



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES
CARRERA DE AGRONOMÍA

Proyecto de Investigación
previo a la obtención del título
de Ingeniero Agrónomo.

Título Del Proyecto De Investigación:

“Efectos de la toxicidad del manganeso en plantas de tomate cherry (*Lycopersicon
esculentum* Mill.) cultivadas en hidroponía.”

Autora:

Emily Yokasta Rivera Montiel

Director De Proyecto De Investigación:

Ing. Erick Alberto Eguez Enriquez, M.Sc.

Mocache – Los Ríos – Ecuador

2023

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **Emily Yokasta Rivera Montiel** declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Técnica Estatal de Quevedo, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Emily Yokasta Rivera Montiel

C.I. 120517837-7

CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El suscrito, **Ing. Erick Alberto Equez Enriquez, M.Sc.**, docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que la estudiante **Emily Yokasta Rivera Montiel**, realizó el Proyecto de Investigación de grado titulado “**Efectos de la toxicidad del manganeso en plantas de tomate cherry (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivadas en hidroponía.**”, previo a la obtención del título de Ingeniero Agrónomo, bajo mi dirección, habiendo cumplido con las disposiciones reglamentarias establecidas para el efecto.

Ing. Erick Alberto Equez Enriquez, M.Sc.

Director de Proyecto de Investigación

REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO

El suscrito **Ing. Erick Alberto Eguez Enriquez, M.Sc.**, docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, en calidad de Director del Proyecto de Investigación titulado "**Efectos de la toxicidad del manganeso en plantas de tomate cherry (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivadas en hidroponía.**", perteneciente a la estudiante de la carrera de Ingeniería Agronómica **Emily Yokasta Rivera Montiel, CERTIFICA:** el cumplimiento de los parámetros establecidos por el SENESCYT, y se evidencia el reporte de la herramienta de prevención de coincidencia y/o plagio académico (URKUND) con un porcentaje de coincidencia del 2%.



Document Information

Analyzed document	TESIS RIVERA MONTIEL 2023.docx (D168797480)
Submitted	2023-05-29 03:23:00
Submitted by	Erick Alberto Eguez Enriquez
Submitter email	eeguez@uteq.edu.ec
Similarity	2%
Analysis address	eeguez.uteq@analysis.urkund.com

Ing. Erick Alberto Eguez Enriquez, M.Sc.

Director de Proyecto de Investigación



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES
CARRERA DE AGRONOMÍA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Título:

“Efectos de la toxicidad del manganeso en plantas de tomate cherry (*Lycopersicon
esculentum* Mill.) cultivadas en hidroponía.”

Presentado a la Comisión Académica como requisito previo a la obtención del título de
Ingeniero Agrónomo.

Aprobado por:

Ing. Freddy Javier Guevara Santana M.Sc.

Presidente Del Tribunal

Víctor Manuel Guamán Sarango, PhD.

Integrante Del Tribunal

Mayra Carolina Vélez Ruiz, PhD.

Integrante Del Tribunal

Mocache – Los Ríos - Ecuador

2023

AGRADECIMIENTO

A mi padre celestial, quiero agradecer por haberme colocado en este maravilloso camino, aunque no haya sido fácil me dio grandes batallas que al final forjaron la mujer que soy.

A mi Universidad, en especial a la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, por abrirme sus puertas y brindarme los mejores años de mi vida.

A mis docentes, por haber compartido sus conocimientos, experiencias, respeto y amistad. Hoy por hoy me siento lista para abrir un nuevo capítulo de mi vida con esa semilla que sembraron en mí, soy su fruto, y les garantizo que una de sus mejores cosechas.

Al Ing. Erick Alberto Eguez Enriquez, M. Sc., por la iniciativa y su tiempo invertido para hacer posible este trabajo, por inspirarme con sus conocimientos y su forma tan apasionada de amar lo que hace.

A la familia Mendoza Rivas, gracias por el cariño, el apoyo y confianza, este triunfo también se concretó gracias a ustedes.

A José Vicente Valverde Coello, cuando inicias este camino tienes muchos amigos, pero con el paso del tiempo son muy pocos quienes se quedan a tu lado, gracias por quedarte y haberme apoyado todos estos años, gracias a ti hoy llegué a la meta.

A Mauro Danilo Palacios Moran, Juan Bautista Troncozo Correa, Bryan Esteban Romo Domínguez, Ketty Vanessa Arellano Ibarra, Dayann Andrea Vera Saltos; su paciencia y apoyo incondicional los llevo guardados muy dentro de mí.

A la Ing. Yanila Esther Granados Rivas y a la Dra. Paula Marisol Plaza Zambrano, gracias por todos los consejos y por ser mis guías, las llevaré siempre en mi corazón.

Emily Yokasta Rivera Montiel

DEDICATORIA

Alida Maricela Montiel Banderas, Karen Meylin Cedeño Montiel, Brenda Malena Montiel Banderas, María Cristina Banderas Hidalgo y Roberto Alejandro Montiel Macias; no hay palabras para poder expresar tanto amor y gratitud mi amada familia, gracias por el apoyo, la confianza, la comprensión, los sacrificios brindados todos estos años, lo hicieron bien, esta victoria es suya, los amo con mi vida.

Este trabajo me lo dedico a mí misma, porque es la prueba de que todo sacrificio tiene su recompensa, y aunque el camino fue difícil, lo logré, porque yo siempre pude, siempre puedo y siempre podré.

Emily Yokasta Rivera Montiel

RESUMEN

En este estudio se analizó la toxicidad del manganeso (Mn) en plantas de tomate cherry y se identificó que el exceso de este micronutriente esencial puede causar daños considerables, principalmente en el aparato fotosintético. El objetivo de esta investigación se basa en examinar los efectos de la toxicidad del Mn en un sistema hidropónico de raíz flotante. Para ello, se establecieron cuatro tratamientos, el tratamiento control (T1), y tres con concentraciones de Mn a, 15 ppm (T2), 40 ppm (T3) y 160 ppm (T4). En cada tratamiento, se documentaron aspectos de crecimiento y fisiológicos, además de los síntomas de deficiencia. En el T2, las plantas evidenciaron un crecimiento vegetativo menor, arrugas y deformaciones en las hojas, y retraso en la floración, comparado al control. El T3 exhibió signos más severos de toxicidad, como hojas más verdes y deformadas, acortamiento de los entrenudos y pérdida de la capacidad reproductiva, evidenciada por el aborto de brotes florales. En el T4, las plantas presentaron manchas oscuras en las hojas y raquitismo en los tallos desde etapas tempranas, y no sobrevivieron más allá de la segunda semana debido a la alta toxicidad del Mn. Finalmente, se concluyó que la toxicidad del Mn en plantas de tomate cherry cultivadas en hidroponía depende de la concentración del micronutriente. A dosis moderadas (15 ppm) surgen problemas leves de crecimiento y desarrollo, pero a dosis más altas (40 y 160 ppm), los efectos son más graves, llegando a deformaciones y necrosis foliar, hasta la muerte de las plantas.

Palabras claves: Toxicidad del manganeso, tomate cherry, hidroponía, SRF.

ABSTRACT

This study analyzed the toxicity of manganese (Mn) in cherry tomato plants and identified that excess of this essential micronutrient can cause considerable damage, mainly in the photosynthetic apparatus. The objective of this research is based on examining the effects of Mn toxicity in a floating root hydroponic system. For this purpose, four treatments were established, the control treatment (T1), and three with Mn concentrations at, 15 ppm (T2), 40 ppm (T3) and 160 ppm (T4). In each treatment, growth and physiological aspects were documented, in addition to deficiency symptoms. In T2, plants showed reduced vegetative growth, leaf wrinkling and deformation, and delayed flowering compared to the control. T3 exhibited more severe signs of toxicity, such as greener and deformed leaves, shortening of internodes and loss of reproductive capacity, evidenced by the abortion of flower buds. At T4, plants showed dark leaf spots and stem rickets from early stages and did not survive beyond the second week due to high Mn toxicity. Finally, it was concluded that Mn toxicity in cherry tomato plants grown in hydroponics depends on the concentration of the micronutrient. At moderate doses (15 ppm), mild growth and development problems arise, but at higher doses (40 and 160 ppm), the effects are more severe, leading to deformation and leaf necrosis, and even death of the plants.

Keywords: Manganese toxicity, cherry tomato, hydroponics, DRFT.

TABLA DE CONTENIDO

Portada	i
Declaración de autoría y cesión de derechos.....	ii
Certificación de culminación del proyecto de investigación.....	iii
Reporte de la herramienta de prevención de coincidencia y/o plagio académico	iv
Certificado de aprobación por tribunal de sustentación	v
Agradecimiento	vi
Dedicatoria	vii
Resumen	viii
Abstract	ix
Tabla de contenido	x
Código dúbliin	xvii
Introducción.....	1
CAPÍTULO I. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	
1.1. Planteamiento del problema	4
1.2. Justificación	6
1.3. Objetivos.....	7
1.3.1. Objetivo general	7
1.3.2. Objetivos específicos	7
CAPÍTULO II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN	
2.1. Marco conceptual	9
2.1.1. Toxicidad del manganeso	9
2.1.2. Tomate cherry	9
2.1.3. Hidroponía	9
2.1.4. SRF (Sistema de Raíz Flotante)	9
2.2. Marco referencial.....	10
2.2.1. Origen y distribución del tomate cherry	10

2.2.2.	Importancia económica del tomate cherry.....	10
2.2.3.	Clasificación taxonómica	11
2.2.4.	Descripción botánica del tomate Cherry	11
2.2.5.	Variedades de tomate.....	12
2.2.6.	Requerimientos edafoclimáticos del tomate Cherry.....	14
2.2.7.	Requerimientos nutricionales del tomate cherry: Macronutrientes.....	15
2.2.8.	Requerimientos nutricionales del tomate cherry: Micronutrientes.....	17
2.2.9.	Manganeso (Mn).	19
2.2.10.	Cultivos en soluciones hidropónicas	21
2.2.11.	Solución nutritiva	23
2.2.12.	Factores a considerar en la producción de cultivos con raíz flotante	23
2.2.13.	Requerimientos del tomate en hidroponía.....	24

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.	Localización.....	27
3.1.1.	Características agroclimáticas	27
3.2.	Tipo de investigación.....	27
3.3.	Método de investigación.....	28
3.4.	Fuente de recopilación de información	28
3.4.1.	Fuentes primarias.....	28
3.4.2.	Fuentes secundarias	28
3.5.	Diseño de la investigación	28
3.5.1.	Factores de estudio	28
3.5.2.	Tratamientos	29
3.5.3.	Diseño experimental.....	29
3.6.	Instrumentos de la investigación	30
3.6.1.	Manejo del experimento	30
3.6.2.	Preparación de soluciones madre	31

3.6.3.	Conducción del ensayo	32
3.6.4.	VARIABLES A EVALUAR	33
3.7.	Tratamiento de los datos	35
3.8.	Recursos humanos y materiales	35
3.8.1.	Recursos humanos	35
3.8.2.	Materiales de campo	36
1.8.1.	Materiales de laboratorio	36
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		
4.1.	Evaluación de parámetros de crecimiento	39
4.1.1.	Altura de plantas de tomate Cherry	39
4.1.2.	Diámetro de tallo de plantas de tomate Cherry	41
4.1.3.	Número de hojas de tomate Cherry	44
4.2.	Evaluación de parámetros fisiológicos	46
4.2.1.	Área foliar	46
4.2.2.	Materia seca	47
4.2.3.	Análisis químico de los macronutrientes en la parte aérea de las plantas	48
4.2.4.	Análisis químico de los micronutrientes en la parte aérea de las plantas	49
4.3.	Descripción de los síntomas de toxicidad	51
4.4.	Discusión	53
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		
5.1.	Conclusiones	56
5.2.	Recomendaciones	57
CAPÍTULO VI. BIBLIOGRAFÍA		
6.1.	Bibliografía	59
CAPÍTULO VII. ANEXOS		
7.1.	Anexos	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación taxonómica del cultivo de tomate.....	11
Tabla 2. Valores de referencia para la composición de soluciones nutritivas para el cultivo de tomate Cherry.	24
Tabla 3. Características agroclimáticas de la Finca Experimental “La María” UTEQ.	27
Tabla 4. Tratamientos de manganeso en diferentes concentraciones.	29
Tabla 5. Esquema del modelo estadístico de parcelas divididas (DBCA).	29
Tabla 6. Esquema del análisis de varianza.	30
Tabla 7. Solución nutritiva de Hoagland y Arnon diluida para regar las bandejas germinadoras.	31
Tabla 8. Composición de la solución nutritiva de Hoagland y Arnon (1950).....	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Altura de las plantas en el cultivo de tomate cherry a los 8 días después de la siembra.....	39
Figura 2. Altura de las plantas en el cultivo de tomate cherry a los 50 días después de la siembra.....	40
Figura 3. Variabilidad en la altura de las plantas de tomate cherry a los 7, 14, 21, 28, 35, 42 y 49 días después de la siembra.....	41
Figura 4. Diámetro de tallo de plantas de tomate cherry a los 8 días después de la siembra.	42
Figura 5. Diámetro de tallo de plantas de tomate cherry a los 49 días después de la siembra.....	43
Figura 6. Variabilidad en el diámetro de tallo del tomate cherry a los 7, 14, 21, 28, 35, 42 y 49 días después de la siembra.....	43
Figura 7. Número de hojas del cultivo de tomate cherry a los 8 días después de la siembra.....	44
Figura 8. Numero de hojas del cultivo de tomate cherry a los 50 días después de la siembra.....	45
Figura 9. Variabilidad en el número de hojas de tomate cherry a los 7, 14, 21, 28, 35, 42 y 49 días después de la siembra.....	46
Figura 10. Área foliar de tomate cherry.	47
Figura 11. Materia seca de tomate cherry.	48
Figura 12. Macronutrientes presentes en las plantas de tomate cherry.	49
Figura 13. Micronutrientes presentes en las plantas de tomate cherry.....	50
Figura 14. Tratamiento 2 con una concentración de manganeso de 15 ppm en plantas de tomate cherry.	52
Figura 15. Tratamiento 3 con una concentración de manganeso de 40 ppm en plantas de tomate cherry.	52

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Análisis de varianza con un arreglo de parcelas divididas de altura de plantas de tomate cherry a los 7, 14, 21, 28, 35, 42 y 49 días después de la siembra. .	64
Anexo B. Análisis de varianza con un arreglo de parcelas divididas del diámetro de tallo de plantas de tomate cherry a los 7, 14, 21, 28, 35, 42 y 49 días después de la siembra.....	64
Anexo C. Análisis de varianza con un arreglo de parcelas divididas del número de hojas de plantas de tomate cherry a los 7, 14, 21, 28, 35, 42 y 49 días después de la siembra.....	64
Anexo D. Análisis de varianza de altura de plantas de tomate cherry.	65
Anexo E. Análisis de varianza del diámetro de tallo de plantas de tomate cherry.	65
Anexo F. Análisis de varianza del número de hojas de plantas de tomate cherry.	65
Anexo G. Análisis de varianza del peso fresco.....	65
Anexo H. Análisis de varianza del peso seco.	65
Anexo I. Análisis de varianza de área foliar.	66
Anexo J. Análisis de varianza de materia seca.	66
Anexo K. Análisis de varianza de nitrógeno.....	66
Anexo L. Análisis de varianza de fosforo.	66
Anexo M. Análisis de varianza de potasio.....	66
Anexo N. Análisis de varianza de calcio.....	66
Anexo O. Análisis de varianza de magnesio.....	67
Anexo P. Análisis de varianza de azufre.....	67
Anexo Q. Análisis de varianza de zinc.	67
Anexo R. Análisis de varianza de cobre.	67
Anexo S. Análisis de varianza de hierro.	67
Anexo T. Análisis de varianza de molibdeno.	67
Anexo U. Análisis de varianza de boro.	68

Anexo V. Preparación de solución de Hoagland y Arnon.	68
Anexo W. Traslado de plantas a sistema hidropónico de raíces flotantes.	68
Anexo X. Extracción de plántulas del tratamiento.....	69
Anexo Y. Preparación de solución nutritiva para las cajas.	69

CÓDIGO DÚBLIN

Título:	Efectos de la toxicidad del manganeso en plantas de tomate cherry (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.) cultivadas en hidroponía.			
Autor:	Rivera Montiel Emily Yokasta			
Palabras clave:	Toxicidad de manganeso	Tomate cherry	Hidroponía	SRF
Fecha de publicación:				
Editorial:				
Resumen:	<p>Resumen. - En este estudio se analizó la toxicidad del manganeso (Mn) en plantas de tomate cherry y se identificó que el exceso de este micronutriente esencial puede causar daños considerables, principalmente en el aparato fotosintético. El objetivo de esta investigación se basa en examinar los efectos de la toxicidad del Mn en un sistema hidropónico de raíz flotante. Para ello, se establecieron cuatro tratamientos, el tratamiento control (T1), y tres con concentraciones de Mn a, 15 ppm (T2), 40 ppm (T3) y 160 ppm (T4) (...).</p> <p>Abstract. - This study analyzed the toxicity of manganese (Mn) in cherry tomato plants and identified that excess of this essential micronutrient can cause considerable damage, mainly in the photosynthetic apparatus. The objective of this research is based on examining the effects of Mn toxicity in a floating root hydroponic system. For this purpose, four treatments were established, the control treatment (T1), and three with Mn concentrations at, 15 ppm (T2), 40 ppm (T3) and 160 ppm (T4) (...).</p>			
Descripción:	___ hojas: dimensiones, 29 x 21 cm + CD _____			
URL:	<u>(en blanco hasta cuando se dispongan los repositorios)</u>			

INTRODUCCIÓN

El manganeso (Mn) es un micronutriente esencial en las plantas ya que participa en la estructura de proteínas y en enzimas fotosintéticas. Su deficiencia puede causar daños en los cloroplastos, afectando la fotólisis del agua en el fotosistema II, que suministra los electrones necesarios para la fotosíntesis. En otras palabras, el Mn es importante para la producción de energía en las plantas y su deficiencia puede afectar directamente el crecimiento y desarrollo de los cultivos (1).

