



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

ABSORCIÓN DE TRES DIFERENTES CONCENTRACIONES DE HIERRO EN UN SISTEMA ACUAPÓNICO DE ESPINACA (*SPINACIA OLERACEA L.*) Y TILAPIA (*OREOCHROMIS NILOTICUS*)

TESIS

Que como requisito parcial

para obtener el grado de:

MAESTRA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

Presenta:

CITLALI PAOLA MARTÍNEZ GAMIZ

Bajo la supervisión de:

Dra. Raquel Salazar Moreno



Chapingo, Estado de México, diciembre de 2025.

ABSORCIÓN DE DIFERENTES CONCENTRACIONES DE HIERRO EN UN
SISTEMA ACUAPÓNICO DE ESPINACA

(*SPINACIA OLERACEA L.*) TILAPIA (*OREOCHROMIS NILOTICUS*).

Tesis realizada por Citlali Paola Martínez Gamiz bajo la supervisión del Comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

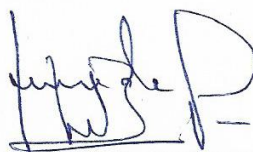
MAESTRA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

Directora:



Dra. Raquel Salazar Moreno

Codirector:



Dr. Joel Pineda Pineda

Asesor:



Dr. Agustín Ruiz García

Asesor:



Dr. Mario Alberto Vázquez Peña

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
DEDICATORIAS	viii
AGRADECIMIENTOS	ix
DATOS BIOGRÁFICOS.....	x
RESUMEN GENERAL	xi
GENERAL ABSTRACT	xii
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	2
2.1 Acuaponía	2
2.1.2 Ciclo de la acuaponía	2
2.1.3 Tipos de sistemas acuapónicos	2
2.2 Estrés	3
2.2.1 Eustress	3
2.2.2 Estrés oxidativo	3
2.3 Suplementación.....	4
2.4 Hierro.....	4
2.4.1 Importancia del hierro en fisiología vegetal	4
2.4.2 interacciones del hierro con otros nutrientes	5
2.4.3 Absorción y transporte de hierro en plantas	7
2.4.4 Manejo de hierro en sistemas acuapónicos	7
2.5 Espinaca.....	8
2.5.1 Características generales.....	8
2.5.2 Aporte nutricional	8
2.5.3 Requerimientos y manejo agronómico	9

2.5.4 Relación pH- hierro y otros nutrientes	9
2.5.5 Efecto del pH en quelatos sintéticos	9
2.6 Tilapia.....	10
2.6.1 Origen y distribución.....	10
2.6.2 Características reproductivas y tolerancia ambiental	10
2.6.3 Requerimientos ambientales y parámetros óptimos.....	10
2.6.4 Composición nutrimental de la Tilapia.....	10
2.7 Estudios previos	12
2.7.1 Estudio sobre efecto del régimen de aplicación de solución nutritiva con espinaca.....	12
2.7.2 Hierro en acuaponía con peces y lechuga.....	12
2.7.3 Suplementación mínima en espinaca y tilapia	12
2.7.4 Suplementación de nutrientes en cultivo de tomate y tilapia	13
2.7.5 Suplementación en acuaponía y su efecto en cultivos y peces	13
2.8 LITERATURA CITADA	14
3. ARTÍCULO CIENTÍFICO	17
3.1 Resumen	17
3.2 Abstract	18
3.3 Introducción.....	19
3.4 Materiales y métodos	23
3.4.2 Tratamientos	23
3.4.3 Suplementación de nutrientes en solución nutritiva	23
3.4.4 Material Biológico	25
3.4.5 Monitoreo y muestreo.....	26
3.4.5.1 Análisis de Agua.....	26
3.4.5.2 Muestreo y alimentación de peces	26
3.4.6 Tasa de crecimiento de peces.....	27
3.4.7 Análisis de composición química de carne de Tilapia	27

3.4.8 Plantas	28
3.4.9 Cálculo de índice de área foliar, densidad y rendimiento	28
3.4.10 Análisis de nutrientes	29
3.4.10.1 Análisis de nutrientes Preparación de muestras	29
3.4.10.2 Digestión ácida y análisis químico.....	29
3.4.10.3 Análisis estadístico	30
3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
3.5.1 Efecto de la concentración de Fe	30
3.5.1 Efecto de la concentración de Fe en tejido vegetal	30
3.5.2 Efecto de la concentración de Fe en solución nutritiva	31
3.5.3 Efecto de la concentración de Fe en el rendimiento del cultivo de espinaca.....	32
3.5.4 Contenido nutrimental en hojas de espinaca.....	33
3.5.5 Concentración de nutrientes en solución nutritiva	34
3.5.6 Efectos de la suplementación en el crecimiento y la composición química de carne de Tilapia	37
4. CONCLUSIONES	40
5. LITERATURA CITADA	41

