foliar mediante el *Software* IMAGEN J (B)



Anexo 6: Resultados de la evaluación del extracto celular del peciolo en hojas de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, en la época de invierno

T	R	NO ₃ ⁻	K ⁺	Ca ⁺⁺
		-----ppm-----		
T1	1	970	1400	99
T1	2	2600	1900	130
T1	3	2500	1600	120
T1	4	1700	2100	100
T1	5	1500	1500	78
T2	1	1100	1400	110
T2	2	2000	1500	100
T2	3	2000	1900	94
T2	4	2200	2100	120
T2	5	1500	1600	81
T3	1	1900	1500	120
T3	2	2600	2000	130
T3	3	2900	1800	82
T3	4	1400	1400	95
T3	5	1900	1600	84
T4	1	1600	1800	85
T4	2	2200	1700	110
T4	3	2500	1800	86
T4	4	1400	1400	87
T4	5	2200	1600	81
T5	1	1600	1600	110
T5	2	2600	1900	110
T5	3	2800	1900	87
T5	4	1600	1600	89
T5	5	1800	1400	88
T6	1	1500	1500	100
T6	2	2100	1500	83
T6	3	2700	2100	100
T6	4	1500	1500	91
T6	5	2100	1500	65
T7	1	1800	1400	120
T7	2	2300	1600	93
T7	3	2400	1600	95
T7	4	1200	1200	110
T7	5	2000	1200	89
T8	1	1500	1400	120
T8	2	2200	1600	90
T8	3	2500	2000	97
T8	4	1600	1600	86
T8	5	2300	1400	90
T9	1	1600	1500	89
T9	2	2600	1600	96
T9	3	3700	2300	85
T9	4	1700	1700	66
T9	5	1700	1500	72
T10	1	2100	1700	85
T10	2	2200	1400	100
T10	3	2100	2500	74
T10	4	2600	2600	97
T10	5	2300	1300	62

Anexo 7: Resultados de la evaluación del extracto celular del peciolo en hojas de lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, en la época de verano

T	R	NO ₃ ⁻	K ⁺	Ca ⁺⁺
		-----ppm-----		
T1	1	3000	1500	180
T1	2	2900	1900	140
T1	3	2000	1500	140
T1	4	2000	1600	160
T1	5	2300	1500	140
T2	1	2000	1400	170
T2	2	2500	1800	200
T2	3	1800	1500	140
T2	4	1600	1400	150
T2	5	1800	1400	140
T3	1	2100	1500	110
T3	2	2800	1800	230
T3	3	1700	1500	150
T3	4	1500	1500	160
T3	5	2700	1700	270
T4	1	2000	1700	170
T4	2	2300	1700	170
T4	3	1700	1300	130
T4	4	2300	1600	120
T4	5	2300	1600	170
T5	1	2300	1800	140
T5	2	2500	1900	140
T5	3	1700	1300	170
T5	4	2000	1400	110
T5	5	2800	1900	230
T6	1	2100	1700	210
T6	2	1900	1700	140
T6	3	1600	1400	140
T6	4	2100	1500	150
T6	5	1800	1200	170
T7	1	2000	1600	150
T7	2	2500	1800	130
T7	3	1700	1300	130
T7	4	1800	1300	160
T7	5	2100	1500	160
T8	1	2200	1700	200
T8	2	1600	1700	98
T8	3	1400	1300	140
T8	4	2000	1600	160
T8	5	2200	1700	160
T9	1	2100	1700	210
T9	2	2000	1800	130
T9	3	2000	1500	180
T9	4	2500	1700	150
T9	5	2500	1600	190
T10	1	2400	2000	130
T10	2	2300	1500	150
T10	3	2300	1600	170
T10	4	1700	1500	140
T10	5	2800	1700	190

Anexo 8: Resultados de las concentraciones foliares de N, P, K y Fe en la lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, en la época de invierno