El exceso de Mn también puede provocar daños en el aparato fotosintético. Los límites de toxicidad de Mn y la tolerancia al exceso de este metal dependen de la especie, variedad o genotipo del cultivo (2). En suelos ácidos, la cantidad de Mn intercambiable, principalmente en la forma de Mn^{2+} , aumenta en la solución del suelo. Esta forma de Mn puede transportarse fácilmente dentro de las células de la raíz y trasladarse a los brotes, donde finalmente se acumula (3).

La presencia excesiva de Mn en los tejidos de la planta puede interferir con múltiples procesos biológicos, incluyendo la actividad enzimática, la absorción, redistribución y traslocación de otros nutrientes esenciales (Ca, Fe, Mg, N, P) (4). Esta acumulación excesiva también puede tener un impacto negativo en la respuesta productiva de los cultivos, ya que puede provocar estrés oxidativo, reducir la disponibilidad de antioxidantes y aumentar la actividad de enzimas antioxidantes (5).

La toxicidad del Mn puede disminuir la tasa fotosintética lo que se atribuye a la degradación del aparato fotosintético presente en los cloroplastos. El deterioro del aparato fotosintético debido al estrés por toxicidad de Mn, sin duda, puede tener un efecto directo en el crecimiento y desarrollo de los cultivos (6).

El tomate es una de las especies hortícolas más importantes a nivel mundial y se cultiva en regiones tropicales y subtropicales de Ecuador. A pesar de su relevancia, los estudios sobre el efecto de la toxicidad del Mn en el tomate son escasos en la literatura científica, lo que hace que no se conozca con certeza cómo esta toxicidad podría afectar el desarrollo del cultivo (7). Cabe destacar que en Ecuador, el tomate se produce principalmente en las

provincias de Guayas, Carchi, Loja y Manabí, que se caracterizan por tener suelos con pH ácido (5).

El propósito de este estudio es examinar los efectos de la toxicidad del Mn en plantas de tomate cherry cultivadas en el sistema hidropónico de raíz flotante, para brindar a los agricultores conocimientos sobre las dosis perjudiciales de Mn y los síntomas de toxicidad en los cultivos de tomate cherry. Este conocimiento permitirá actuar rápidamente y tomar medidas preventivas para evitar el desarrollo del efecto tóxico del Mn en los cultivos de tomate cherry, y así asegurar el aumento de la productividad de los cultivos.

CAPÍTULO I
CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

El manganeso es un micronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo del cultivo de tomate cherry, pero su exceso es capaz de provocar toxicidad en las plantas provocando daños como la reducción en la productividad. La elevada acidez del suelo en zonas tropicales puede presentar una mayor disponibilidad de Mn, lo que aumenta la incidencia de toxicidad en comparación con la deficiencia. El exceso de Mn es capaz de interferir con la absorción de otros nutrientes importantes como el Ca, Mg o Fe, generando desequilibrios nutricionales y afectando negativamente el desarrollo y rendimiento en su etapa vegetativa.

El desarrollo de un diagnóstico más preciso es importante para identificar de manera temprana la toxicidad del Mn en las plantas de tomate cherry. Esto permitirá una intervención oportuna y la implementación de medidas preventivas adecuadas. Actualmente, los métodos existentes no proporcionan la precisión necesaria, lo que limita la capacidad de los agricultores para tomar acciones preventivas a tiempo. Mediante un estudio que aplique distintas concentraciones de Mn, se podrá evaluar con mayor precisión los efectos tóxicos en las plantas y establecer umbrales adecuados para una detección más confiable.

Diagnóstico

El nivel tóxico de Mn en las plantas puede variar según la especie, variedad y condiciones ambientales. Si los niveles de Mn superan las cantidades recomendadas, se puede reducir el rendimiento de los cultivos, así como el crecimiento de las raíces y la parte aérea. Además, el exceso de Mn puede disminuir la disponibilidad y absorción de otros nutrientes en las plantas.

En los últimos años, el diagnóstico de la toxicidad por Mn en *Lycopersicon esculentum* ha ganado un gran interés, debido a que, el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados ha reducido el pH del suelo haciendo que algunos micronutrientes como el Mn se hagan lo suficientemente solubles como para ser tóxicos para las plantas.

Pronóstico

En sustratos ácidos con deficiencias de Ca y Mg, los síntomas visuales de toxicidad por Mn pueden ser difíciles de detectar ya que se confunden con la deficiencia de otros nutrientes como el hierro.

Formulación del problema

¿Cuáles son los efectos de la toxicidad del manganeso en plantas de tomate cherry cultivadas en hidroponía?

Sistematización del problema

¿Cómo es la respuesta del cultivo de tomate cherry a diferentes niveles de manganeso cultivadas en hidroponía?

¿Cuáles son los síntomas de toxicidad de manganeso en plantas de tomate cherry cultivadas en sistemas hidropónicos?

1.2. Justificación

El manganeso (Mn) desempeña diversas funciones bioquímicas dentro de la planta y se considera un micronutriente necesario en cantidades pequeñas. Sin embargo, cuando los niveles de micronutrientes exceden ciertos niveles, pueden perjudicar el crecimiento y rendimiento de las plantas de tomate cherry. Los efectos de toxicidad pueden corregirse si se detectan a tiempo mediante un diagnóstico adecuado, permitiendo implementar las medidas necesarias para evitar daños y maximizar el potencial de las plantas de tomate cherry.

El análisis químico de suelos y hojas son una herramienta fundamental para el diagnóstico de problemas nutricionales en los cultivos, ya que permiten determinar deficiencias y excesos de nutrientes. Por ejemplo, la toxicidad por Mn puede ser detectada al combinar el análisis químico de suelos y hojas con el diagnóstico de síntomas visuales, los productores pueden obtener una visión más completa del estado nutricional de sus cultivos de tomate cherry.

El uso de un sistema hidropónico para investigar los efectos de toxicidad del Mn permite un control preciso de los nutrientes suministrados, es por eso que facilita la regulación y ajustes exactos de las concentraciones y su interacción con otros nutrientes esenciales como Fe, Ca y Mg, evitando confusiones con otros elementos que podrían presentar síntomas similares a una deficiencia de Mn.

Este estudio proporciona una base sólida para el desarrollo de enfoques agrícolas más efectivos y rentables, beneficiando tanto a los agricultores como a la industria agrícola en general, porque podrán implementar estrategias para reducir pérdidas económicas asociadas y asegurar un rendimiento óptimo de sus cultivos, todo esto con el fin de mejorar la eficiencia de la producción, garantizar la calidad y sostenibilidad de los cultivos de tomate cherry en el futuro.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Examinar los efectos de la toxicidad del manganeso en plantas de tomate cherry (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivadas en el sistema hidropónico de raíz flotante.

1.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar la respuesta agronómica del cultivo de tomate cherry con diferentes niveles de manganeso cultivadas en hidroponía.
- Documentar los síntomas de toxicidad de manganeso en plantas de tomate cherry cultivadas en sistemas hidropónicos.

CAPÍTULO II
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Marco conceptual

2.1.1. Toxicidad del manganeso

La toxicidad del manganeso está asociada a su interacción con el hierro, lo que puede provocar síntomas que se asemejan a la deficiencia de hierro, y viceversa. Los síntomas de toxicidad por Mn incluyen la aparición de clorosis en los bordes de las hojas y la necrosis de las hojas y raíces, que adquieren un color marrón oscuro, pero esto ocurre únicamente después de que el follaje ha sido afectado, además afecta negativamente a las enzimas, disminuye la respiración y se ha relacionado con la destrucción de auxinas, hormonas vegetales responsables del crecimiento y desarrollo de las plantas (8).

2.1.2. Tomate cherry

El tomate cherry es reconocido por su delicioso sabor. Se trata de frutos pequeños y abundantes que se desarrollan a lo largo del tallo y las ramas de la planta. Su tamaño puede variar desde el de la punta del dedo pulgar hasta el de una pelota de golf, y su forma puede ir desde esférica hasta ligeramente achatada. La mayoría de las variedades de tomate cherry cultivadas a nivel comercial son de crecimiento indeterminado (9).

2.1.3. Hidroponía

La hidroponía es un conjunto de técnicas que permiten el cultivo de plantas sin la necesidad de suelo. Esta práctica se puede llevar a cabo en diversas estructuras, ya sean simples o complejas, y brinda la oportunidad de producir plantas herbáceas en lugares como azoteas, suelos infértiles, terrenos difíciles o invernaderos con y sin control climático. Estas técnicas se basan en el uso de sustratos, que son medios que sostienen a la planta, o en sistemas que suministran soluciones de nutrientes de forma estática o circulante (10).

2.1.4. SRF (Sistema de Raíz Flotante)

El Sistema de Raíz Flotante (SRF) es una técnica de cultivo hidropónico que se basa en el cultivo de plantas en agua con una solución nutritiva, utilizando materiales como plumavit u otros similares, prescindiendo del uso de sustratos. La solución nutritiva es una mezcla de

sales minerales solubles que proporciona de manera equilibrada todos los nutrientes necesarios para el crecimiento y desarrollo de las plantas (11).

2.2. Marco referencial

2.2.1. Origen y distribución del tomate cherry

El origen del tomate está situado en Ecuador, Chile y Perú. Este cultivo se domesticó en México a partir del tomate; desde allí se introdujo a Europa a inicios del siglo XVI, considerándose una planta venenosa (1). A finales del siglo XVIII fue llevado desde Europa hasta los Estados Unidos de América.

2.2.2. Importancia económica del tomate cherry

El tomate es una de las especies hortícolas más importantes a nivel mundial debido a su amplia distribución geográfica y su alto valor económico. Además, es apreciado por sus propiedades alimenticias y antioxidantes. En el Ecuador, existen diversas variedades genéticas de tomate que se adaptan a las condiciones climáticas de las regiones tropicales, subtropicales y semisecas, lo que lo convierte en un cultivo muy importante para la economía local y la alimentación de la población (12).

El tomate es una de las especies hortícolas más relevantes a nivel mundial y su cultivo se lleva a cabo en regiones tropicales y subtropicales de Ecuador. Sin embargo, existe una escasez de estudios en la literatura científica sobre el efecto de la toxicidad del Mn en el tomate, lo que limita el conocimiento preciso acerca de cómo esta toxicidad podría afectar el desarrollo del cultivo. Es importante destacar que en Ecuador, la producción de tomate en el año 2019 alcanzó alrededor de 31591 Tm, con un rendimiento promedio de 22 548 kg/ha (13).

Las provincias líderes en la producción de tomate son Guayas, Carchi y Loja. A pesar de los bajos rendimientos observados en la provincia de Manabí, se mantiene la producción de tomate en esta zona. Además, se destaca que la producción de tomate bajo invernadero se concentra principalmente en las regiones de la sierra y la Amazonía, aprovechando las ventajas que brinda un entorno controlado. Cabe mencionar que estas regiones se

caracterizan por tener suelos con un pH ácido, lo cual es relevante en el contexto del cultivo del tomate (7).

2.2.3. Clasificación taxonómica

El tomate presenta la siguiente clasificación taxonómica (**Tabla 1**):

Tabla 1

Clasificación taxonómica del cultivo de tomate.

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Subclase	Asteridae
Orden	Solanales
Familia	Solanaceae
Género	<i>Lycopersicon</i>
Especie	<i>L. esculentum</i>

Fuente: (14)

2.2.4. Descripción botánica del tomate Cherry

2.2.4.1. Sistema radicular.

La raíz es pivotante y tiene raíces laterales que son más o menos superficiales y están formadas por raíces principales, secundarias y adventicias. En la raíz se encuentran los pelos absorbentes que son los encargados de absorber los nutrientes y el agua (15).

2.2.4.2. Tallo principal.

El tallo es herbáceo, cilíndrico y erecto, aunque también puede adoptar una forma angular y decumbente. Está cubierto por pelos glandulares que segregan una sustancia espesa y verde-amarillenta que actúa como repelente para varios insectos. El tamaño del tallo varía entre los 30 y 40 cm y puede alcanzar hasta 4 m de altura, mientras que su grosor oscila entre los 2 y 4 cm (16).

2.2.4.3. Hojas.

Las hojas son compuestas y se insertan en los nudos del tallo de manera alterna. El limbo de las hojas está dividido en siete, nueve u once foliolos. Al igual que el tallo, las hojas poseen glándulas pubescentes que desprenden cierto aroma, y su superficie es vellosa y de color verde (15).

2.2.4.4. Flor.

La flor es perfecta y consta de cinco o más sépalos y pétalos, así como de la misma cantidad de estambres. Las partes de la flor están dispuestas de manera centrípeta, es decir, primero los sépalos, luego los pétalos, los estambres y, finalmente, el gineceo. Las flores se agrupan en racimos simples o ramificados, y cada inflorescencia puede contener entre tres y diez flores (17).

2.2.4.5. Fruto.

El fruto de la planta de tomate es una baya globosa de color rojo, con diferentes tonalidades dependiendo de la variedad cultivada. Su forma es muy variable, pudiendo ser ovalada, aplanada, redondeada o alargada, al igual que su tamaño. Las partes del fruto son el pericarpio, el tejido placentario y las semillas (17).

2.2.4.6. Semilla.

La semilla es pequeña, con dimensiones de aproximadamente 5 x 4 x 2 mm. Las partes de la semilla son el embrión, el endospermo y la testa o cubierta seminal. La forma de la semilla puede ser achatada, ovalada, casi redonda, arriñonada, triangular o con una punta globular ligeramente alargada (13).

2.2.5. Variedades de tomate

2.2.5.1. Fortaleza.

La variedad "Fortaleza" alcanza una altura de 1.88 m en 95 días después del trasplante. Esta variedad es adecuada para regiones frías con baja luminosidad, como la sierra, y produce frutos con un color y una firmeza excelentes (18).

2.2.5.2. Fortuna.

Este híbrido tiene un ciclo de crecimiento de 95 a 110 días y un crecimiento indeterminado vigoroso y compacto con entrenudos cortos de 25-30 cm. Además, posee una buena firmeza y formato, y se adapta bien a diferentes zonas climáticas. Es una variedad resistente y puede durar hasta un mes después de su cosecha (19).

2.2.5.3. Cherry.

La planta de tomate cherry o cereza produce frutos pequeños del tamaño de una cereza y de color rojo brillante. Es una planta anual que debe ser tutorada y requiere mucha luz solar, por lo que se desarrolla mejor en climas tropicales. Debido a su tamaño, no requiere de una gran área de producción (20).

2.2.5.4. Chonto.

Los tomates de crecimiento indeterminado son plantas que tienen follaje abierto y una altura que oscila entre 1.75 y 1.85 m. Estos tomates tienen una consistencia firme y resistente, lo que los hace adecuados para largos viajes. Sus frutos son redondos o ligeramente alargados (21).

2.2.5.5. Pietro.

Esta planta es vigorosa y de crecimiento indeterminado, y produce frutos grandes, semiredondos y de color rojo intenso que son firmes al tacto. Los frutos tienen una larga vida útil una vez recolectados y se adaptan bien tanto en invernadero como en campo abierto (17).

2.2.5.6. Charleston.

Este híbrido de tomate es de crecimiento indeterminado y presenta una larga vida útil en el mercado. Los frutos son firmes, bien formados y tienen un excelente sabor. La planta tiene entrenudos cortos, lo que la hace compacta y adecuada tanto para invernaderos como para cultivos al aire libre. Este híbrido se adapta especialmente bien a climas cálidos (22).

2.2.5.7. Titán.

Este híbrido es de crecimiento indeterminado y tiene un tamaño compacto, lo que lo hace adecuado tanto para su cultivo en campo abierto como bajo invernadero. Sus frutos son redondos, muy firmes y tienen una buena resistencia a la manipulación (23).

2.2.5.8. Sheila.

Este híbrido de tomate indeterminado suena muy prometedor, gracias a su crecimiento vigoroso y su capacidad para adaptarse tanto a campo abierto como a invernaderos. La firmeza y el tamaño de sus frutos lo hacen ideal para el transporte y comercialización, lo que podría ser una gran ventaja para los agricultores (19).

2.2.6. *Requerimientos edafoclimáticos del tomate Cherry*

2.2.6.1. Clima.

La duración del ciclo biológico de los cultivos es un proceso que está fuertemente influenciado por las condiciones ambientales. Es importante considerar la exposición a la radiación solar óptima y suficiente para el desarrollo del cultivo. La temperatura ideal para la floración es de 21 °C, mientras que para la maduración es de 23 °C. Temperaturas más altas pueden tener efectos negativos en la producción de los cultivos. Además, es esencial mantener una humedad relativa entre el 70 % y el 80 % para el correcto crecimiento de los cultivos (17).