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Interacciones del hierro con otros nutrientes.....	5
Cuadro 2. contenido nutrimental de espinaca.....	8
Cuadro 3. <i>Valores nutrimentales de referencia en 100 g de tilapia</i>	11
Cuadro 4. Rangos óptimos y tóxicos en tejido vegetal.	21
Cuadro 5. Rendimiento del cultivo de espinaca durante la cosecha del ciclo 1 y ciclo 2.....	32
Cuadro 6. Comparación de medias del contenido nutrimental en tejido vegetal	34
Cuadro 7. Composición química de carne de tilapias.	37
Cuadro 8. Efecto de la suplementación con Fe, Ca, K y Mg en el crecimiento de Tilapia en un cultivo auapónico con espinaca en el ciclo 1	38
Cuadro 9. Efecto de la suplementación con Fe, Ca, K y Mg en el crecimiento de tilapia en un cultivo acuapónico con espinaca en el ciclo 2.	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistemas acuapónicos	25
Figura 2. Muestreo de Tilapias.....	26
Figura 3. Análisis de composición química de carne de Tilapia.....	28
Figura 4. Contenido de Fe en hojas de espinaca.....	31
Figura 5. Concentración de fósforo y magnesio en solución nutritiva en el ciclo 1 y en el ciclo 2.	35
Figura 6. Concentración de calcio, potasio y nitrógeno en forma de nitratos en solución nutritiva para el ciclo 1 y el ciclo 2	36

DEDICATORIAS

A mi amado padre, Apolinar Martínez Martínez, Por su apoyo incondicional por brindarme su amor, su confianza, y enseñarme a superarme hasta el último momento. Gracias por haberme guiado con amor, paciencia y por inculcarme los valores que me forman como persona. Hasta el cielo, con todo mi cariño.

A mi querido hijo, Gustavo Apolinar Sosa Martínez, por ser mi inspiración día a día y enseñarme que puede ser mi compañero y mi mayor apoyo en los momentos menos esperados.

A mis amigos y compañeros que conocí gracias al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso integral del agua, por ser un gran ejemplo e inspiración para poder haber llegado hasta aquí, por su apoyo y motivación en los momentos en que creí que no podía continuar.

AGRADECIMIENTOS

A la secretaría de ciencia, humanidades, tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo económico brindado para poder llevar a cabo mis estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, por formarme profesionalmente con el acompañamiento de sus excelentes profesores.

Al Doctor Agustín Ruiz García, por haberme apoyado y dirigido para la formación de mi comité de tesis.

A la Doctora Raquel Salazar Moreno, por haberme aceptado y confiar en mí para realizar mis estudios de posgrado, así como por guiarme, apoyarme y acompañarme en todo momento durante este proceso.

Al Doctor Joel Pineda Pineda por haber aceptado formar parte de mi comité asesor, como mi codirector, por brindarme un espacio en el invernadero de San Ignacio, facilitar los espacios para los análisis de laboratorio, proporcionar materiales e insumos, y por compartir su dedicación, experiencia y profesionalismo en cada etapa del trabajo.

Al Doctor Mario Alberto Vázquez Peña, por haberse integrado al comité de tesis y aportar sus conocimientos necesarios sobre estadística.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre:	Citlali Paola Martínez Gamiz
Fecha de nacimiento:	05 de febrero de 1994
Lugar de nacimiento:	Ciudad de México
CURP:	MAGC940205MDFRMT08
Profesión:	Ingeniera en Biotecnología
Cédula Profesional:	13368919

Desarrollo académico

Maestría:	Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo.
Licenciatura:	Universidad Tecnológica de Tecámac.
Bachillerato:	Telebachillerato, El Tizal, Ixhuatlán de Madero, Veracruz.

RESUMEN GENERAL

ABSORCIÓN DE TRES DIFERENTES CONCENTRACIONES DE HIERRO EN UN SISTEMA ACUAPONICO DE ESPINACA (*SPINACIA OLERACEA L.*) Y TILAPIA (*OREOCHROMIS NILOTICUS*)

La espinaca (*Spinacia oleracea L.*) es una hortaliza rica en nutrientes y fuente importante de hierro (Fe), esencial para prevenir deficiencias. La acuaponía, sistema sostenible que integra acuicultura y cultivo vegetal, enfrenta limitaciones nutrimentales, siendo el Fe uno de los más críticos. Este estudio evaluó tres concentraciones de Fe (2.5, 3.5 y 4.5 ppm) en el crecimiento de espinaca y la calidad de carne de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en sistemas acuapónicos, comparados con un testigo hidropónico. El experimento se realizó en dos ciclos (agosto y octubre-noviembre 2024) bajo diseño completamente al azar con tres tratamientos acuapónicos y un testigo, cada uno con tres repeticiones. Se suplementaron Ca, K y Mg para evitar deficiencias. Se midieron altura, peso fresco y seco, índice de área foliar y composición nutrimental vegetal y animal.