T	R	N - %	P - %	K - %	Fe
		-----%-----			ppm
T1	1	3.67	0.61	3.21	146.94
T1	2	4.78	0.68	3.42	148.01
T1	3	3.98	0.72	3.17	147.61
T1	4	4.12	0.69	3.22	148.29
T1	5	4.44	0.66	3.24	148.92
T2	1	3.63	0.52	3.21	123.95
T2	2	3.97	0.56	3.32	125.26
T2	3	4.24	0.61	3.41	125.75
T2	4	4.34	0.71	3.51	123.99
T2	5	3.78	0.62	3.42	124.78
T3	1	3.4	0.49	3.11	119.74
T3	2	3.67	0.52	3.22	120.02
T3	3	3.23	0.55	3.37	119.01
T3	4	4.12	0.59	3.29	118.23
T3	5	4.09	0.52	3.31	118.01
T4	1	3.17	0.51	2.85	112.12
T4	2	3.74	0.54	2.75	113.36
T4	3	4.01	0.55	2.93	118.04
T4	4	3.84	0.52	2.91	116.89
T4	5	3.42	0.45	2.94	115.34
T5	1	3.96	0.52	3.41	130.94
T5	2	4.12	0.61	3.47	135.41
T5	3	4.26	0.61	3.45	134.89
T5	4	4.5	0.59	3.49	134.19
T5	5	4.42	0.65	3.39	134.23
T6	1	4.22	0.61	3.48	127.45
T6	2	4.78	0.69	3.79	128.81
T6	3	4.54	0.62	3.85	129.41
T6	4	4.23	0.7	3.91	130.31
T6	5	4.57	0.63	3.56	130.04
T7	1	3.29	0.42	3.29	119.28
T7	2	4.09	0.59	3.43	123.05
T7	3	3.64	0.61	3.34	122.23
T7	4	3.78	0.62	3.24	122.16
T7	5	4.15	0.51	3.21	120.27
T8	1	3.21	0.49	2.83	112.38
T8	2	3.49	0.63	2.8	113.91
T8	3	3.78	0.59	2.79	113.68
T8	4	4.52	0.64	2.94	114.81
T8	5	4.72	0.6	2.91	113.72
T9	1	3.29	0.52	3.35	120.34
T9	2	3.98	0.64	3.31	122.74
T9	3	4.23	0.58	3.3	124.05
T9	4	4.11	0.61	3.56	122.34
T9	5	4.12	0.59	3.21	123.94
T10	1	3.08	0.43	2.54	102.12
T10	2	3.65	0.51	2.67	104.54
T10	3	3.68	0.59	3.04	105.21
T10	4	3.78	0.61	3.18	104.75
T10	5	3.28	0.59	2.96	106.12

Anexo 9: Resultados de las concentraciones foliares de N, P, K y Fe en la lechuga, híbrido ‘Waldmans Green’, en la época de verano

T	R	N	P	K	Fe
		-----%-----			ppm
T1	1	3.67	0.52	3.72	169.32
T1	2	3.68	0.5	3.89	185.53
T1	3	3.89	0.63	3.76	175.98
T1	4	3.45	0.61	3.61	179.29
T1	5	3.93	0.62	3.98	182.47
T2	1	3.63	0.51	4.98	148.65
T2	2	3.97	0.68	5.32	151.01
T2	3	4.24	0.49	5.73	157.32
T2	4	4.34	0.61	6.31	159.89
T2	5	3.78	0.52	5.32	152.59
T3	1	3.4	0.61	4.47	180.82
T3	2	3.67	0.57	3.95	200.97
T3	3	3.73	0.58	4.52	207.32
T3	4	4.12	0.57	4.67	215.12
T3	5	4.09	0.67	4.06	201.19
T4	1	3.87	0.63	3.75	298.67
T4	2	4.09	0.61	3.28	344.12
T4	3	4.81	0.61	4.19	321.45
T4	4	3.94	0.56	4.26	292.48
T4	5	3.59	0.61	3.76	314.81
T5	1	4.23	0.58	4.32	269.86
T5	2	4.32	0.57	3.99	262.32
T5	3	3.93	0.61	4.98	262.54
T5	4	4.22	0.61	5.29	279.12
T5	5	4.58	0.68	4.97	258.12
T6	1	3.87	0.52	4.23	198.04
T6	2	4.08	0.52	5.39	174.92
T6	3	4.14	0.57	6.02	169.23
T6	4	3.93	0.54	4.95	174.98
T6	5	3.72	0.51	5.32	185.12
T7	1	3.99	0.55	5.34	342.31
T7	2	3.78	0.52	5.32	339.12
T7	3	3.54	0.58	4.99	323.68
T7	4	3.69	0.65	4.87	315.08
T7	5	4.19	0.61	5.32	338.98
T8	1	4.12	0.62	6.04	257.32
T8	2	4.23	0.57	5.42	258.91
T8	3	3.99	0.63	4.34	247.12
T8	4	4.67	0.65	4.91	249.89
T8	5	4.31	0.58	5.67	251.18
T9	1	4.09	0.61	5.06	229.12
T9	2	4.43	0.56	5.14	241.76
T9	3	3.67	0.62	5.21	201.12
T9	4	4.23	0.58	4.93	231.01
T9	5	3.67	0.54	5.02	242.12
T10	1	3.76	0.61	4.32	158.23
T10	2	4.01	0.61	5.03	149.98
T10	3	3.91	0.67	4.87	153.21
T10	4	3.39	0.58	5.11	142.36
T10	5	3.52	0.66	5.16	153.21