2.2.6.2. Suelo.

El tomate es capaz de crecer en diferentes tipos de suelo, pero se sugiere preferentemente aquellos de textura franco-arcillosa con estructura granular y una profundidad que exceda los 80 cm. Para el cultivo óptimo del tomate, se aconseja mantener un rango de pH del suelo entre 5.5 y 6.5, así como una conductividad eléctrica en el rango de 0.75 a 2.0 mmho/cm³ (24).

2.2.7. *Requerimientos nutricionales del tomate cherry: Macronutrientes*

Los macronutrientes son elementos esenciales para el crecimiento vegetativo y la producción de frutos de calidad en las plantas de tomate cherry. Comprender la importancia de estos nutrientes permite optimizar su suministro y garantizar un desarrollo saludable de las plantas. A continuación, se mencionan los macronutrientes que las plantas de tomate cherry requieren para alcanzar su óptimo desarrollo:

2.2.7.1. Nitrógeno (N).

Las plantas de tomate cherry requieren una cantidad de nitrógeno que oscila entre 100 y 200 kg/ha para su crecimiento vegetativo. El nitrógeno desempeña un papel fundamental en la síntesis de proteínas, enzimas y clorofila, lo cual favorece el desarrollo de hojas y tallos, así como el establecimiento de un sistema de raíces saludable. Además, su presencia adecuada estimula un crecimiento vigoroso, mejora la fotosíntesis y aumenta la absorción de otros nutrientes. El rango recomendado de nitrógeno en tejido vegetal puede ser de aproximadamente 2000 ppm a 5000 ppm (25).

2.2.7.2. Fósforo (P).

Se recomienda aplicar entre 50 y 100 kg/ha de pentóxido de fósforo (P₂O₅) en forma de fertilizantes fosfatados para satisfacer las necesidades de fósforo de las plantas de tomate cherry durante su desarrollo vegetativo. El fósforo es esencial para la transferencia de energía y la síntesis de ácidos nucleicos, fosfolípidos y adenosín trifosfato (ATP). Además, desempeña un papel crucial en el desarrollo de raíces, flores y frutos, así como en la

maduración de las plantas. Los niveles adecuados de fósforo en tejido vegetal pueden oscilar entre 1000 ppm y 3000 ppm (18).

2.2.7.3. Potasio (K).

Para un crecimiento óptimo de las plantas de tomate cherry, se requiere un suministro de potasio que oscile entre 150 y 250 kg/ha de óxido de potasio (K_2O). El potasio tiene una función vital en el equilibrio hídrico de la planta, la activación de enzimas y la síntesis de proteínas. Asimismo, participa en el transporte de nutrientes y regula la apertura y cierre de los estomas. La presencia adecuada de potasio mejora la calidad y el sabor de los frutos, fortalece la resistencia a enfermedades y estrés, optimiza la utilización del agua y aumenta la tolerancia a condiciones adversas. Se considera que los niveles óptimos de potasio en tejido vegetal están en el rango de 3000 ppm a 6000 ppm (19).

2.2.7.4. Calcio (Ca).

Aunque el suelo suele proporcionar cantidades suficientes de calcio, es importante mantener niveles adecuados de este nutriente. El calcio desempeña un papel esencial en la formación y estabilidad de las paredes celulares, la regulación de la permeabilidad de las membranas y la activación de enzimas. Su presencia adecuada fortalece las células y tejidos vegetales, mejora la resistencia al daño mecánico, regula la absorción de otros nutrientes y reduce el riesgo de enfermedades fúngicas. Los niveles de calcio en tejido vegetal pueden variar entre 1000 ppm y 5000 ppm (25).

2.2.7.5. Magnesio (Mg).

Se recomienda la aplicación de aproximadamente 20 a 40 kg/ha de óxido de magnesio (MgO) como fuente de magnesio para satisfacer las necesidades de las plantas de tomate cherry. El magnesio es un componente clave de la clorofila, lo cual lo convierte en un elemento esencial para la fotosíntesis. Además, participa en la activación de enzimas y en la estabilidad de las membranas celulares. Su presencia adecuada mejora la eficiencia fotosintética, promueve la síntesis de proteínas y carbohidratos, y facilita la absorción de otros nutrientes, favoreciendo así un crecimiento saludable de las plantas. Los niveles de magnesio en tejido vegetal pueden estar en el rango de 1000 ppm a 3000 ppm (26).

2.2.7.6. Azufre (S).

Las plantas de tomate cherry requieren una cantidad aproximada de 20 a 30 kg/ha de azufre para su desarrollo vegetativo. El azufre forma parte de aminoácidos, vitaminas y otros compuestos orgánicos, y contribuye a la síntesis de proteínas y enzimas. Además, es importante para la formación de tejidos vegetales y el metabolismo de otros nutrientes. La presencia adecuada de azufre en las plantas favorece la formación de proteínas, mejora el sabor y la calidad de los frutos, promueve la resistencia a enfermedades y contribuye a la formación de tejidos estructurales. Los niveles adecuados de azufre en tejido vegetal pueden oscilar entre 500 ppm y 2000 ppm (19).

2.2.8. *Requerimientos nutricionales del tomate cherry: Micronutrientes*

Los micronutrientes desempeñan un papel clave en el metabolismo vegetal, actuando como cofactores en numerosas reacciones bioquímicas. Aunque son requeridos en cantidades mínimas, son fundamentales para el buen funcionamiento de procesos vitales en las plantas de tomate cherry.

2.2.8.1. Boro (B).

El boro es un micronutriente necesario en cantidades mínimas, recomendándose una aplicación de 0.5 a 2 kg/ha para garantizar un suministro adecuado. Es esencial para la estructura y estabilidad de las paredes celulares, la síntesis de proteínas y la absorción de nutrientes. Además, desempeña un papel clave en la regulación de procesos de crecimiento y desarrollo. En el caso específico del tomate cherry, el boro beneficia a las plantas al promover una polinización adecuada, la formación de frutos y la calidad de la semilla. Se ha determinado que el rango óptimo de boro en el tejido foliar de las plantas de tomate cherry suele estar entre 20 y 100 ppm (27).

2.2.8.2. Cobre (Cu).

Para asegurar un suministro adecuado de cobre (Cu), se recomienda una cantidad de 0.2 a 0.5 kg/ha para las plantas de tomate cherry. El cobre desempeña un papel fundamental en la síntesis de enzimas relacionadas con la fotosíntesis, la respiración celular y la formación de

lignina. Además, juega un papel importante en la absorción y utilización del hierro por parte de las plantas. En el caso específico del tomate cherry, el cobre beneficia a las plantas al promover un crecimiento vigoroso, la formación de clorofila y la resistencia a enfermedades. Se ha determinado que un rango óptimo de cobre en el tejido foliar de las plantas de tomate cherry se encuentra entre 4 y 20 ppm (26).

2.2.8.3. Hierro (Fe).

Para satisfacer las necesidades de las plantas de tomate cherry, se recomienda una aplicación de hierro (Fe) de aproximadamente 3 a 8 kg/ha. El hierro es esencial para la síntesis de clorofila y la transferencia de electrones en la cadena de transporte de electrones durante la fotosíntesis. Además, desempeña un papel fundamental en la producción de energía y la síntesis de compuestos orgánicos. En el contexto del tomate cherry, el hierro beneficia a las plantas al promover un crecimiento vegetativo vigoroso y una producción de frutos saludable. El rango óptimo de hierro en el tejido foliar de las plantas de tomate cherry se encuentra generalmente alrededor de 100-200 ppm (18).

2.2.8.4. Molibdeno (Mo).

Para suplir las necesidades de las plantas de tomate cherry, se recomienda aplicar molibdeno (Mo) en cantidades muy bajas, generalmente en rangos de 20 a 100 g/ha. El molibdeno desempeña un papel fundamental en la fijación biológica del nitrógeno, ya que participa en la enzima nitrogenasa. Además, juega un papel importante en la activación de enzimas involucradas en la síntesis de aminoácidos y en la asimilación de nitrato. En el caso específico del tomate cherry, el molibdeno beneficia a las plantas al promover un crecimiento saludable y una correcta utilización del nitrógeno. Se considera que un rango óptimo de molibdeno en el tejido foliar de las plantas de tomate cherry se encuentra entre 0.1 y 2 ppm (19).

2.2.8.5. Zinc (Zn).

Para satisfacer los requerimientos de las plantas de tomate cherry, se recomienda aplicar alrededor de 0.5 a 2 kg/ha de zinc (Zn). El zinc juega un papel crucial en la síntesis de hormonas de crecimiento vegetal y enzimas, además de regular la fotosíntesis y la formación

de clorofila. En el contexto específico del tomate cherry, el zinc beneficia a las plantas al promover un desarrollo adecuado de las raíces, la producción de flores y frutos, y la resistencia al estrés. Se considera que un rango óptimo de zinc en el tejido foliar de las plantas de tomate cherry se sitúa generalmente entre 20 y 100 ppm (27).

2.2.9. Manganese (Mn)

Después del hierro, el manganeso es el nutriente más común en el suelo. El Mn se encuentra en tres valencias diferentes en el suelo: Mn^{2+} , Mn^{3+} y Mn^{4+} . Estas formas se encuentran en equilibrio debido a las reacciones de oxidación y reducción. Para la nutrición de las plantas, la forma principal de Mn es el Mn^{2+} , que se encuentra adsorbido en los coloides del suelo y es soluble en la solución del suelo en forma iónica o como quelato (28).

El Mn es un micronutriente esencial para las plantas de tomate cherry, aunque se requiere en menor cantidad en comparación con otros micronutrientes. Se sugiere aplicar entre 0.5 y 2 kg/ha de Mn para satisfacer sus necesidades. El Mn desempeña un papel clave en la fotosíntesis al actuar como cofactor de enzimas involucradas en la síntesis de clorofila (29).

Además, contribuye a la actividad antioxidante y facilita la asimilación de nitrógeno. En el caso específico del tomate cherry, el Mn beneficia a las plantas al promover un crecimiento equilibrado, la maduración adecuada de los frutos y una mayor resistencia a enfermedades. Se considera que un rango óptimo de Mn en el tejido foliar de las plantas de tomate cherry está entre 20 y 100 ppm (30).

El Mn y el magnesio comparten funciones bioquímicas en el organismo vegetal. Ambos nutrientes actúan como puentes entre el ATP y las enzimas que contienen grupos fosfoquinasas y fosfotransferasas. En el ciclo de Krebs, el Mn activa enzimas como la descarboxilasa y deshidrogenasa, aunque en algunas ocasiones, el magnesio puede actuar como sustituto. Además, existen otras enzimas que son activadas por el Mn y otros cationes (28).

2.2.9.1. Origen de la toxicidad del manganeso.

El manganeso (Mn) fue descubierto por el químico sueco Scheele en 1774 en Suecia. Sin embargo, no fue hasta 1817 que Johann Gann logró aislar el Mn y lo incluyó en una lista de otros elementos que había descubierto, la cual fue publicada en 1829 (31). Los estudios experimentales que han evaluado la aplicación de Mn en el suelo han reportado resultados diferentes y aunque algunos estudios han mostrado un incremento en el crecimiento de los cultivos, también se han observado efectos tóxicos significativos (32).

Uno de los primeros experimentos documentados sobre la aplicación de Mn en la agricultura se llevó a cabo en 1899 por el zoólogo y antropólogo italiano, Giglioli. En dicho experimento, se aplicó dióxido de Mn a una tasa de 1.14 quintales por hectárea (equivalente a 102 libras por acre) en cultivos de trigo. Los resultados obtenidos demostraron que, mientras una parte de la plantación experimentó un aumento en su rendimiento, otra parte disminuyó su producción (32).

Es importante destacar que existe una particularidad en cuanto a la sintomatología de la deficiencia y el exceso de Mn en las plantas, lo que puede dificultar su diagnóstico. Sin embargo, es necesario considerar que esta similitud en los síntomas puede variar dependiendo de la especie vegetal y las condiciones ambientales presentes, como la temperatura, la intensidad luminosa y la presencia de silicio en el suelo (33).

Cuando las plantas sensibles son cultivadas en suelos ácidos, el exceso de Mn es un problema común. Los síntomas que se observan generalmente se presentan en las hojas viejas y pueden incluir clorosis marginal, necrosis de hojas, raíces de color café oscuro, y manchas negras en los frutos. El exceso de Mn también interfiere con las enzimas, lo que disminuye la respiración, y se ha relacionado con la destrucción de auxinas (8).

2.2.9.2. Absorción, transporte y redistribución.

La absorción del Mn por las plantas es un proceso fundamental. Sin embargo, la presencia de otros cationes en la solución del suelo puede interferir en la absorción del Mn, ya que compiten por los sitios de unión en las raíces. Una vez que el Mn es absorbido, se transporta a través del xilema de la planta en forma de Mn^{2+} durante el proceso de transpiración. Es

importante tener en cuenta que el Mn tiene una movilidad limitada dentro de la planta, lo que significa que los síntomas de deficiencia se manifiestan primero en las hojas más jóvenes, donde el suministro de Mn es más escaso (29).

2.2.9.3. Deficiencia y toxicidad.

La deficiencia de Mn se manifiesta por un amarillamiento intervenal en las hojas nuevas, siendo más común la toxicidad que la falta de este micronutriente. La toxicidad se presenta en muchos cultivos y se puede corregir mediante la aplicación de cal. Los primeros síntomas de toxicidad son puntos de color marrón a lo largo de las nervaduras en las hojas nuevas, seguidos de necrosis rodeada por zonas cloróticas. En estos puntos, se produce la acumulación de óxido de Mn. Las hojas de las dicotiledóneas se deforman y se arrugan (28).

Como consecuencia de la deficiencia de Mn, las hojas se presentan más delgadas y tienen células en empalizada más pequeñas. Los tallos también se ven afectados, siendo de menor diámetro y conteniendo menos xilema. A menudo, se pueden observar células xilemáticas taponadas con material coagulado en las plantas que sufren de deficiencia de Mn. Además, se ha observado una disminución en la producción de ácido ascórbico (30).

2.2.10. Cultivos en soluciones hidropónicas

La palabra "hidroponía" se origina del griego "hydro", que significa agua, y "ponos", que significa trabajo. Este término describe un método de cultivo de plantas sin suelo, y su historia se remonta a los jardines colgantes de Babilonia. Actualmente, la hidroponía es una técnica muy utilizada en la investigación de la fisiología y nutrición de las plantas (20).

El método de cultivo hidropónico puede adoptar dos enfoques diferentes en cuanto al manejo de la solución nutritiva: abierto o cerrado. En el sistema abierto, la solución se aplica una sola vez al medio líquido y se descarta después de un tiempo determinado, mientras que en el sistema cerrado, se ajusta la solución nutritiva mediante la adición de nutrientes y se reutiliza (34). A continuación se mencionan los tipos de sistemas hidropónicos más utilizados.

2.2.10.1. Sistema de Raíz Flotante.

Las plantas son dispuestas en cestas o canastillas sin la presencia de suelo o sustrato. En este sistema, las raíces se sumergen por completo en una solución nutritiva y se utiliza un sistema de aireación para garantizar la disponibilidad de oxígeno (7).

2.2.10.2. Sistema NFT.

El sistema con sus siglas en ingles NFT (Nutrient Film Technique), se trata de un método de cultivo hidropónico donde las plantas se desarrollan con las raíces en contacto parcial con la solución nutritiva, la cual circula a través de canales para asegurar una correcta oxigenación de las raíces (22).

2.2.10.3. Aeroponía.

En el cultivo aeropónico, las plantas se desarrollan sin suelo o sustrato, suspendidas en el aire, y reciben nebulizaciones intermitentes de la solución nutritiva. Es importante proteger las raíces de la luz para evitar el crecimiento de algas (7).

2.2.10.4. Sistema NGS.

El NGS (New Growing System) es una modalidad de cultivo hidropónico, donde las plantas se colocan en canastillas sin sustrato y la solución nutritiva se drena hacia un depósito para luego ser bombeada nuevamente hacia las canastillas. A diferencia de otros sistemas, no se requiere un sistema de aireación ya que la oxigenación ocurre naturalmente durante la recirculación de la solución nutritiva (22).

2.2.10.5. Cultivo en sustrato.

Esta técnica permite el cultivo de plantas en sustratos inertes que brindan soporte y estabilidad a las raíces, así como condiciones óptimas de humedad y oxígeno para su crecimiento (21).

2.2.11. Solución nutritiva

Para lograr una producción elevada en el cultivo hidropónico, es esencial utilizar una solución nutritiva adecuada. Cuando se realiza un análisis para detectar deficiencias o toxicidad de nutrientes en las plantas, es importante prestar atención a las relaciones entre ellos, ya que esto puede indicar cómo la planta está extrayendo los nutrientes del medio de crecimiento (35).

Desde 1865, se ha investigado la composición de la solución nutritiva, y se han producido soluciones como la de Knopp. Sin embargo, a partir de 1933, las soluciones empezaron a incluir micronutrientes. Fue en este contexto que Hoagland y Arnon desarrollaron una solución nutritiva basada en sus estudios sobre nutrición mineral de plantas. En la actualidad, esta solución nutritiva es ampliamente utilizada en todo el mundo (36).