El segundo ciclo mostró mejor desempeño por la aplicación constante de Fe hasta el día 21, manteniendo mayor disponibilidad nutrimental. La concentración intermedia (3.5 ppm), junto con K, Ca y Mg, optimizó el rendimiento sin antagonismos. En el primer ciclo, 4.5 ppm favoreció la biomasa inicial, pero en el segundo ciclo 3.5 ppm presentó los mayores valores de peso fresco y seco. Se observó sinergia Fe–Zn en niveles moderados y antagonismos Fe–Ca y Fe–Mg en dosis altas. En tilapia, el testigo tuvo mayor proteína, mientras que tratamientos con Fe mostraron más grasa.

En conclusión, dosis intermedias de Fe y aplicaciones escalonadas mejoran la productividad vegetal y la eficiencia del sistema acuapónico.

Palabras clave: acuaponía, suplementación, hierro, tilapia, espinaca.

Tesis de Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua,

Universidad Autónoma Chapingo

Autora: Citlali Paola Martínez Gamiz

Directora y Codirector: Raquel Salazar Moreno y Joel Pineda Pineda

GENERAL ABSTRACT

ABSORPTION OF THREE DIFFERENT IRON CONCENTRATIONS IN AN AQUAPONIC SYSTEM OF SPINACH (*SPINACIA OLERACEA* L.) AND TILAPIA (*OREOCHROMIS NILOTICUS*)

Spinach (*Spinacia oleracea* L.) is a nutrient-rich vegetable and an important source of iron (Fe), essential for preventing deficiencies. Aquaponics, a sustainable system that integrates aquaculture and plant cultivation, faces nutritional limitations, with Fe being one of the most critical. This study evaluated three Fe concentrations (2.5, 3.5, and 4.5 ppm) on spinach growth and tilapia (*Oreochromis niloticus*) meat quality in aquaponic systems, compared to hydroponic control. The experiment was conducted in two cycles (August and October-November 2024) using a completely randomized design with three aquaponic treatments and a control, each with three replicates. Calcium (Ca), potassium (K), and magnesium (Mg) were supplemented to prevent deficiencies. Height, fresh and dry weight, leaf area index, and plant and animal nutrient composition were measured.

The second cycle showed better performance due to the constant application of Fe until day 21, maintaining greater nutrient availability. The intermediate concentration (3.5 ppm), along with K, Ca, and Mg, optimized yield without antagonism. In the first cycle, 4.5 ppm favored initial biomass, but in the second cycle, 3.5 ppm resulted in the highest fresh and dry weight values. Fe–Zn synergy was observed at moderate levels, while Fe–Ca and Fe–Mg antagonisms occurred at high doses. In tilapia, the control group had higher protein content, while treatments with Fe showed higher fat content.

In conclusion, intermediate doses of Fe and staggered applications improve plant productivity and the efficiency of the aquaponic system.

Key words: aquaponics, supplementation, iron, tilapia, spinach.

Master's Thesis in Agricultural Engineering and Integrated Water Use,
Chapingo Autonomous University

Author: Citlali Paola Martínez Gamiz

Director and Co-director: Raquel Salazar Moreno and Joel Pineda Pineda

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La acuaponía se ha consolidado como una alternativa sostenible para la producción integrada de peces y hortalizas, al combinar la acuicultura con la hidroponía en un sistema cerrado que optimiza el uso del agua y reduce la dependencia de fertilizantes químicos. Sin embargo, los efluentes acuícolas no siempre satisfacen los requerimientos nutrimentales de las plantas, siendo el hierro (Fe) uno de los elementos más limitantes para el crecimiento vegetal y la calidad del producto. La espinaca (*Spinacia oleracea* L.), por su alto valor nutricional y demanda comercial, representa un cultivo ideal para sistemas acuapónicos, mientras que la tilapia (*Oreochromis niloticus*) es una especie ampliamente utilizada por su adaptabilidad y rentabilidad. En este contexto, la suplementación con hierro se plantea como una estrategia para mejorar la productividad vegetal sin comprometer la salud y calidad del pez. El presente trabajo evalúa el efecto de tres concentraciones de Fe (2.5, 3.5 y 4.5 mg·L⁻¹) sobre el crecimiento de espinaca y la composición de carne de tilapia en un sistema acuapónico, comparando los resultados con un testigo hidropónico, con el objetivo de identificar la dosis óptima que favorezca la sostenibilidad y eficiencia del sistema.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Acuaponía

La acuaponía es una tecnología que combina la acuicultura en tanques con la hidroponía, que implica procesos microbiológicos y utiliza el agua de la acuicultura para la nutrición y riego de plantas, (Baganz et al, 2022).

Goddek et al. (2019), aseguran que menos del 50% de los nutrientes para las plantas provienen de los efluentes de los peces que están principalmente compuestos por (amoníaco y sólidos) y son transformados por bacterias nitrificantes (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*, *Nitrospira*) en formas asimilables (nitratos, ortofosfatos). Posteriormente las plantas absorben estos nutrientes, purificando el agua que vuelve al estanque de peces.

2.1.2 Ciclo de la acuaponía

Se basa en la conversión del amoníaco ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$) excretado por los peces y las bacterias nitrificantes convierten el amoníaco nitritos (NO_2^-) y luego en nitratos (NO_3^-) que son asimilados por las plantas.