2.2.12. Factores a considerar en la producción de cultivos con raíz flotante

Hay que considerar varios factores para la producción de cultivos hidropónicos con el sistema de raíz flotante. Según (21), (7) y (22) indican que los más apropiados son los siguientes:

- **pH:** El rango de pH óptimo para la mayoría de los cultivos se sitúa entre 5.5 y 6.5.
- **Conductividad eléctrica:** La conductividad eléctrica de la solución nutritiva debe mantenerse dentro de ciertos rangos para asegurar que las plantas absorban los nutrientes necesarios y no se deshidraten debido a un exceso de sales. Se considera que el rango adecuado para la mayoría de los cultivos es de 1.5 a 3 mS/cm.
- **Presión osmótica:** La presión osmótica óptima para el manejo de soluciones nutritivas en cultivos hidropónicos se encuentra en el rango de 0.5 a 1 atm.
- **Temperatura:** Para evitar una absorción inadecuada de nutrientes, es esencial mantener la temperatura de la solución nutritiva dentro de ciertos rangos. Durante los meses más cálidos, la temperatura debe mantenerse entre 18 a 24 °C, mientras que durante los meses más fríos, se recomienda una temperatura de 13 a 16 °C. Esto ayuda a garantizar que las plantas reciban los nutrientes necesarios para su crecimiento óptimo.

2.2.13. Requerimientos del tomate en hidroponía

En comparación con los cultivos de tomate en campo, las plantas de tomate cultivadas en invernaderos tienden a ser más productivas. En promedio, una planta de tomate en invernadero puede producir entre 5 y 8 kg de tomates, mientras que una planta de tomate en un sistema hidropónico puede producir de 15 a 20 kg de tomates (4).

Hay una gran cantidad de información disponible sobre la solución nutritiva ideal para el cultivo del tomate, la cual se encuentra relacionada con las diferentes etapas fenológicas de la planta. La **tabla 2** presenta los niveles de concentración de nutrientes recomendados y utilizados con éxito en los cultivos comerciales de tomate (37).

Tabla 2

Valores de referencia para la composición de soluciones nutritivas para el cultivo de tomate Cherry.

Nutrientes	Valores de referencia (ppm)	Forma iónica preferencial
Nitrógeno	150 a 200	NO_3^- , NH_4^+
Fosforo	40 a 60	H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}
Potasio	250 a 350	K^+
Calcio	150 a 250	Ca^{2+}
Magnesio	40 a 60	Mg^{2+}
Azufre	50 a 150	SO_4^{2-}
Hierro	1.5 a 2.5	Fe^{2+}
Manganeso	0.5 a 0.8	Mn^{2+}
Boro	0.5 a 0.6	H_3BO_3
Zinc	0.1 a 0.2	Zn^{2+}
Cobre	0.1 a 0.2	Cu^{2+}
Molibdeno	0.001	Mo^{6+}

Fuente: (28)

Es fundamental tener en cuenta la relación entre los niveles de N:K al formular la solución nutritiva para el cultivo de tomates. La falta de consideración de esta relación puede resultar en un desequilibrio nutricional significativo. Es importante destacar que altos niveles de

salinidad pueden afectar las relaciones entre los nutrientes, y se sugiere mantener una presión osmótica de 0.4 atm para el óptimo crecimiento de las plantas de tomate en regiones tropicales. Así mismo, se recomienda realizar un análisis regular de la solución nutritiva para monitorear el consumo y realizar ajustes necesarios.

CAPÍTULO III
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Localización

La presente investigación se realizó en el invernadero ubicado en el campus Experimental “La María”, perteneciente a la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, ubicada en el Km 7.5 de la Vía Quevedo – El Empalme, Cantón Mocache, Provincia de Los Ríos, cuyas coordenadas geográficas son de 01° 05’ 02’’ de latitud Sur y 79° 29’ 54’ de longitud Oeste con una altitud de 66.1 metros. El ensayo tuvo su inicio en el mes de octubre de 2022 y tuvo una duración de 2 meses.

3.1.1. Características agroclimáticas

En la **tabla 3** se presentan las características agroclimáticas del campus Experimental “La María”.

Tabla 3

Características agroclimáticas de la Finca Experimental “La María” UTEQ.

Parámetros	Promedio
Temperatura media anual °C	24.8
Humedad relativa media anual %	80
Precipitación media anual mm	2252.2
Heliofanía promedio anual, horas luz (h)	894
Zona ecológica	Bosque Húmedo Tropical
Topografía	Plana

Fuente: INHAMI Estación meteorológica Pichilingue. Serie multianual 1971 – 2000

3.2. Tipo de investigación

Para evaluar los efectos del exceso de Mn en el cultivo del tomate, se utilizó una metodología experimental que involucró la comparación de información disponible en la literatura científica y en investigaciones previas. Se consideró especialmente la influencia directa que el exceso de Mn tiene en el rendimiento del cultivo, y se trabajó con el objetivo de identificar los límites críticos en los cuales el exceso de este elemento puede generar un impacto negativo en el desarrollo y producción de los tomates.

3.3. Método de investigación

Se aplicó el método deductivo-inductivo, el cual se caracteriza por ser un proceso que parte de observaciones y datos particulares para llegar a conclusiones universales a través de la lógica deductiva. De esta manera, se utilizaron inferencias basadas en hechos particulares para establecer afirmaciones universales que fueron aplicadas a casos específicos, lo que permitió obtener conclusiones precisas y significativas en cuanto al comportamiento del Mn en el cultivo de tomate.

3.4. Fuente de recopilación de información

3.4.1. Fuentes primarias

Así mismo, se consultaron fuentes primarias que estuvieran basadas en los datos obtenidos durante el desarrollo del experimento, tomando en cuenta las variables evaluadas de crecimiento, fisiología y sintomatología recolectadas en el mismo. Todo esto con el propósito de obtener una visión más completa y precisa sobre el tema abordado en este trabajo.

3.4.2. Fuentes secundarias

Para la elaboración de este trabajo se realizó una revisión de fuentes secundarias, incluyendo textos, revistas científicas, documentos y otros, con el objetivo de obtener información actualizada y relevante acerca del diagnóstico de la toxicidad del Mn. De esta manera, se buscó contar con datos adicionales que permitieran inferir o comparar los resultados obtenidos en el estudio realizado.

3.5. Diseño de la investigación

3.5.1. Factores de estudio

El estudio se centró en un único factor, compuesto por las diferentes concentraciones de Mn.

3.5.2. *Tratamientos*

Se establecieron 4 tratamientos, que consisten en la aplicación de Mn con diferentes dosis como se expresa en la **tabla 4**.

Tabla 4

Tratamientos de manganeso en diferentes concentraciones.

Tratamientos	Concentraciones de MnSO₄ (mg/L)	Volumen de la solución madre por L de la solución final ml/L
T1: Control	-	
T2: 15 ppm	41.22	1
T3: 40 ppm	109.93	
T4: 160 ppm	439.75	

3.5.3. *Diseño experimental*

Se utilizó un Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA) con un arreglo de parcelas divididas, para evaluar tanto los parámetros de crecimiento. Las parcelas principales se constituyeron por periodos de evaluación, mientras que las subparcelas se distinguieron por las concentraciones de Mn. Para los parámetros fisiológicos se utilizó un simple (DBCA) manteniendo la coherencia y uniformidad en el diseño experimental. En total, se establecieron cuatro tratamientos, cada uno con tres repeticiones. Cada repetición constó de 6 plantas por tratamiento, lo que resultó en un total de 18 plantas por réplica. Esta estructura se aplicó de manera idéntica para la evaluación de los parámetros fisiológicos.

Tabla 5

Esquema del modelo estadístico de parcelas divididas (DBCA).

Fuente de variación	Grados de libertad
Bloque	2
Días después de la siembra	6
Error A	12
Tratamiento	2

Días después de la siembra x Tratamiento	12
Error B	28
Total	62

Tabla 6

Esquema del análisis de varianza.

Fuente de variación	Grados de libertad
Bloque	2
Tratamiento	3
Error Experimental	6
Total	11

3.6. Instrumentos de la investigación

3.6.1. Manejo del experimento

3.6.1.1. Obtención de plantas: Procedimiento.

Para llevar a cabo el proceso de siembra de las semillas de tomate cherry, se siguieron rigurosamente las normas de comercialización especificadas en la etiqueta. Las semillas fueron tratadas adecuadamente y distribuidas uniformemente, colocando una semilla en cada celda de las bandejas germinadoras que estaban rellenas con un sustrato a base de turba. Para asegurar su adecuada protección y desarrollo, las semillas fueron recubiertas con una capa de turba de aproximadamente 1 cm de espesor.

Además, se garantizó la humedad del sustrato mediante riegos regulares. Durante la etapa de germinación, las bandejas fueron colocadas en un área sombreada para proporcionar las condiciones óptimas. Posteriormente, las bandejas de germinación fueron trasladadas al invernadero, donde las plantas recibieron riegos con una solución nutritiva de Hoagland y Arnon, de acuerdo a lo establecido en la **tabla 7**.

Después de dos semanas de la siembra, las plantas alcanzaron un estado de desarrollo adecuado y estuvieron listas para recibir los tratamientos correspondientes. Cabe destacar que

la siembra se realizó el 08 de octubre de 2022, la emergencia de las plántulas ocurrió a los 6 días de la siembra, el 10 de octubre de 2022, y finalmente, el trasplante a las bandejas con la solución nutritiva se llevó a cabo a los 18 días, el 22 de octubre de 2022.

3.6.1.2. Preparación de soluciones madre

a. Para las bandejas

Durante la fase inicial de crecimiento de las plántulas de tomate cherry, se aplicó una solución nutritiva basada en la fórmula de Hoagland y Arnon. Esta solución fue administrada en las bandejas germinadoras justo después de la emergencia de las plántulas, es decir, dos semanas después de su aparición. Las proporciones exactas de las diferentes soluciones madre utilizadas para preparar la solución de trabajo se encuentran detalladas en la **tabla 7**. Para obtener la solución final, se añadieron las cantidades específicas en mililitros (mL) a 5 litros de agua, correspondientes a la solución concentrada original de Hoagland y Arnon (1950). Es importante destacar que, debido a la sensibilidad de las plantas en esta etapa, se optó por diluir la solución original para evitar posibles daños fisiológicos en los cultivos.

Tabla 7

Solución nutritiva de Hoagland y Arnon diluida para regar las bandejas germinadoras.

Soluciones madre	(mL/5000 mL)	Regar con* (en mL)
KH ₂ PO ₄	0.5	2.5
KNO ₃	2.5	12.5
Ca (NO ₃) ₂ 5H ₂ O	2.5	Para 5000 mL 12.5
MgSO ₄ 7H ₂ O	1.0	5.0
Micronutrientes completos	0.5	2.5
Fe EDTA	0.5	2.5

Nota. De las soluciones madre, retirar la cantidad a ser regada*.

b. Para los tratamientos de las cajas de cultivo hidropónico.

Después de dos semanas de la emergencia de las plántulas de tomate cherry, se utilizó la solución nutritiva sin la dilución mencionada anteriormente, es decir, la solución de trabajo, que se mantuvo hasta el período final del experimento (8 semanas después de la emergencia).

Las proporciones en las que las diferentes soluciones madre entraron en la composición de las soluciones de trabajo se presentan en la **tabla 8**. Los números de mL se refirieron a la disolución en 1 L de soluciones finales, correspondientes a la solución original (concentrada) de Hoagland y Arnon (35).

Tabla 8

Composición de la solución nutritiva de Hoagland y Arnon (1950).

Fertilizantes/Sales de la solución madre	Concentración de la solución madre (g por L de agua)	Completo
		Volumen de la solución madre por L de la solución final -----mL/L-----
1-KH ₂ PO ₄ (Mol L ⁻¹)	136.09	1
2-KNO ₃ (Mol L ⁻¹)	101.11	5
3-Ca (NO ₃) ₂ 5H ₂ O (Mol L ⁻¹)	236.16	5
4-MgSO ₄ ·7H ₂ O (Mol L ⁻¹)	247.47	2
5-Solución de micros (*)	0.8	1
6-Solución Fe EDTA (**)	4.20	1

Nota. (*) En 1 L: 2.86 g H₃BO₃; 1.81 g MnCl₂·4H₂O; 0.10 g ZnCl₂; 0.04 g CuCl₂; 0.02 g H₂MoO₄·H₂O.

(**) 24.9 g FeSO₄·7H₂O o 24.25 g de FeCl₂·6H₂O; 33.2 g EDTA-Na; 89 mL NaOH 1N completar en 800 mL H₂O. Airear una noche bajo sombra, completar a 1 L de agua.

3.6.1.3. Conducción del ensayo.

El proceso de trasplante de las plántulas de tomate cherry se realizó utilizando un sistema hidropónico de raíz flotante. Primero, las plantas fueron aseguradas en el kit del sistema hidropónico mediante esponjas hidropónicas que las sujetaban por el cuello. A continuación, las plántulas fueron colocadas en las canastas junto con las esponjas hidropónicas y estas canastas fueron insertadas en la tapa plástica del sistema hidropónico de raíz flotante. Para garantizar una adecuada oxigenación, se mantuvo una constante aireación del sistema hidropónico a través de un tubo de plástico conectado a una manguera de silicona, por donde circulaba aire comprimido.

Además, se realizó un monitoreo diario del pH de la solución nutritiva, siendo necesario ajustarlo dentro del rango de 5.0 a 6.0. En caso de que el valor del pH fuera superior a 6.0, se

utilizó HCl 0.1N para disminuirlo, mientras que si el valor del pH era inferior a 5.0, se utilizó NaOH 0.1N para aumentarlo. Durante todo el proceso, se llevó a cabo un control periódico de plagas y enfermedades, utilizando productos adecuados para su control sin interferir con los nutrientes probados. Además, se renovó la solución nutritiva semanalmente para asegurar un suministro constante y óptimo de nutrientes para las plantas de tomate cherry en el sistema hidropónico.

En los sistemas hidropónicos balancear las condiciones de humedad y luminosidad son fundamentales para un óptimo desarrollo vegetativo. Las raíces se encuentran en contacto directo con el agua nutricionalmente enriquecida, por lo que se debe controlar y mantener dicha humedad entre el 50% y el 70% para evitar el estrés y enfermedades en las plantas. En cuanto a la luz, que es vital para la fotosíntesis, se utilizó luz artificial de dos focos amarillos los cuales se mantuvieron encendidos por un lapso de 12 horas diarias.

3.6.2. Variables a evaluar

Durante el desarrollo del estudio, se realizaron evaluaciones semanales que permitieron analizar de manera continua el progreso de las plantas de tomate cherry, además de identificar posibles alteraciones en su desarrollo y detectar cualquier sintomatología causada por el Mn. Esta información fue fundamental para comprender el estado general de las plantas y evaluar el efecto de los tratamientos aplicados en el estudio.

3.6.2.1. Parámetros de Crecimiento.

3.6.2.1.1. Altura.

En la primera semana, se utilizó una regla graduada para medir la altura de las plantas tomadas de la parcela neta. A los 20, 35, 50 y 65 días, se utilizó un flexómetro para medir la altura desde la base del tallo hasta el ápice de la hoja. Los valores se expresaron en cm.

3.6.2.1.2. Diámetro del tallo.

Se utilizó un calibrador de Vernier y se realizó la medición a una altura de 5 cm sobre la esponja. Las mediciones se llevaron a cabo a los 20, 35, 50 y 65 días después del trasplante. Los valores se expresaron en mm.

3.6.2.1.3. Número de hojas.

Se llevó a cabo un conteo de las hojas completamente expandidas de la parcela neta. Este recuento se realizó a los 20, 35, 50 y 65 días después del trasplante. Se consideraron únicamente aquellas hojas que habían alcanzado su pleno desarrollo, presentando un tamaño comparable al de las hojas que ya tenían más tiempo.

3.6.2.2. Parámetros fisiológicos.

3.6.2.2.1. Área foliar.

Se obtuvo por el método de relación peso:área (método del sacabocado o de cilindro de área conocida). Se analizó una hoja de la parte basal, media y apical de todas las plantas de la parcela neta y se extrajeron tres discos de tejido fresco de la lámina foliar obtenidos con el sacabocados. Luego se calculó el área foliar por planta a través de la relación entre el peso fresco total de las hojas y el área unitaria del disco, utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Área foliar} = \frac{\text{Peso total de las hojas} \times \text{Área del disco}}{\text{Peso promedio de los discos}}$$

3.6.2.2.2. Materia seca.

En este experimento, se sometió a las plantas a un secado en estufa por 24 horas a 60 °C para obtener el peso de materia seca de todas las plantas tomadas de la parcela neta. Los valores se expresaron en g.

3.6.2.2.3. Análisis químico de los macro y micronutrientes en la parte aérea de las plantas.

Los análisis foliares se consideraron un índice bastante preciso de la absorción de los diferentes elementos por la planta, ya que las hojas son muy sensibles a los cambios de composición del medio nutritivo. Se efectuaron análisis foliares de todos los tratamientos. Los valores se expresaron en g/kg.

3.6.2.3. Descripción de los síntomas de deficiencia.

Se comparó el tratamiento control con los tratamientos de las diferentes concentraciones y se describieron los síntomas, según la evolución que tuvieron a lo largo del tiempo, indicando el tipo de hojas en el que se iniciaron los síntomas, las formas de las clorosis o necrosis en las hojas, el tamaño de los entrenudos y de la planta, es decir, todas las diferencias entre los tratamientos (28).

3.7. Tratamiento de los datos

Los parámetros de crecimiento se evaluaron utilizando un diseño experimental de parcelas divididas en el tiempo. Se llevó a cabo un análisis de regresión para examinar las diferencias entre los tratamientos y comparar las medias correspondientes.

Los parámetros fisiológicos evaluados fueron sometidos a un análisis de varianza (ADEVA) y las comparaciones de las medias de los tratamientos se realizaron utilizando la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 95 %. Se llevaron a cabo pruebas estadísticas utilizando el programa RStudio 4.2.2 (38). Con el fin de obtener tablas y gráficos, los resultados previamente tabulados se transfirieron a Excel para realizar comparaciones, establecer relaciones entre variables y describir tendencias.

3.8. Recursos humanos y materiales

3.8.1. Recursos humanos

Para la elaboración de esta investigación se tuvo como recurso al director de tesis Ing. Erick Alberto Eguez Enriquez, M.Sc., y la autora de tesis Emily Yokasta Rivera Montiel.

3.8.2. *Materiales de campo*

- Semillas de tomate cherry
- Tierra negra
- Kit de cultivo de sistema hidropónico
- Bandejas de polietileno de 128 celdas
- Solución nutritiva correspondiente a la solución concentrada de Hoagland y Arnon (1:20), (**Tabla 8**).
- Mesa
- Focos
- PH metro
- Conductivímetro
- Agua destilada
- Regla graduada de 30 cm
- Calibrador de Vernier
- Pulverizadores a presión
- Flexómetro
- Cinta atadora agrícola
- Piola

3.8.3. *Materiales de laboratorio*

- Balanza
- Estufa
- Botellas plásticas
- Jeringas de 5, 10, 15 y 20 ml
- Agitador magnético de placas
- Espátula
- Agua destilada
- Barra magnética

- Pipeta
- Vaso de precipitación
- Erlenmeyer
- Vidrio de reloj
- Corta picos
- Bolsas de papel

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

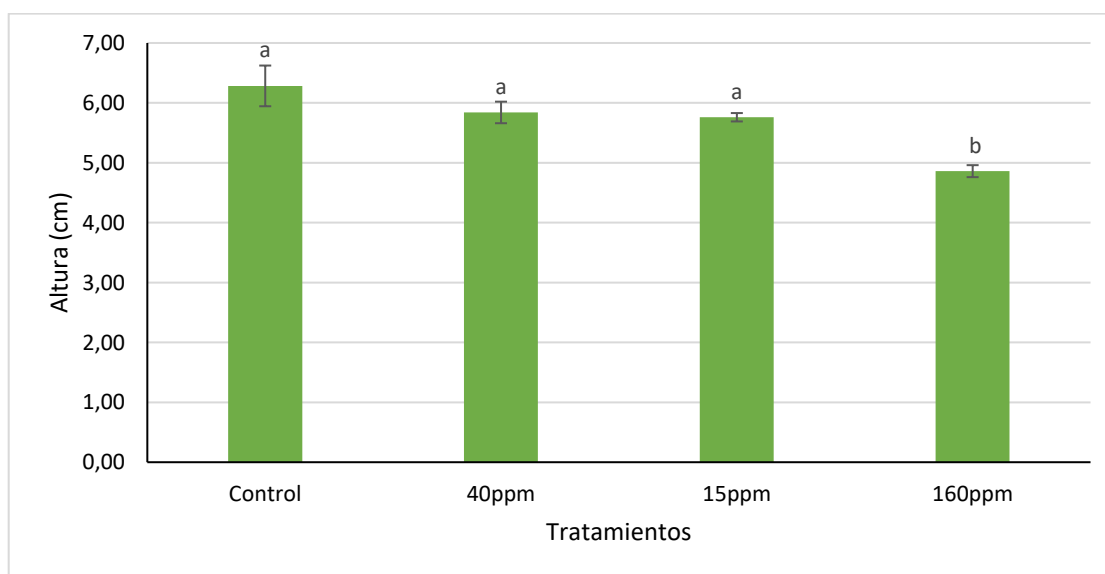
4.1. Evaluación de parámetros de crecimiento

4.1.1. Altura de plantas de tomate Cherry

El análisis de altura a los 8 días después de la siembra revela diferencias significativas para los tratamientos. En la **figura 1**, se observa que el tratamiento control, mostró la mayor altura promedio, con 6.28 cm. En las plantas que se trataron con 15 ppm y 40 ppm, se observó un ligero descenso en la altura media a 5.76 cm y 5.84 cm, respectivamente. Estas variaciones indican que los tratamientos con una concentración de Mn de 15 ppm y 40 ppm influyen de manera mínima en la altura de las plantas, en comparación con el tratamiento control. Es decir, no se observaron diferencias significativas entre estos tratamientos. Por otro lado, el tratamiento con la mayor concentración de Mn (160 ppm) presentó una reducción significativa en la altura media de las plantas, registrando 4.86 cm.

Figura 1

Altura de las plantas en el cultivo de tomate cherry a los 8 días después de la siembra.



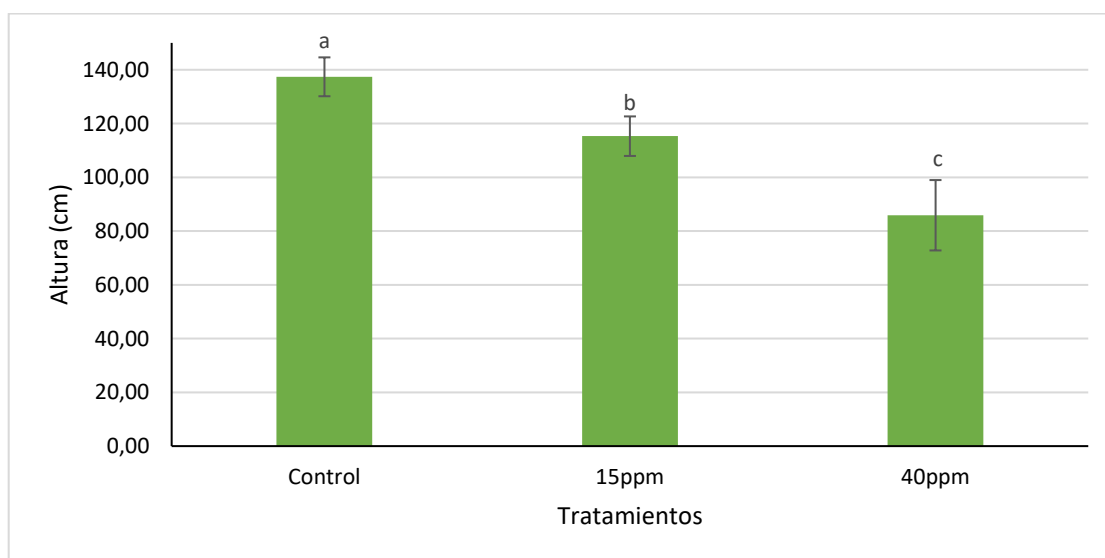
Nota. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según test de Tukey ($P < 0.05$). Las columnas corresponden al promedio de los tratamientos y las barras al error experimental.

A los 50 días las plantas del tratamiento control, mostraron la mayor altura media, con un valor de 137.38 cm. El tratamiento con una concentración de 15 ppm de Mn presentó una altura media de 115.30 cm. Esto sugiere que este nivel de Mn puede haber afectado el crecimiento de las plantas, ya que esta altura media es menor en comparación con el

tratamiento control. Finalmente, las plantas que recibieron un tratamiento de 40 ppm de Mn mostraron la menor altura media, con un valor de 85.88 cm. Esta reducción de la altura es más pronunciada en comparación con el tratamiento control y el tratado con 15 ppm de Mn, ya que indica que una mayor concentración de este elemento puede tener un impacto negativo más significativo en la altura de las plantas. El análisis de varianza para altura durante la época de evaluación presento diferencias significativas para la interacción (**Figura 2**). Tras 8 días de exposición al Mn, resultó imposible evaluar el tratamiento con 160 ppm de Mn, ya que la concentración resultó ser excesiva y provocó la muerte de las plantas.

Figura 2

Altura de las plantas en el cultivo de tomate cherry a los 50 días después de la siembra.



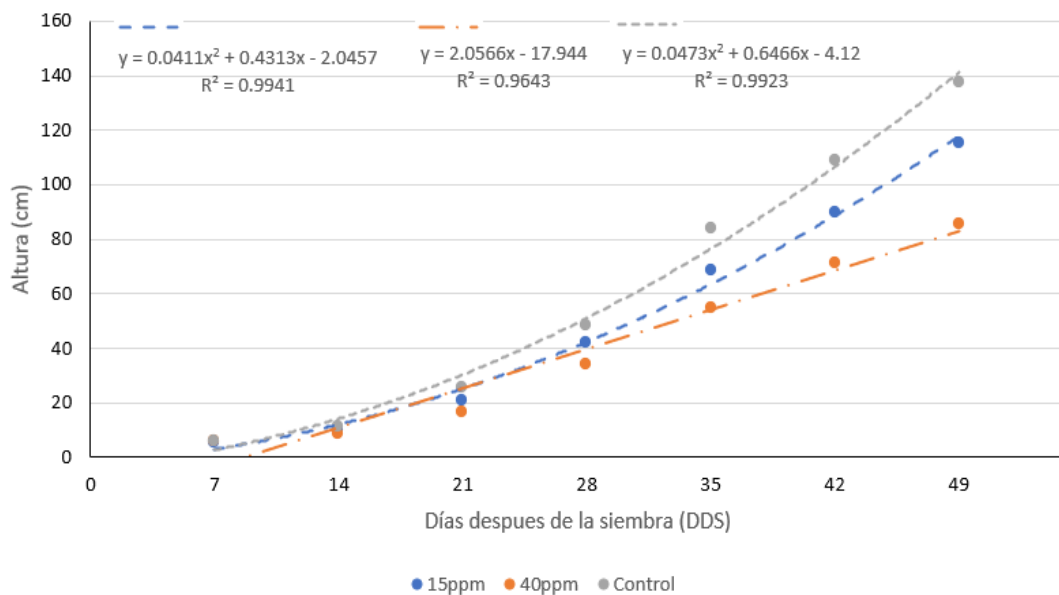
Nota. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según test de Tukey ($P < 0.05$). Las columnas corresponden al promedio de los tratamientos y las barras al error experimental.

En la **figura 3**, que presenta los modelos de regresión obtenidos para las variables de altura entre los 8 a 50 días después de la siembra, se identifican diferentes tipos de respuestas según el tratamiento aplicado. Para los tratamientos de 15 ppm de Mn y el control, la respuesta es cuadrática positiva, lo que indica un crecimiento acelerado en estos grupos. Por otro lado, el tratamiento de 40 ppm de Mn muestra una respuesta lineal positiva, lo que sugiere una tasa de crecimiento constante a lo largo del tiempo. Además, los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos presentan valores elevados, indicando una fuerte correlación entre la altura de las plantas y los días transcurridos después del trasplante. En particular, los tratamientos control y 15 ppm de Mn mostraron un R^2 de 0.99, mientras que para el tratamiento de 40 ppm, el R^2 fue de 0.96.

Los resultados representados evidencian diferentes patrones de crecimiento en función del tratamiento aplicado. Tanto para el tratamiento control como para el de 15 ppm de Mn, se observa un crecimiento inicial más lento que parece acelerarse a partir de los 28 días después del trasplante. Por otro lado, el tratamiento de 40 ppm de Mn presenta un patrón de crecimiento constante, sin importar el tiempo transcurrido. En cuanto a la altura promedio, los valores más altos se registraron para los tratamientos control y 15 ppm de Mn en las mediciones entre los 35 y 49 días después del trasplante (**Figura 3**).

Figura 3

Variabilidad en la altura de las plantas de tomate cherry a los 7, 14, 21, 28, 35, 42 y 49 días después de la siembra.



Nota. Los tres modelos representan diferentes relaciones entre la altura y los días después de la siembra. Las líneas representan la tendencia del modelo, y los puntos indican los datos obtenidos.

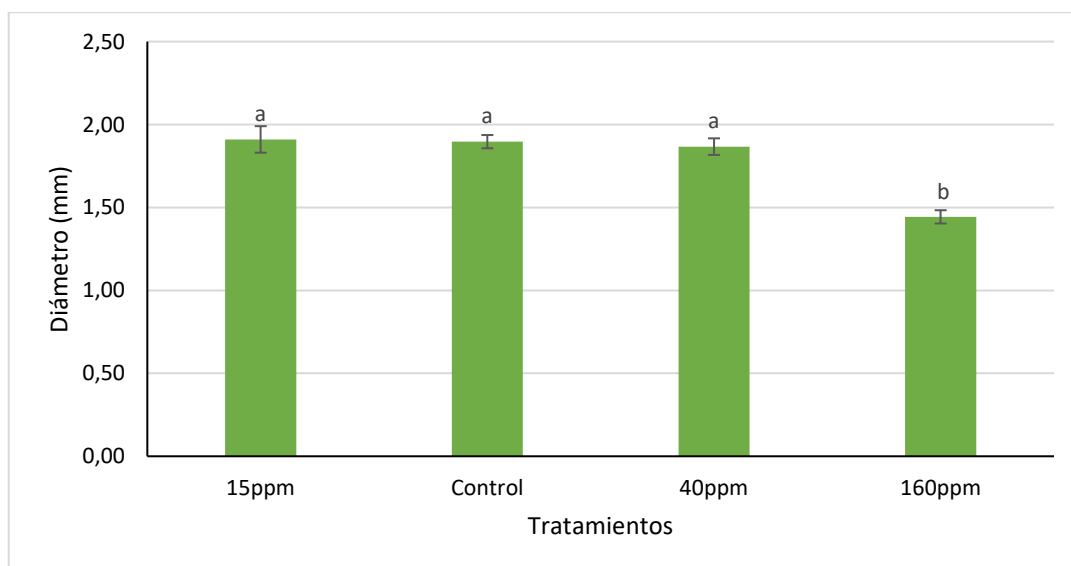
4.1.2. Diámetro de tallo de plantas de tomate Cherry

El análisis del diámetro a los 8 días después de la siembra indica que se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos. En la **figura 4**, muestra que los tratamientos de 15 ppm y 40 ppm de Mn, así como las plantas del tratamiento control, presentaron un diámetro promedio mayor a los 8 días después del trasplante obteniéndose valores de 1.91 mm, 1.87 mm y 1.90 mm, respectivamente. Estas diferencias sugieren que los tratamientos control y las tratadas de 15 ppm y 40 ppm tienen un efecto mínimo en el diámetro de las plantas. Sin embargo, el grupo de plantas que fueron tratadas con 160 ppm tuvo el diámetro

promedio más pequeño con 1.44 mm, esto indica que este tratamiento presenta un efecto negativo sobre el crecimiento en diámetro de las plantas.

Figura 4

Diámetro de tallo de plantas de tomate cherry a los 8 días después de la siembra.



Nota. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según test de Tukey ($P < 0.05$).

Las columnas corresponden al promedio de los tratamientos y las barras al error experimental.

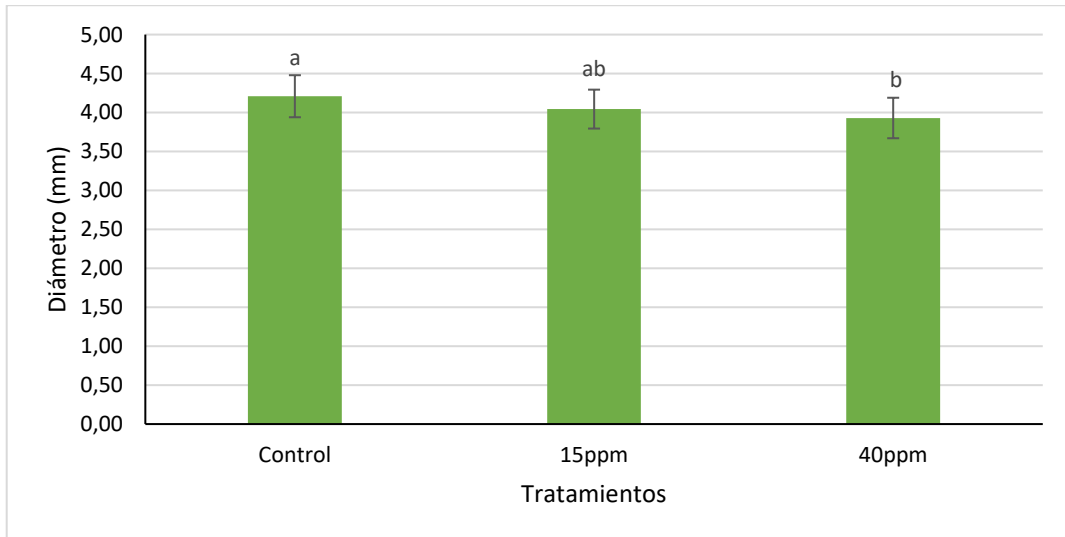
El análisis de varianza realizado para evaluar el diámetro durante un periodo de 50 días después del trasplante reveló diferencias significativas para tratamientos y para el periodo de evaluación y no se observó diferencias significativas para la interacción entre los tratamientos y días de evaluación. Según los resultados obtenidos, se observa en la **figura 5** que las plantas del tratamiento control presentaron el mayor diámetro promedio, con un valor de 4.21 mm. Por otro lado, el segundo mayor diámetro promedio se encontró en las plantas tratadas con 15 ppm de Mn con un diámetro promedio de 4.04 mm. En cuanto al tratamiento con una concentración de 40 ppm de Mn, se registró el diámetro promedio más pequeño con un valor de 3.93 mm. Estos resultados subrayan la influencia de los distintos tratamientos sobre el desarrollo del diámetro de las plantas a lo largo del periodo de observación.