2.1.3 Tipos de sistemas acuapónicos

De acuerdo con Goddek et al. (2019) los sistemas acuapónicos se dividen en dos tipos: acoplados y desacoplados. Los acoplados consisten en un circuito único donde el agua recircula entre peces y plantas y los desacoplados se caracterizan por ser dos circuitos separados, permitiendo ajustar condiciones y suplementar nutrientes. Por otro lado Baganz et al. (2022), mencionan que el agua fluye continuamente desde la acuicultura hasta la hidroponía y regresa al sistema de peces, teniendo un flujo de agua y nutrientes continuo, también mencionan que

para los sistemas desacoplados la solución nutritiva se transfiere solo cuando se necesita.

2.2 Estrés

El estrés en plantas se define como la respuesta fisiológica frente a condiciones adversas que limitan su crecimiento y desarrollo, como la deficiencia hídrica o nutricional. Este tipo de estrés abiótico puede tener efectos negativos o positivos dependiendo de su intensidad Petropoulos et al. (2021).

2.2.1 Eustress

En este contexto, se ha introducido el concepto de eustress, que corresponde a un estrés leve y controlado, aplicado para inducir respuestas metabólicas beneficiosas. La privación parcial de nutrientes, por ejemplo, estimula la síntesis de metabolitos secundarios como polifenoles y antioxidantes, mejorando la calidad funcional del cultivo sin comprometer el rendimiento (Petropoulos et al., 2021). Sin embargo, la línea entre deficiencia y eustress es muy estrecha, y aún no se ha definido el umbral crítico que maximiza los beneficios sin causar daños fisiológicos (Petropoulos *et al.*, 2021).

2.2.2 Estrés oxidativo

El estrés oxidativo y ambiental en plantas está vinculado con la disponibilidad de micronutrientes, especialmente hierro (Fe). El exceso de Fe puede inducir toxicidad al catalizar la formación de radicales hidroxilos altamente reactivos, los cuales dañan componentes celulares como ADN, proteínas, lípidos y azúcares, generando estrés oxidativo severo (Becana *et al.*, 1998). La deficiencia de Fe activa respuestas de adaptación que incluyen mecanismos antioxidantes y lignificación en raíces, como estrategia para tolerar condiciones adversas (Donnini *et al.*, 2011). Estas respuestas fisiológicas reflejan que tanto la carencia como el exceso de micronutrientes son factores desencadenantes de estrés

ambiental en cultivos, afectando la eficiencia fotosintética y la calidad del producto final. Por ello, comprender la relación entre nutrición mineral y estrés es esencial para optimizar sistemas de cultivo sin suelo y mejorar la calidad nutricional de las hortalizas(Chong et al., 2013).

2.3 Suplementación

En la acuaponía los nutrientes provienen principalmente de los desechos metabólicos de los peces, entre los cuales se identifican macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) y micronutrientes (Fe, Mn, Zn, B, Cu, Mo). Sin embargo, el hierro (Fe), el calcio (Ca) y el potasio (K) suelen ser los elementos más limitantes para el crecimiento vegetal. Por otro lado (Kasozi et al., 2019) señalan, que el exceso de hierro puede generar toxicidad en los peces por lo que recomiendan que la máxima concentración máxima en agua no exceda los $1.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, además, sugieren el uso de quelatos como Fe- EDDHA o Fe-HBED en sistemas donde el pH suele tener variaciones.

De acuerdo con un estudio realizado por Harika et al. (2024) la suplementación con potasio mejoró el rendimiento del cultivo y sugiere una dosis óptima de $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ que ayude a mejorar el rendimiento de la planta.

2.4 Hierro

2.4.1 Importancia del hierro en fisiología vegetal

El hierro (Fe) es un micronutriente esencial para las plantas debido a su papel en procesos redox y en la síntesis de clorofila, siendo indispensable para la fotosíntesis y el metabolismo energético. Este elemento actúa como componente de proteínas hemo (citocromos, catalasas, peroxidasas) y proteínas hierro-azufre como la ferredoxina, que participan en la cadena de transporte electrónico y en la reducción de nitratos y sulfatos (P. Marschner et al., 2012). Sin embargo, la

homeostasis del Fe es crítica: su deficiencia provoca clorosis en hojas jóvenes, disminución de la actividad de nitrato reductasa y alteraciones en la estructura de los cloroplastos, mientras que su exceso cataliza la formación de radicales hidroxilos mediante la reacción de Fenton, generando estrés oxidativo y daño celular (Halliwell & Gutteridge, 1986; Marschner, 2012). Por ello, el hierro no solo es clave para el crecimiento vegetal, sino también para la regulación de procesos antioxidantes frente a condiciones adversas.

2.4.2 interacciones del hierro con otros nutrientes

El hierro no actúa de manera aislada, sino que interactúa estrechamente con otros nutrientes en procesos enzimáticos esenciales para la planta. Por ejemplo, la actividad del nitrato reductasa, responsable de la reducción de NO_3^- a NH_3 , depende tanto de hierro como de molibdeno como cofactores, lo que vincula la nutrición férrica con el metabolismo del nitrógeno (Marschner, 2012). Asimismo, el hierro participa en complejos proteicos junto con azufre en ferredoxinas, que son fundamentales para la asimilación de nitratos y sulfatos, y para la fijación biológica de nitrógeno en leguminosas (Bienfait, 1989).

Respecto a la interacción que tiene el hierro con otros nutrimentos se presentan la siguiente tabla adaptada de Marschner, (2002)

Cuadro 1. Interacciones del hierro con otros nutrientes

Nutriente	Interacción con Fe	Mecanismo	Consecuencia
Nitrógeno (NO_3^-)	Aumenta pH del rizósfera, reduciendo disponibilidad de Fe	Nitrato eleva pH $\rightarrow$ Fe precipita como $\text{Fe}(\text{OH})_3$	Deficiencia de Fe en suelos alcalinos
Fósforo (P)	Forma complejos insolubles con Fe	Fitato secuestra Fe, Zn, Ca, Mg	Baja biodisponibilidad

	(fitato) en semillas y raíces		de Fe en plantas y dieta humana
Azufre (S)	Indirecta: fitoquelatinas (derivadas de glutatión) pueden quelar Fe	Detoxificación de metales pesados	Influye en homeostasis de Fe bajo estrés por Cd, Zn, Cu
Manganeso (Mn)	Exceso de Mn inhibe absorción de Fe y Mg	Competencia por sitios de transporte y alteración metabólica	Clorosis internerval, necrosis, síntomas similares a deficiencia de Ca
Zinc (Zn)	Deficiencia de Zn coexiste con deficiencia de Fe; exceso de Zn induce deficiencia de Fe	Competencia iónica y alteración de metabolismo del Fe	Clorosis, liberación de fitosideróforos, reducción de fotosíntesis
Cobre (Cu)	Ambos participan en proteínas redox (citocromos); exceso de Cu puede reducir Fe	Competencia por sitios en proteínas y membranas	Deficiencia inducida de Fe, clorosis
Boro (B)	Adsorción conjunta en suelos ácidos ricos en óxidos de Fe	Complejos con pectinas y fenoles; Fe afecta disponibilidad de B y Mo	Deficiencia combinada en suelos ácidos

Molibdeno (Mo)	Adsorbido óxidos de Fe en suelos ácidos	por Competencia en por sitios de adsorción	Baja disponibilidad de Mo en suelos ricos en Fe
-------------------	---	--	--

2.4.3 Absorción y transporte de hierro en plantas

Sequi, (2004) menciona que el hierro es absorbido por las raíces o de forma foliar como ion (Fe^{2+}). En la planta es transformado en ion (Fe^{+3}) y transferido en forma quelatada, además asume la función de catalizador de los procesos respiratorios y de la formación de clorofila. De acuerdo con Mengel & Kirkby (1987) los quelatos de hierro se reducen más fácilmente que el cloruro férrico y la reducción depende del pH, y se presenta en pHs bajos. La absorción de hierro se ve influida por otros cationes, Mn^{+2} , Cu^{+2} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+2} y Zn^{+2} . En particular Cu y Zn desplazan al hierro, formando quelatos de metales pesados.

2.4.4 Manejo de hierro en sistemas acuapónicos

Kasozi et al. (2019) destacan que la suplementación de hierro en acuaponía requiere un manejo cuidadoso del pH y la selección de quelatos como Fe-EDDHA o Fe-HBED para evitar deficiencias y toxicidad. Por su parte, John et al. (2022) demuestran que la adición de potasio ($150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) en acuaponía incrementa significativamente el rendimiento y contenido nutricional de espinaca sin afectar el crecimiento de *Pangasianodon hypophthalmus*, aunque dosis excesivas pueden inducir estrés fisiológico en peces.

2.5 Espinaca

2.5.1 Características generales

La espinaca (*Spinacia oleracea L.*) es una hortaliza ampliamente cultivada, contribuye al aporte balanceado de vitaminas y minerales, previniendo enfermedades originadas por deficiencias de nutrición, su desarrollo óptimo es con un pH de entre 6 y 6.5, con el pH elevado es susceptible a clorosis (Jiménez et al., 2010).

2.5.2 Aporte nutricional

Tabla 1. Aporte nutricional en 100 g de espinaca cruda. (Adaptado de Jiménez et al. (2010))

Cuadro 2. contenido nutrimental de espinaca

Contenido	Cantidad
Calorías	22
Proteína (g)	2.9
Grasa (g)	0.4
Carbohidratos (g)	3.4
Fibra (g)	3.2
Fósforo (mg)	49
Calcio (mg)	94
Hierro (mg)	2.7
Sodio (mg)	79
Potasio (mg)	558
Magnesio (mg)	79
Zinc (mg)	0.53
Cobre (mg)	0.13
Manganeso (mg)	0.90

Tiamina (mg)	0.08
Niacina (mg)	0.7
Ácido pantoténico (mg)	0.07
Vitamina B6 (mg)	0.20
Ácido fólico (mg)	194
Ácido ascórbico (mg)	28

2.5.3 Requerimientos y manejo agronómico

Jiménez et al. menciona que el desarrollo de la espinaca es sensible a la deficiencia de nitrógeno (N), magnesio (Mg), manganeso (Mn), boro (B), cobre (Cu) y zinc (Zn). Su cosecha se realiza entre las 7 y 9 semanas, aproximadamente de 30 cm de altura y un rendimiento promedio de 20 a 30 t·ha⁻¹ en sistemas intensivos.