La **figura 6**, presenta el modelo de regresión que evidencia una relación cuadrática negativa entre el diámetro del tallo y los días transcurridos después de la siembra, ilustrando un incremento progresivo en el diámetro a medida que pasa el tiempo. Se obtuvo un coeficiente

de determinación (R^2) de 0.99, lo cual respalda una fuerte correlación cuadrática entre el diámetro del tallo y el tiempo.

Figura 5

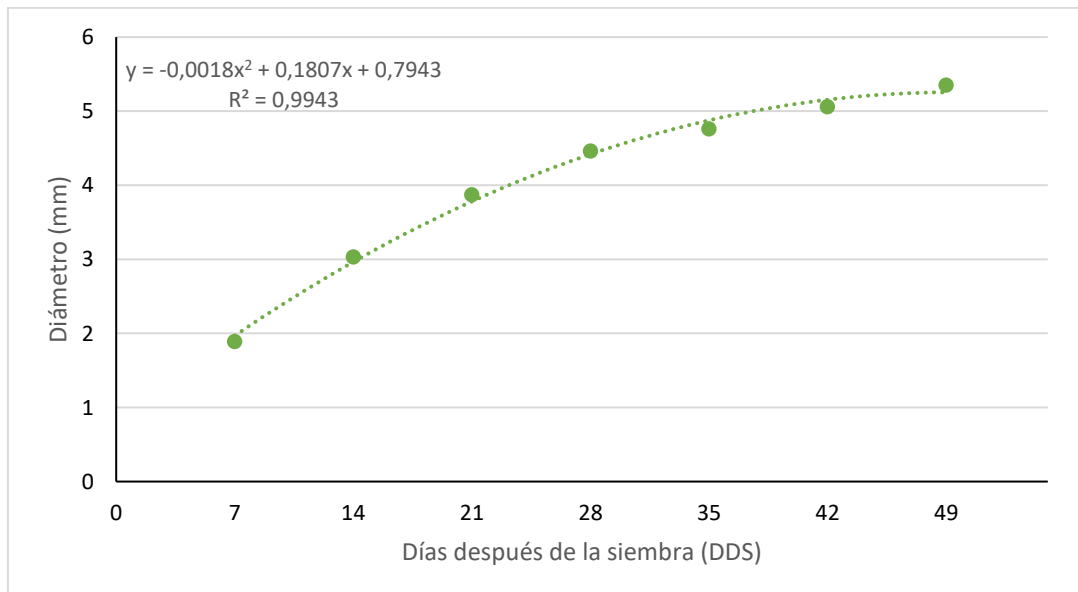
Diámetro de tallo de plantas de tomate cherry a los 49 días después de la siembra.



Nota. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según test de Tukey ($P < 0.05$). Las columnas corresponden al promedio de los tratamientos y las barras al error experimental.

Figura 6

Variabilidad en el diámetro de tallo del tomate cherry a los 7, 14, 21, 28, 35, 42 y 49 días después de la siembra.



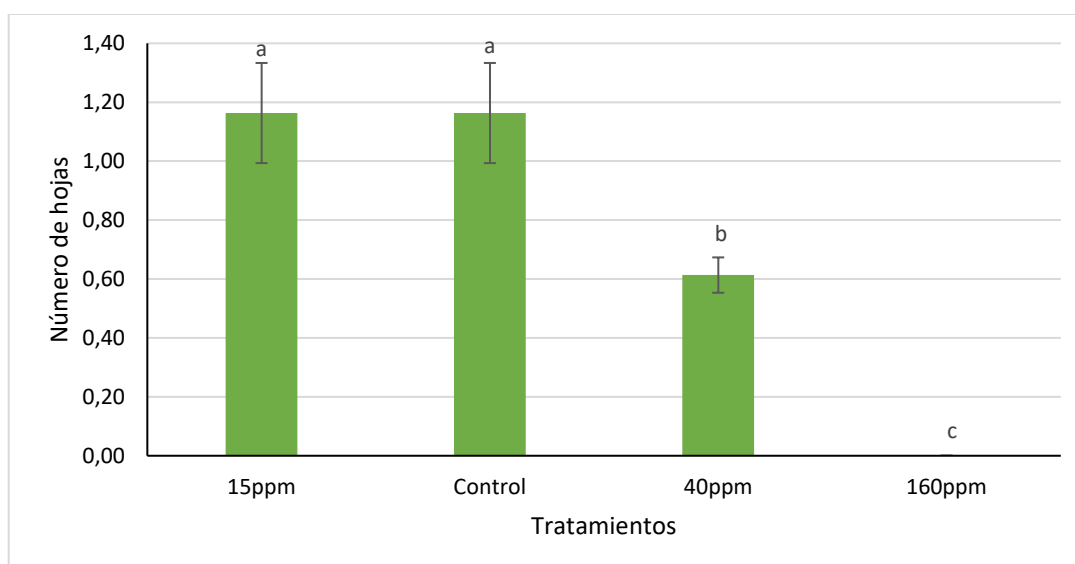
Nota. El modelo representa una fuerte relación entre el diámetro del tallo y el tiempo transcurrido, y los puntos indican los datos obtenidos.

4.1.3. Número de hojas de tomate Cherry

El análisis del número de hojas a los 8 días revela diferencias significativas entre los tratamientos. En la **figura 7** se puede observar que el tratamiento con 15 ppm de Mn, el número promedio es de 1.16 hojas, igual al tratamiento control, indicando que no hay diferencia significativa en el número de hojas entre estas dos condiciones. El tratamiento con 40 ppm de Mn resulta con un menor número promedio de hojas con 0.61. Por último, el tratamiento con 160 ppm no presenta hojas, su media es de 0 hojas, este tratamiento muestra una diferencia significativa respecto a los tratamientos evaluados, lo que indica que este tratamiento tiene un impacto negativo en el crecimiento de las hojas de tomate.

Figura 7

Número de hojas del cultivo de tomate cherry a los 8 días después de la siembra.



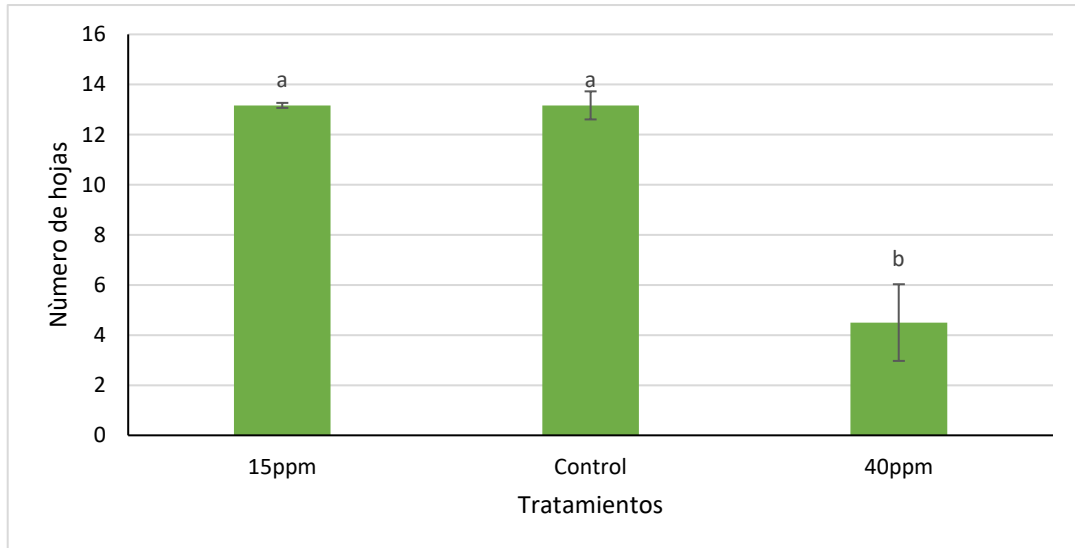
Nota. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según test de Tukey ($P < 0.05$). Las columnas corresponden al promedio de los tratamientos y las barras al error experimental.

El análisis de varianza del número de hojas durante la evaluación hasta los 50 días después del trasplante reveló diferencias significativas en la interacción de los tratamientos (**Figura 8**). Se observó que tanto las plantas del tratamiento control como las de las plantas tratadas con una concentración de 15 ppm de Mn presentaron un promedio de 13.16 hojas, lo que implica que no hay diferencias estadísticamente significativas en el número de hojas entre estos dos tratamientos. Por otra parte, en el tratamiento de 40 ppm de Mn, se observa un promedio notablemente inferior, con 4.5 hojas, lo que indica una diferencia estadísticamente

significativa en el número de hojas en comparación con los tratamientos de 15 ppm de Mn y control.

Figura 8

Numero de hojas del cultivo de tomate cherry a los 50 días después de la siembra.



Nota. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según test de Tukey ($P < 0.05$).

Las columnas corresponden al promedio de los tratamientos y las barras al error experimental.

En la **figura 9**, se presentan los modelos de regresión obtenidos para los parámetros de crecimiento, los cuales revelan diferentes respuestas según el tratamiento aplicado en relación con el número de hojas. Tanto el tratamiento de 15 ppm de Mn como el control muestran una respuesta lineal positiva entre el tiempo transcurrido y el número de hojas, evidenciando un aumento gradual a medida que pasa el tiempo. Por otro lado, el tratamiento de 40 ppm de Mn presenta una respuesta cuadrática negativa, esto sugiere que el número de hojas incrementa inicialmente hasta llegar a un punto de inflexión alrededor de los 40 días después de la siembra.

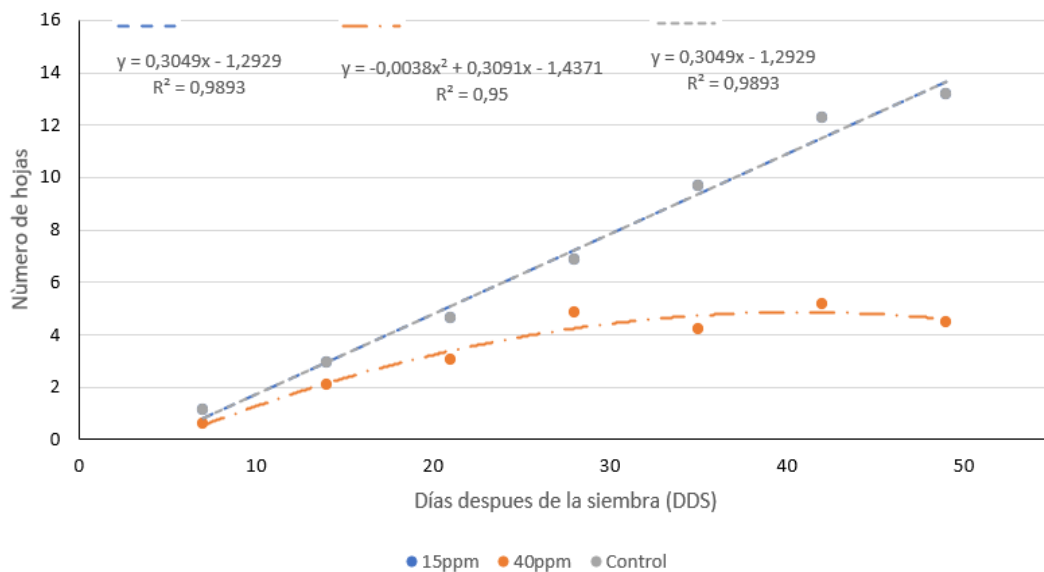
Los tratamientos de 15 ppm de Mn y control presentaron un coeficiente de determinación (R^2) de 0.99, lo que indica que existe correlación entre el tiempo y el aumento del número de hojas. En contraste, el tratamiento de 40 ppm de Mn exhibió un R^2 ligeramente inferior de 0.95, que aún denota una correlación fuerte.

Cabe resaltar que los patrones de crecimiento foliar varían dependiendo del tratamiento implementado. Tanto en el tratamiento control como en el tratamiento de 15 ppm de Mn, se

evidencia un crecimiento foliar constante, es decir, el número de hojas se incrementa de manera regular con el paso del tiempo. Por otro lado, el comportamiento en el tratamiento de 40 ppm de Mn es distinto. En este caso, se observa una progresión inicial de aumento en el número de hojas conforme avanza el tiempo. No obstante, este incremento llega a un pico o máximo alrededor de los 40 días después de la siembra, a partir del cual comienza a decrecer.

Figura 9

Variabilidad en el número de hojas de tomate cherry a los 7, 14, 21, 28, 35, 42 y 49 días después de la siembra.



Nota. Los tres modelos representan diferentes relaciones entre el número de hojas y los días. Las líneas representan la tendencia del modelo, y los puntos indican los datos obtenidos.

4.2. Evaluación de parámetros fisiológicos

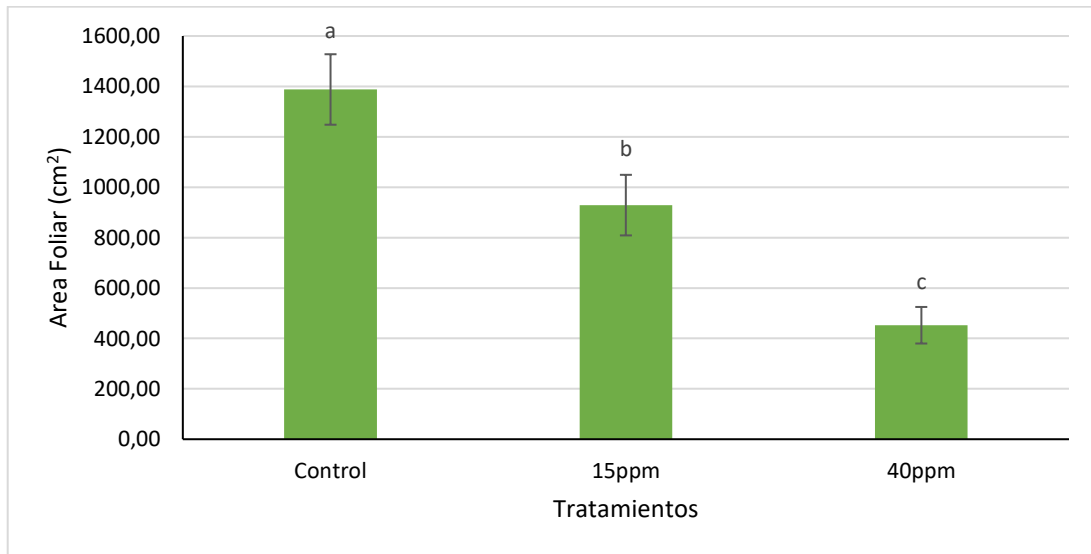
4.2.1. Área foliar

El análisis del área foliar revela diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. En la **figura 10**, se observa que el tratamiento control exhibe el mayor promedio de área foliar, con 1387.82 cm². Por otro lado, las plantas tratadas con una concentración de 15 ppm de Mn muestran una media de área foliar más baja, con un valor de 929.02 cm². Se observa reducción en el tratamiento con una concentración de 40 ppm de Mn, que registra la media más baja de área foliar con un valor de 452.33 cm².

En contraste, los tratamientos con concentraciones de 15 ppm y 40 ppm de Mn muestran medias de área foliar más bajas, lo que sugiere que estas concentraciones de Mn muestran un posible efecto negativo en el crecimiento y desarrollo foliar.

Figura 10

Área foliar de tomate cherry.



Nota. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según test de Tukey ($P < 0.05$). Las columnas corresponden al promedio de los tratamientos y las barras al error experimental.

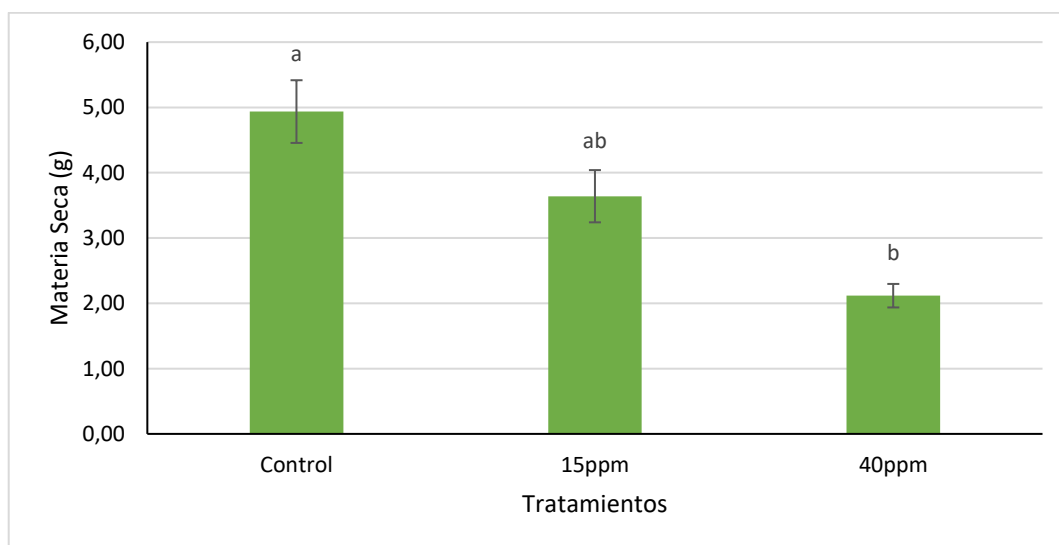
4.2.2. Materia seca

El análisis de la materia seca pone de manifiesto diferencias significativas entre los tratamientos en estudio. Conforme se aprecia en la **figura 11**, el tratamiento control resaltó por tener la media más alta de materia seca, con un valor de 4.94 g. En contraposición, el tratamiento con una dosis de 15 ppm de Mn presentó una media levemente más baja en materia seca, situándose en 3.64 g. Acentuando esta tendencia descendente, el tratamiento con una concentración de 40 ppm de Mn registró la media más reducida en términos de materia seca, con un valor de 2.12 g.