2.5.4 Relación pH- hierro y otros nutrientes

De acuerdo con Alzate et al. (2023), la solubilidad del hierro depende del pH y del potencial redox (Eh):

- ✓ En pH neutro a alcalino, el hierro precipita como hidróxidos insolubles, reduciendo drásticamente su disponibilidad para las plantas.
- ✓ En condiciones ácidas y reductoras, el hierro se solubiliza más fácilmente, aumentando su concentración en la solución del suelo.

2.5.5 Efecto del pH en quelatos sintéticos

Alzate et al. (2023), mencionan que la estabilidad de los complejos Fe-quelato depende del pH. Además, el EDDHA es el más estable en suelos muy alcalinos (pH > 7), mientras que otros quelatos como EDTA o DTPA pierden eficacia porque el Ca²⁺ y otros cationes desplazan al Fe³⁺, causando su precipitación.

2.6 Tilapia

2.6.1 Origen y distribución

Es un pez de agua dulce, de origen del norte de África y suroeste de medio oriente. Se ha distribuido en la mayoría de los países tropicales para reproducción en acuicultura, pesca deportiva y repoblamiento. Es una especie de fácil cultivo y muy utilizado, por su aporte nutrimental y rápido crecimiento (Bonham, 2022).

2.6.2 Características reproductivas y tolerancia ambiental

Es una especie tolerante a condiciones que pueden someterla a estrés como: pH entre 5 y 9, baja concentración de oxígeno ($<2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) y altas densidades de cultivo. Tiene una alta capacidad de reproducción, llegando a producir cientos o miles de crías por desove y su madurez sexual llega antes de los seis meses (Bonham, 2022).

2.6.3 Requerimientos ambientales y parámetros óptimos

(Auxiliadora, 2006) menciona que puede alcanzar los 450-680 gr entre 6-9 meses, es una especie omnívora. Sus requerimientos ambientales son: temperatura óptima de 26-29 °C para crecimiento, si rebasa a 15°C los peces dejan de comer, por debajo de 12°C comienzan a morir. Para oxígeno disuelto de $>2\text{-}3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, un pH óptimo de 7-8 y llega a tolerar hasta 11. Tolera calcio entre 60-120 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, nitritos 0.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, nitratos 1.5-2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, hierro 0.05 – 0.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, fosfatos 0.15- 0.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.(Auxiliadora, 2006).

2.6.4 Composición nutrimental de la Tilapia

La siguiente tabla se presentan los valores de referencia en tilapia 100 g obtenidos de composición nutrimental de Tilapia.

Cuadro 3. *Valores nutrimentales de referencia en 100 g de tilapia*

Componente	Valor obtenido por Hernández et al. (2022)	Valor de referencia INCAP (2018)
Humedad (g·100g ⁻¹)	80.88	78
Proteína (g·100g ⁻¹)	18.75	20.08
Grasa (g·100g ⁻¹)	1.60	1.70
Ceniza (g·100g ⁻¹)	0.91	0.93
Potasio (mg·100 g ⁻¹)	260.84	302
Fósforo (mg·100 g ⁻¹)	148.77	170
Sodio (mg·100 g ⁻¹)	46.68	52
Calcio (mg·100 g ⁻¹)	26.53	10
Magnesio (mg·100 g ⁻¹)	16.69 ¹	27
Hierro (mg·100 g ⁻¹)	0.45	0.56
Zinc (mg·100 g ⁻¹)	1.13	0.33

2.7 Estudios previos

2.7.1 Estudio sobre efecto del régimen de aplicación de solución nutritiva con espinaca

En un estudio realizado por Petropoulos et al. (2021), evaluaron el efecto de diferentes regímenes de fertirrigación (0, 5, 10 y 20 días) sobre el rendimiento y calidad de espinaca. Los resultados mostraron que 20 días de solución nutritiva lograron el mayor rendimiento ($1.59 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) y contenido de clorofilas y carotenoides, aunque con la concentración más alta de nitratos ($1698 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). En contraste, el tratamiento de 10 días redujo los nitratos en un 70.7%, mantuvo altos niveles de minerales y antioxidantes ($167 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de ácido ascórbico).

2.7.2 Hierro en acuaponía con peces y lechuga

En este experimento realizado por Luo et al. (2025) se compararon tres fuentes de hierro en la dieta de carpa espejo (*Cyprinus carpio*) y su efecto en lechuga (*Lactuca sativa*) en acuaponía: sulfato ferroso, citrato ferroso y glicinato ferroso, todos con $120 \text{ mgFe} \cdot \text{kg}^{-1}$. Tras 60 días, Glicinato ferroso y citrato ferroso mejoraron significativamente el crecimiento de peces y la biodisponibilidad de hierro en tejidos (hígado $\approx 47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Sin embargo, el sulfato ferroso favoreció la producción vegetal ($1.95 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) y mayor contenido de clorofila ($18 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), evidenciando que la fuente de hierro influye en la eficiencia del sistema y en la distribución de nutrientes entre peces y plantas.

2.7.3 Suplementación mínima en espinaca y tilapia

Tsoumalakou et al. (2023), analizaron el impacto de suplementación mínima con hierro (Fe-DTPA) y potasio (K_2SO_4) en espinaca cultivada con tilapia roja en acuaponía. El control sin suplementación presentó clorosis severa desde el día 10 y redujo en 75% el contenido de clorofila al día 20, obligando a su cosecha anticipada. Los tratamientos con Fe y Fe+K multiplicaron por ocho el área foliar respecto al control y mejoraron la eficiencia fotosintética, siendo Fe el más efectivo en mantener altos niveles de clorofila y rendimiento sin comprometer la

sostenibilidad. La suplementación no afectó el crecimiento ni la supervivencia de los peces (96–100%).

2.7.4 Suplementación de nutrientes en cultivo de tomate y tilapia

Pineda-Pineda et al. (2020), evaluó la adición de N, K, Ca y S en acuaponía para tomate y tilapia, comparando hidroponía y tres esquemas acuapónicos. El rendimiento y crecimiento fueron similares entre sistemas, aunque la suplementación aumentó la concentración de nutrientes en hojas y frutos sin mejorar significativamente la producción. La suplementación no afectó el crecimiento de los peces y redujo el consumo de agua frente a hidroponía, confirmando la viabilidad del sistema con ajustes nutricionales.

2.7.5 Suplementación en acuaponía y su efecto en cultivos y peces

Meena, et al. (2023), evaluaron el efecto de la aplicación foliar de (P y K) y (Fe) en un sistema acuapónico con okra (*Abelmoschus esculentus*) y pangasius (*Pangasianodon hypophthalmus*). Durante 90 días, se probaron cuatro dosis de fósforo ($2.7\text{--}10.8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) junto con potasio ($5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) y hierro ($1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$). El tratamiento con $8.1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ de P (T3) logró el mayor rendimiento de okra ($\approx 513\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) y mayor peso promedio por planta ($\approx 38\text{ g}$), sin afectar el crecimiento ni la salud de los peces. El estudio concluye que la suplementación foliar combinada mejora significativamente la producción vegetal en acuaponía sin comprometer la sostenibilidad del sistema

2.8 LITERATURA CITADA

- Alzate, M., Cardarelli, M., Rouphael, Y., Cesco, S., Pii, Y., & Colla, G. (2023). Iron nutrition in agriculture: From synthetic chelates to biochelates. *Scientia Horticulturae*, 312. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111833>
- Auxiliadora, M. (2006). *Manejo del cultivo de tilapia*.
- Baganz, G. F. M., Junge, R., Portella, M. C., Goddek, S., Keesman, K. J., Baganz, D., Staaks, G., Shaw, C., Lohrberg, F., & Kloas, W. (2022). The aquaponic principle—It is all about coupling. In *Reviews in Aquaculture* (Vol. 14, Issue 1). <https://doi.org/10.1111/raq.12596>
- Bonham, V. (2022). *Oreochromis niloticus (Nile tilapia) Summary Datasheet Type(s) Preferred Scientific Name Preferred Common Name Summary of Invasiveness*.
- Chong, W. J., Liu, Y., Qian, M., Qian, W., & Shao, D. (2013). Mild Fe-deficiency improves biomass production and quality of hydroponic-cultivated spinach plants (*Spinacia oleracea* L.). *Food Chemistry*, 138(4), 2188–2194. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.12.025>
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. (2019). Aquaponics Food Production systems Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future. In *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. European Cooperation in science & Technology. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6>
- Harika, N., Verma, A. K., Krishnani, K. K., Hittinahalli, C. M., Reddy, R., & Pai, M. (2024). Supplementation of potassium in aquaculture wastewater and its effect on growth performance of basil (*Ocimum basilicum* L) and pangasius (*Pangasianodon hypophthalmus*) in NFT-based aquaponics. *Scientia Horticulturae*, 323. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112521>
- Hernández, M., Martínez, E., & Carranza, F. (2022). *Determinación del análisis bromatológico proximal y minerales en tilapias (oreochromis ssp) cultivadas en tres lagos de El Salvador*.
- Jiménez, J., Arias, L. A., Espinosa, L., Fuentes, L. S., Garzón, C., Gil, R., Niño, N., & Rodríguez, M. (2010). *El cultivo de la Espinaca (Spinacia oleracea L.) y su manejo fitosanitario en Colombia*. www.utadeo.edu.co