Por el contrario, los tratamientos con concentraciones de 15 ppm y 40 ppm de Mn presentaron medias más bajas de materia seca, lo que sugiere un efecto negativo en el crecimiento y acumulación de biomasa en comparación con el tratamiento control.

Figura 11

Materia seca de tomate cherry.



Nota. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según test de Tukey ($P < 0.05$). Las columnas corresponden al promedio de los tratamientos y las barras al error experimental.

4.2.3. Análisis químico de los macronutrientes en la parte aérea de las plantas

En el análisis químico de los macronutrientes se examinaron los niveles de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre en plantas sometidas a diferentes tratamientos, se revela diferencias significativas entre los tratamientos evaluados.

Para el nitrógeno, el tratamiento control obtuvo la media más alta con 19.25 g/kg, seguido por el tratamiento de 15 ppm de Mn con 7.62 g/kg y el de 40 ppm de Mn con 5.93 g, sugiriendo una reducción en la concentración de nitrógeno a medida que aumenta la concentración de Mn. En cuanto al fósforo, también el tratamiento control presentó la media más alta con 3.70 g/kg. Los tratamientos de 15 ppm y 40 ppm de Mn obtuvieron medias menores con 1.489 g y 1.59 g/kg respectivamente.

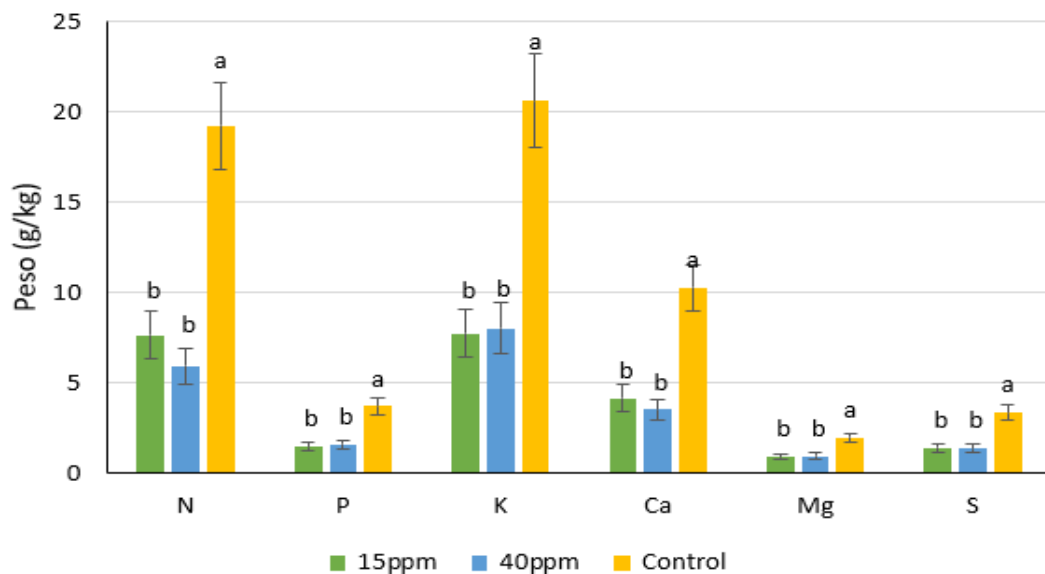
Para el potasio, la tendencia se mantuvo, siendo el tratamiento control el que tuvo la mayor media con 20.64 g/kg, y las medias de los tratamientos 15 ppm y de 40 ppm de Mn fueron de 7.75 g y 8.02 g/kg respectivamente. El calcio con el tratamiento control presentando la media más alta con 10.27 g/kg, y las medias para los tratamientos de 15 ppm y 40 ppm de Mn fueron de 4.17 g y 3.517 g/kg respectivamente.

El magnesio con el tratamiento control obteniendo la mayor media con 1.97 g/kg y los tratamientos de 40 ppm y 15 ppm de Mn obteniendo medias de 0.95 g y 0.91 g/kg, respectivamente. Finalmente, para el azufre, el tratamiento control tuvo la mayor media con 3.36 g/kg, mientras que las medias para los tratamientos de 15 ppm y 40 ppm de Mn fueron de 1.40 g y 1.383 g respectivamente.

Todos los nutrientes estudiados, el tratamiento control presentó los mayores valores, lo que podría indicar que la aplicación de diferentes concentraciones de Mn reduce la concentración de estos macronutrientes en los cultivos de tomate.

Figura 12

Macronutrientes presentes en las plantas de tomate cherry.



Nota. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según test de Tukey ($P < 0.05$).

Las columnas corresponden al promedio de los tratamientos y las barras al error experimental.

4.2.4. Análisis químico de los micronutrientes en la parte aérea de las plantas

En el análisis químico de los micronutrientes se examinaron los niveles de zinc, cobre, hierro, molibdeno y boro en plantas sometidas a concentraciones de Mn, se revela diferencias significativas entre los tratamientos evaluados.

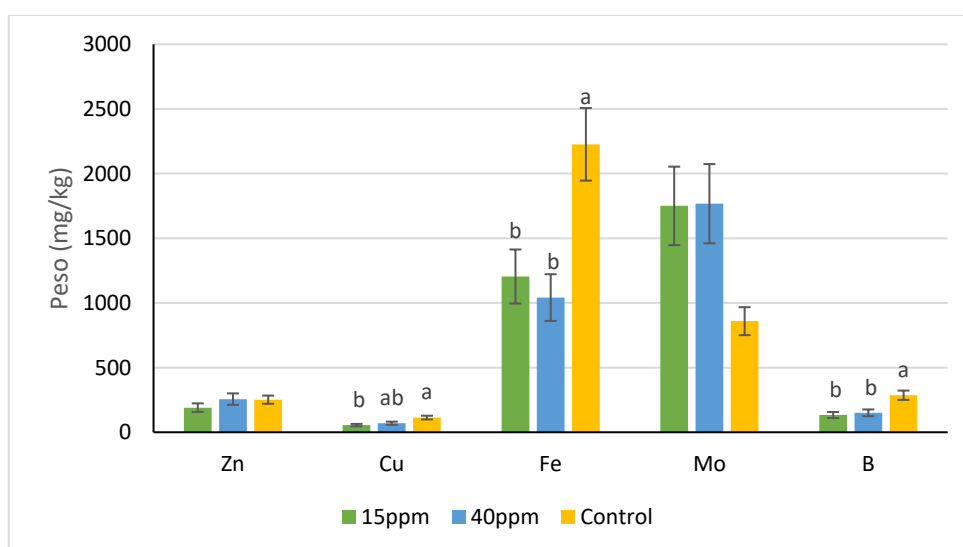
El zinc mostró una concentración más alta en las plantas tratadas con 40 ppm de Mn (256.12 mg/kg), seguido por las plantas del tratamiento control (251.77 mg/kg). Sin embargo, las plantas tratadas con 15 ppm de Mn mostraron la menor concentración de zinc con 190.5 mg/kg. En cuanto al cobre, las plantas del tratamiento control mostraron la mayor concentración media (113.54 mg/kg), mientras que las plantas tratadas con 15 ppm y 40 ppm de Mn mostraron concentraciones medias más bajas de 55.03 mg/kg y 69.85 mg/kg, respectivamente.

El hierro mostró una respuesta similar al cobre, con respecto al tratamiento control exhibiendo la mayor concentración media de 2226.44 mg/kg. Las plantas tratadas con 15 ppm y 40 ppm de Mn mostraron concentraciones más bajas de 1204.38 mg/kg y 1041.40 mg/kg, respectivamente. El molibdeno mostró un patrón distinto. Las plantas tratadas con 15 ppm y 40 ppm de Mn exhibieron concentraciones más altas, con 1750.48 mg/kg y 1767.42 mg/kg, respectivamente, en comparación con el tratamiento control que mostró una concentración significativamente más baja de 858.98 mg/kg.

Finalmente, en cuanto al boro, las plantas del tratamiento control tuvieron la mayor concentración media de 286.33 mg/kg. Las plantas tratadas con 40 ppm y 15 ppm de Mn mostraron concentraciones más bajas de 150.28 mg/kg y 133.35 mg/kg, respectivamente.

Figura 13

Micronutrientes presentes en las plantas de tomate cherry.



Nota. Letras distintas indican diferencia significativa entre tratamientos, según test de Tukey ($P < 0.05$).

Las columnas corresponden al promedio de los tratamientos y las barras al error experimental.

4.3. Descripción de los síntomas de toxicidad

El estudio evaluó el efecto de diferentes concentraciones de manganeso en plantas de tomate cherry en hidroponía. El tratamiento 2 (15 ppm de Mn) causó deformaciones y arrugas foliares (**Figura 14**), crecimiento vegetativo reducido y retraso en la floración. Además, se observó una mayor demanda de agua. El tratamiento 3 (40 ppm de Mn) produjo síntomas más severos, con hojas más verdes, deformadas y arrugadas, necrosis foliar (**Figura 15**), acortamiento de los entrenudos y menor altura. A pesar de la aparición de brotes florales, estos abortaron, demostrando un impacto negativo en la capacidad reproductiva. Finalmente, el tratamiento 4 (160 ppm de Mn) fue claramente perjudicial, causando manchas oscuras en las hojas, raquitismo en los tallos y muerte de las plantas al cabo de la segunda semana debido a la toxicidad del manganeso (**Figura 17**).

Tabla 9

Síntomas del efecto del manganeso en cada uno de los tratamientos evaluados.

Tratamiento	Clorosis	Necrosis	Deformación hojas	Retraso en el crecimiento	Alteración en absorción de nutrientes	Disminución del tamaño entrenudos	Muerte
T1: Control							
T2: 15 ppm de Mn	X		X	X			
T3: 40 ppm de Mn	X	X	X	X		X	
T4: 160 ppm de Mn	X	X	X	X		X	X

Figura 14

Tratamiento 2 con una concentración de manganeso de 15 ppm en plantas de tomate cherry.



Nota. En la figura se observa hojas jóvenes arrugadas.

Figura 15

Tratamiento 3 con una concentración de manganeso de 40 ppm en plantas de tomate cherry.



Nota. En la figura se observa la presencia de hojas necróticas en el día 14.

Figura 16

Tratamiento 3 con una concentración de manganeso de 40 ppm en plantas de tomate cherry.



Nota. En la figura se puede apreciar la caída de hojas muertas de la planta en el día 16.

Figura 17

Tratamiento 4 con una concentración de manganeso de 160 ppm en plantas de tomate cherry.



Nota. En la figura se muestra el deterioro de todas las plantas, culminando con su muerte en el día 8.

4.4. Discusión

En el presente estudio se encontró que diferentes concentraciones de Mn tienen efectos significativos en la altura, el diámetro y el número de hojas de las plantas. En particular, la mayor concentración de Mn (160 ppm) parece tener un efecto inhibitorio notable, lo que resulta en una menor altura, diámetro y número de hojas llevando las plantas a la muerte. Según Dziwornu et al., se centraron en la absorción y translocación de Mn en las plantas. Encontraron una correlación negativa entre la concentración de Mn en los brotes y la longitud relativa de los brotes, y una correlación positiva entre la concentración de Mn en los brotes y el LDI (Leaf Damage Index). Esto sugiere que a medida que aumenta la concentración de Mn en los brotes, se produce una disminución en la longitud de los brotes, posiblemente debido a la toxicidad del Mn. Sin embargo, también destacaron que algunos genotipos muestran características únicas, ya sea acumulando menos Mn en los brotes a pesar de tener altas concentraciones en las raíces, o viceversa. Por último, Liu et al., (40) informa que el exceso de Mn no tuvo efectos negativos en el crecimiento y la producción de plátano, lo que sugiere que esta planta puede soportar altos niveles de Mn.

A bajas concentraciones, el Mn puede estimular el crecimiento de las plantas, pero a altas concentraciones puede tener efectos tóxicos. Sin embargo, también parece que diferentes plantas tienen diferentes niveles de tolerancia al Mn, como lo demuestra el estudio de Liu et al., (40). Al aumentar la concentración de Mn (hasta 40 ppm), se observa una disminución tanto en el área foliar como en la materia seca de las plantas. Esto es coherente con los resultados encontrados por Santos et al., (6) y Vargas (41), quienes también demostraron que el aumento de la concentración de Mn puede reducir la acumulación de materia seca y afectar negativamente el crecimiento de las plantas. Según Santos et al., (6), mostraron que la toxicidad del Mn en las plantas de soya se observó principalmente en los brotes, sin afectar la acumulación de masa seca de las raíces. En su estudio, la producción de materia seca fue mayor en el tratamiento control ($2 \mu\text{mol L}^{-1}$), y los tratamientos con mayores concentraciones de Mn mostraron una reducción de hasta un 21% en la masa seca. Esto concuerda con los resultados de este experimento ya que se observó una disminución en la materia seca a medida que aumentaba la concentración de Mn. Por otro lado, Vargas (41) también encontraron que la toxicidad del Mn inhibía el crecimiento de la soya, lo que se reflejaba en una disminución del peso fresco y un aumento de las manchas marrones en las hojas. Con el aumento de las concentraciones de Mn, el peso fresco de los brotes y las raíces disminuyó,

y la densidad de las manchas marrones aumentó. Estos resultados también coinciden con esta investigación, ya que se observó una disminución en el área foliar (que podría estar relacionada con la aparición de manchas marrones) a medida que aumentaba la concentración de Mn. Finalmente, los resultados obtenidos por Bazán et al., (42) indican que el tratamiento control (que contenía Fe, Mg y Mn) fue el más efectivo, lo que sugiere que una combinación balanceada de estos nutrientes puede ser beneficiosa para el crecimiento de las plantas. Esto coincide con nuestros hallazgos, ya que el tratamiento control también mostró los mejores resultados en términos de área foliar y materia seca. Es evidente que tanto en este estudio como en el de Santos et al., (6), se observan daños causados por la toxicidad del Mn en las plantas, aunque se presentan algunas diferencias, posiblemente debido a las especies vegetales y concentraciones de Mn utilizadas.

En el presente estudio, se observó necrosis en las hojas de las plantas expuestas a altas concentraciones de Mn, específicamente en el tratamiento 3 y el tratamiento 4 (40 ppm y 160 ppm de Mn, respectivamente), junto con deformidades y arrugas. De manera similar, el estudio de Santos et al., (6) encontró áreas necróticas en las hojas de las plantas de soja expuestas a altas concentraciones de Mn. Además, en este estudio se notó un crecimiento reducido y síntomas de raquitismo en las plantas del tratamiento 3 y el tratamiento 4, y se observó que las plantas del tratamiento 4 no sobrevivieron más allá de la segunda semana debido a la toxicidad extrema del Mn.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- La toxicidad del manganeso en las plantas de tomate cherry cultivadas mediante hidroponía se evidencia en varios grados, dependiendo de la concentración administrada. Se observó que, mientras una concentración moderada (15 ppm) provoca síntomas leves como crecimiento vegetativo reducido las concentraciones más altas (40 y 160 ppm) pueden causar problemas más graves, incluyendo deformaciones y necrosis foliar, y en el caso más extremo, la muerte de las plantas.
- El método experimental seleccionado, que utilizó un diseño de bloques completamente al azar (DBCA) con un arreglo de parcelas divididas, demostró ser efectivo para evaluar los parámetros de crecimiento y fisiológicos, así como para documentar los síntomas de deficiencia asociados a cada nivel de concentración de manganeso.
- Aunque el manganeso es un micronutriente esencial para las plantas, su uso en exceso en el sistema de cultivo hidropónico puede resultar perjudicial, especialmente en lo que respecta al aparato fotosintético de las plantas. Esto subraya la importancia de una administración cuidadosa de los micronutrientes en los sistemas de cultivo hidropónico para asegurar un crecimiento y desarrollo óptimos de las plantas.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda un monitoreo cuidadoso y regular de la concentración de manganeso por medio de un análisis de suelo ya que esto permitirá ajustar las concentraciones según sea necesario para evitar la toxicidad y asegurar el crecimiento saludable de las plantas de tomate cherry.
- La detección temprana de los signos de toxicidad por Mn es vital. Los síntomas como el arrugamiento de las hojas, la aparición de manchas necróticas y la deformación del crecimiento pueden indicar una concentración excesiva de Mn. Un diagnóstico temprano puede ayudar a corregir el problema antes de que tenga consecuencias graves para la planta.
- Debido a los diferentes grados de respuesta de las plantas de tomate cherry a varias concentraciones de manganeso, se sugiere realizar más investigaciones para entender mejor los mecanismos de tolerancia de estas plantas al manganeso. Esto podría contribuir a la creación de estrategias más efectivas para manejar los niveles de este micronutriente en los sistemas de cultivo hidropónico.

CAPÍTULO VI
BIBLIOGRAFÍA

6.1. Bibliografía

1. Fernando DR, Lynch JP. Manganese phytotoxicity: New light on an old problem. *Ann Bot.* 2015;116(3):313–9.
2. Millaleo R, Reyes-Díaz M, Ivanov AG, Mora ML, Alberdi M. Manganese as essential and toxic element for plants: Transport, accumulation and resistance mechanisms. *J Soil Sci Plant Nutr.* 2010;10(4):476–94.
3. Zhao J, Wang W, Zhou H, Wang R, Zhang P, Wang H, et al. Manganese toxicity inhibited root growth by disrupting auxin biosynthesis and transport in *Arabidopsis*. *Front Plant Sci.* 2017;8(March):1–8.
4. Antillón LA. Hidroponía. Cultivo sin tierra. Instituto Tecnológico de Costa Rica; 2008.
5. Armas Custode MA. Evaluación de tres híbridos de tomate determinado (*Lycopersicon esculentum*) a campo abierto, en la Finca Integral Limoncito, Provincia de Santa Elena. 2015;1–21.
6. Santos EF, Kondo Santini JM, Paixão AP, Júnior EF, Lavres J, Campos M, et al. Physiological highlights of manganese toxicity symptoms in soybean plants: Mn toxicity responses. *Plant Physiol Biochem* [Internet]. 2017;113:6–19. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0981942817300347>
7. Arana Peralta De. Evaluación De Tres Dosis De Fertilizante Quelatado En Tres Híbridos De Tomate (*Lycopersicon Esculentum* Mill) Bajo Condiciones Protegidas [Internet]
8. Casierra-Posada F, Poveda J. La toxicidad por exceso de Mn y Zn disminuye la producción de materia seca, los pigmentos foliares y la calidad del fruto en fresa (*Fragaria* sp. cv. Camarosa). *Agron Colomb* [Internet]. 2005;23(2):283–9. Available from: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180316955013>
9. Grijalva-Contreras RL, Macías-Duarte R, Grijalva-Durón SA, Núñez-Ramírez F, Robles-Contreras F. Productividad De Cultivares De Tomate Cherry Bajo Condiciones De Invernadero En El Noroeste De Sonora. *Biotecnia.* 2014;16(2):27.
10. Beltrano J, Gimenez O. Cultivo en hidroponía. *Cultiv en hidroponía.* 2020;
11. Pizarro V, Jana BC, Ibacache AG, Contreras C, Leris SL, Alfaro GV, et al. Módulos Hidropónicos Sistema Raíz Flotante (SRF): diseño , construcción y costos. 2019;0–3.
12. Barrera JG. La producción de tomate en todo el mundo supera ya los 186.000 millones

- de kilos. Horto Info [Internet]. 2022 Jan 3; Available from: <https://actoresproductivos.com/2022/01/03/la-produccion-de-tomate-en-todo-el-mundo-supera-ya-los-186-000-millones-de-kilos/#:~:text=La producci3n de tomate en,4.5%25 en noviembre de 2022>
13. Aguilar Pezo Et. Evaluaci3n De La Relaci3n Fenotipo Ambiente De Seis Cultivares De Tomate (*Solanum Lycopersicum L.*) En El Cant3n Machala. Universidad T3cnica de Machala. 2021.
 14. Peñaloza Mb. Evaluaci3n Del Comportamiento Agron3mico Del Cultivo De Tomate Riñ3n (*Solanum Lycopersicum*) Con Aplicaci3n De Di3xido De Silicio (*Sio 2*). Univ Tec Ambato. 2021;1:1–76.
 15. Hern3ndez S. Estudio del comportamiento de distintos tipos de Sustratos de lana de roca, en respuesta al aumento de ox3geno disuelto en la soluci3n nutritiva respecto a la producci3n y calidad de un cultivo de tomate tipo “cherry pera”. 2014;157. Available from: <https://core.ac.uk/download/pdf/143457327.pdf>
 16. Poveda V. Tomate (*Solanum lycopersicum L.*). Jard Bot. 2010;1.
 17. Fornaris GJ. Conjunto Tecnol3gico para la Producci3n de Tomate de Ensalada. 2007;1–6.
 18. Tipanluisa Ulcuango Iñ. “Efecto De Enmiendas Minerales Con Base En Calcio Y Magnesio A Distintas Granulometr3as En El Cultivo De Tomate (*Lycopersicum Esculentum Mill.*) Variedad Fortaleza En El Cant3n Cayambe. 2022.
 19. Gamboa Toledo AE. Evaluaci3n fenol3gica y productiva de tres variedades de tomate de mesa (*Solanum lycopersicum*) bajo invernadero en loma larga, provincia del Azuay. Universidad T3cnica de Machala. 2021.
 20. L3pez P3rez Eg. Evaluaci3n De Dos Sustratos Para La Producci3n De Tres Cultivares De Tomate Cherry (*Lycopersicum Esculentum Mill*) Var. Cerasiforme (Dunal) En Invernadero. 2019.
 21. Cabrera FAV. Producci3n de hortalizas de clima c3lido. Univ. Nacional de Colombia; 2004.
 22. Frias G. Empleo de microorganismos eficaces aplicados al cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) en huertos urbanos. 2021; Available from: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/16140/1/T-UCSG-PRE-TEC-AGRO-177.pdf>
 23. Pazmiño Silva S. Evaluaci3n de cuatro niveles de fertilizaci3n en tomate riñ3n (*Solanum lycopersicum*) bajo condiciones de invernadero en Puellar3- Pichincha.

- 2020.
24. Herrera HDJ, Hurtado-Salazar A, Ceballos-Aguirre N. Estudio técnico y económico del tomate tipo cereza elite (*Solanum lycopersicum* L. var. cerasiforme) bajo condiciones semicontroladas. *Rev Colomb Ciencias Hortícolas*. 2016;9(2):290.
 25. Berrios M, Arredondo C, Tjalling H. Nutrición vegetal de especialidad: Tomate. *Guía Manejo* [Internet].
 26. Meza J, Pantoja A, Galan P, Godoy N, Gattini J, Villasanti C, et al. El Cultivo De Tomate Con Buenas Prácticas Agrícolas En La Agricultura Urbana Y Periurbana. *Mag*. 2013. 1–72 p.
 27. Rivera P, Siqueira ML. Cultivo del tomate. Chemonics International Inc [Internet]. 2008;34. Available from: <http://cenida.una.edu.ni/relectronicos/RENF01CH517t.pdf>
 28. Mayssara A. Abo Hassanin Supervised A, Munawarah SH, Misnaniarti M, Isnurhadi I, Komunitas JK, Rumbai P, et al. Manual Internacional De Fertilidad De Suelos (Instituto de la Potasa y el Fósforo AC INPOFOS). *Pap Knowl Towar a Media Hist Doc* [Internet]. 2019;7(1):1–33. Available from: https://www.bertelsmannstiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/MT_Globalization_Report_2018.pdf
http://eprints.lse.ac.uk/43447/1/India_globalisation%2C_society_and_inequalities%28Isero%29.pdf
<https://www.quora.com/What-is-the>
 29. C. Márquez-Hernández^{1 2}, Chew-Madinaveitia³ YI, Moreno-Reséndez⁴, A. Rodríguez-Dimas¹ N. Sustratos En La Producción Orgánica De Tomate Cherry. 2006;
 30. Pille C. Facultad De Ciencias Ambientales. 2018;6122:1–133. Available from: <https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/1967/TM-PillpeC-Ext.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
 31. Contreras RR. Tabla periódica de los elementos químicos: ciento cincuenta años de historia. *Tabla periódica los Elem químicos ciento cincuenta años Hist* [Internet]. 2019;14(1):41–60.
 32. Kelley WP. The function and distribution of manganese in plants and soils. *Bull / Hawaii Agric Exp Stn*. 1912;(no 26):56 p.
 33. Monge, E.; Val J. Revisión actualizada del papel de los oligoelementos en plantas superiores : manganeso. Zaragoza. 2016;20(1–2):65–90.
 34. Zárate Aquino A. Manual práctico de hidroponia. Sagarpa [Internet]. 2014;42.
 35. Genúncio G da C. Racionalização do Uso de Nutrientes para o Cultivo Hidropônico do Tomateiro [Internet].

36. De Almeida L. Fitorremediação De Rejeito Salino Proveniente Da Osmose Reversa Em Sistema Hidropônico De Cultivo De Mudas De Eucalyptus Dunnii [Internet]. Vol. 68. 2020.
37. Enríquez Rodríguez LV. Efecto de cinco recubrimientos de polipropileno no tejido en parámetros productivos en tomate riñón (*Solanum lycopersicum*) en Puéllaro-Ecuador. Universidad San Francisco De Quito Usfq Colegio De Ciencias E Ingenierías; 2020.
38. RStudio Team. RStudio: Integrated Development Environment for R (Version 4.2.2) [Software]. [Internet]. 2021. Available from: <https://www.rstudio.com/>
39. Dziwornu AK, Shrestha A, Matthus E, Ali B, Wu L-B, Frei M. Responses of contrasting rice genotypes to excess manganese and their implications for lignin synthesis. *Plant Physiol Biochem PPB*. 2018 Feb;123:252–9.
40. Vargas Calvo A. Descripción y observaciones de la toxicidad de manganeso en plantas de plátano (*Musa* AAB, cv. 'Falso cuerno') cultivadas en domos de reciente construcción [Descriptions and observations on manganese toxicity in plantain (*Musa* AAB, cv. 'False Horn') plants. 2001;27 (54) 133-144. Available from: <https://www.musalit.org/seeMore.php?id=8322>
41. Liu Y, Xue Y, Xie B, Zhu S, Lu X, Liang C, et al. Complex gene regulation between young and old soybean leaves in responses to manganese toxicity. *Plant Physiol Biochem* [Internet]. 2020;155:231–42.
42. Bazán Ramírez MÁ, Rodríguez Delfín AS, Bazán Ramírez W, Chavez Cabrera N. Impacto del hierro, magnesio y manganeso en la clorosis de la arúgula en sistemas hidropónicos. *Ind Data*. 2022;25(2):7–28.

CAPÍTULO VII
ANEXOS

7.1. Anexos

Anexo A. Análisis de varianza con un arreglo de parcelas divididas de altura de plantas de tomate cherry a los 7, 14, 21, 28, 35, 42 y 49 días después de la siembra.

F.V.	GL	SC	CM	Fc	p- valor
DDS	6	93145	15524.2	362.41	< 2.2.e-16
Repetición	2	707	353.6	8.65	0.005561
Error a	12	514	42.8		
Tratamiento	2	4506	2252.9	40.00	< 2.2e-16
DDS*Tratamiento	12	3343	278.6	4.95	0.000240
Error b	28	1577	56.3		
Total	62	103792			

CV1 = 13.06 %; CV 2 = 14.97 %

Anexo B. Análisis de varianza con un arreglo de parcelas divididas del diámetro de tallo de plantas de tomate cherry a los 7, 14, 21, 28, 35, 42 y 49 días después de la siembra.

F.V.	GL	SC	CM	Fc	p- valor
DDS	6	82.084	13.6807	112.274	< 2.2.e-16
Repetición	2	0.133	0.0664	0.545	0.593550
Error a	12	1.462	0.1219		
Tratamiento	2	0.829	0.4147	5.888	0.007338
DDS*Tratamiento	12	0.217	0.0181	0.257	0.991767
Error b	28	1.972	0.0704		
Total	62	86.698			

CV 1 = 8.59 %

Anexo C. Análisis de varianza con un arreglo de parcelas divididas del número de hojas de plantas de tomate cherry a los 7, 14, 21, 28, 35, 42 y 49 días después de la siembra.

F.V.	GL	SC	CM	Fc	p- valor
DDS	6	693.05	115.509	104.606	< 2 e-16
Repetición	2	7.79	3.895	3.527	0.
Error a	12	13.25	1.104		
Tratamiento	2	196.28	98.138	98.156	< 2 e-16
DDS*Tratamiento	12	129.62	10.802	10.804	< 2 e-16
Error b	28	27.99	1.000		
Total	62	1067.99			

CV 1= 17.52 %; CV 2 = 16.67 %

Anexo D. Análisis de varianza de altura de plantas de tomate cherry.

F.V.	GL	SC	CM	Fc	Pr > Fc
Tratamiento	3	3.2048	1.06828	14.8578	0.003486
Repetición	2	0.5605	0.28023	3.8975	0.082277
Error	6	0.4314	0.07190		
Total	11	4.1967			

CV = 4.72 %

Anexo E. Análisis de varianza del diámetro de tallo de plantas de tomate cherry.

F.V.	GL	SC	CM	Fc	Pr > Fc
Tratamiento	3	0.45409	0.151364	119.760	0.00000963
Repetición	2	0.07082	0.035408	28.015	0.00090497
Error	6	0.00758	0.001264		
Total	11	0.53249			

CV = 2 %

Anexo F. Análisis de varianza del número de hojas de plantas de tomate cherry.

F.V.	GL	SC	CM	Fc	Pr > Fc
Tratamiento	3	2.76590	0.92197	26.4111	0.000743
Repetición	2	0.14315	0.07158	2.0504	0.209601
Error	6	0.20945	0.03491		
Total	11	3.11850			

CV = 25.42 %

Anexo G. Análisis de varianza del peso fresco.

F.V.	GL	SC	CM	Fc	Pr > Fc
Tratamiento	3	12324.5	4108.2	30.4217	0.00050
Repetición	2	202.9	101.5	0.7513	0.51146
Error	6	810.2	135.0		
Total	11	13337.7			

CV = 23.75 %

Anexo H. Análisis de varianza del peso seco.

F.V.	GL	SC	CM	Fc	Pr > Fc
Tratamiento	3	178.350	59.450	31.5243	0.00045
Repetición	2	4.346	2.173	1.1523	0.37713
Error	6	11.315	1.886		
Total	11	194.011			

CV = 21.52 %

Anexo I. Análisis de varianza de área foliar.

F.V.	GL	SC	CM	Fc	Pr > Fc
Tratamiento	2	1312854	656427	27.838	0.0009207
Error	6	141483	23580		
Total	8	1454336			

CV = 16.64 %

Anexo J. Análisis de varianza de materia seca.

F.V.	GL	SC	CM	Fc	Pr > Fc
Tratamiento	2	11.9543	5.9771	7.2949	0.024745
Error	6	4.9161	0.8194		
Total	8	16.8704			

CV = 25.39 %

Anexo K. Análisis de varianza de nitrógeno.

F.V.	GL	SC	CM	Fc	Pr > Fc
Tratamiento	2	315.79	157.893	18.173	0.0028447
Error	6	52.13	8.688		
Total	8	367.92			

CV = 26.96 %

Anexo L. Análisis de varianza de fosforo.

F.V.	GL	SC	CM	Fc	Pr > Fc
Tratamiento	2	94.165	47.083	13.098	0.0064727
Error	6	21.569	0.3595		
Total	8	115.734			

CV = 26.56 %

Anexo M. Análisis de varianza de potasio.

F.V.	GL	SC	CM	Fc	Pr > Fc
Tratamiento	2	325.27	162.637	15.487	0.0042734
Error	6	63.01	10.502		
Total	8	388.28			

CV = 26.71 %

Anexo N. Análisis de varianza de calcio.

F.V.	GL	SC	CM	Fc	Pr > Fc
Tratamiento	2	83.246	41.623	16.206	0.0038111
Error	6	15.410	2.568		
Total	8	98.656			

CV = 26.78 %

Anexo O. Análisis de varianza de magnesio.

F.V.	GL	SC	CM	Fc	Pr > Fc
Tratamiento	2	217.978	108.989	95.513	0.013655
Error	6	0.68465	0.11411		
Total	8	286.443			

CV = 26.41 %

Anexo P. Análisis de varianza de azufre.

F.V.	GL	SC	CM	Fc	Pr > Fc
Tratamiento	2	77.665	38.833	13.184	0.0063698
Error	6	17.673	0.2945		
Total	8	95.338			

CV = 26.56 %

Anexo Q. Análisis de varianza de zinc.

F.V.	GL	SC	CM	Fc	Pr > Fc
Tratamiento	2	8078	4039.2	0.99242	0.42428
Error	6	24420	4070.1		
Total	8	32499			

CV = 27.4 %

Anexo R. Análisis de varianza de cobre.

F.V.	GL	SC	CM	Fc	Pr > Fc
Tratamiento	2	5552.1	2776.03	62.736	0.033855
Error	6	2655.0	442.49		
Total	8	8207.0			

CV = 26.47 %

Anexo S. Análisis de varianza de hierro.

F.V.	GL	SC	CM	Fc	Pr > Fc
Tratamiento	2	2475468	1.237.734	79.884	0.02035
Error	6	929648	154.941		
Total	8	3405117			

CV = 26.4 %

Anexo T. Análisis de varianza de molibdeno.

F.V.	GL	SC	CM	Fc	Pr > Fc
Tratamiento	2	1620322	810.161	40.964	0.075553
Error	6	1186644	197.774		
Total	8	2806966			

CV = 30.48 %

Anexo U. Análisis de varianza de boro.

F.V.	GL	SC	CM	Fc	Pr > Fc
Tratamiento	2	42196	21098.2	83.868	0.018288
Error	6	15094	2515.7		
Total	8	57290			

CV = 26.4 %

Anexo V. Preparación de solución de Hoagland y Arnon.



Anexo W. Traslado de plantas a sistema hidropónico de raíces flotantes.



Anexo X. Extracción de plántulas del tratamiento 4.



Anexo Y. Preparación de solución nutritiva para las cajas.