- John, V. C., Verma, A. K., Krishnani, K. K., Chandrakant, M. H., Bharti, V. S., & Varghese, T. (2022). Optimization of potassium (K⁺) supplementation for growth enhancement of *Spinacia oleracea* L. and *Pangasianodon hypophthalmus* (Sauvage, 1878) in an aquaponic system. *Agricultural Water Management*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107339>
- Kasozi, N., Tandlich, R., Fick, M., Kaiser, H., & Wilhelmi, B. (2019). Iron supplementation and management in aquaponic systems: A review. *Aquaculture Reports*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2019.100221>
- Luo, X. L., Yan, J. J., Abdessan, R., Zhang, X. xiao, Zhumanova, M., & Ji, H. (2025). Effect of dietary iron sources on *Cyprinus carpio* var. *specularis* and *Lactuca sativa* var. *ramosa* hort in aquaponic system. *Aquaculture*, 595. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.741479>
- Marschner, H. (2002). Functions of Mineral Nutrients: Micronutrients. In *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (pp. 313–404). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-057187-4.50015-1>
- Marschner, P., York, N., San Diego, P., & Francisco, S. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants Third Edition*. www.macmillansolutions.com
- Meena, L. L., Verma, A. K., Krishnani, K. K., Hittinahalli, C. M., Haridas, H., & John, V. C. (2023). Combined foliar application effect of iron and potassium on growth of okra and striped catfish using media bed based aquaponics. *Aquaculture*, 569. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739398>
- Mengel, Konrad., & Kirkby, E. A. (1987). *Principios de nutrición vegetal* (R. Melgar & M. Ruiz, Trans.; 4th ed.). International Potash Institute.
- Petropoulos, S. A., El-Nakhel, C., Graziani, G., Kyriacou, M. C., & Roupheal, Y. (2021). The effects of nutrient solution feeding regime on yield, mineral profile, and phytochemical composition of spinach microgreens. *Horticulturae*, 7(7). <https://doi.org/10.3390/horticulturae7070162>
- Pineda-Pineda, J., Miranda-Velázquez, I., Ramirez-Arias, A., Vargas-Herández, M., Montalvo-Hernández, D., García-Galván, S., & García-Ramírez, N. M. (2020). Response of tilapia and tomato to the complementation of nutrients in an aquaponic system. *Acta Horticulturae*, 1296, 101–108. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1296.14>
- Roosta, H. R., & Hamidpour, M. (2011). Effects of foliar application of some macro- and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems.

Scientia Horticulturae, 129(3), 396–402.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.04.006>

Sequi, P. (2004). *Los microelementos en la nutrición vegetal*.
<https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Losmicroelementosenlanutricionvegetal.pdf>

Tsoumalakou, E., Mente, E., Vlahos, N., & Levizou, E. (2023). Spinach Responds to Minimal Nutrient Supplementation in Aquaponics by Up-Regulating Light Use Efficiency, Photochemistry, and Carboxylation. *Horticulturae*, 9(3).
<https://doi.org/10.3390/horticulturae9030291>

3. ARTÍCULO CIENTÍFICO

Efecto de la suplementación con hierro en el crecimiento de espinaca (*Spinacia oleracea*) y Tilapia (*Oreochromis niloticus*) con concentraciones fijas de calcio, potasio y magnesio en un sistema acuapónico.

3.1 Resumen

La suplementación en acuaponía busca mejorar la productividad vegetal sin afectar la calidad de los peces utilizados en el sistema, aunque sus efectos son poco conocidos. Este estudio evaluó tres tratamientos con diferentes niveles de hierro (Fe), desde 2.5, 3.5 y 4.5 ppm (T1, T2, T3) y un testigo hidropónico (TH), además se suplementó con niveles fijos de potasio (K), magnesio (Mg) y calcio (Ca) sobre espinaca (*Spinacia oleracea*) y tilapia (*Oreochromis niloticus*). En espinaca el T2 (2.5 ppm) mostró mayor estabilidad nutricional, con incrementos en Fe y zinc (Zn) sin antagonismos relevantes con Ca y Mg. En tilapia, la proteína fue mayor en el testigo (18.45 %) y menor en T1 (16.48%), mientras que la grasa y colágeno aumentaron en los tratamientos (2.86 -5 y 1.78%), sugiriendo cambios en textura y perfil lipídico. Por lo que se considera que el tratamiento T2 es el mejor tratamiento, que favorece la calidad vegetal y minimiza efectos negativos en carne. Con estos resultados podemos decir que es necesario ajustar las dosis para mejorar la sostenibilidad y calidad integral en sistemas acuapónicos.

Palabras clave: Acuaponía, suplementación, hierro, tilapia, calidad de carne.

3.2 Abstract

Supplementation in aquaponics aims to improve plant productivity without affecting the quality of the fish used in the system, although its effects are poorly understood. This study evaluated three treatments with different iron (Fe) levels, from 2.5, 3.5, and 4.5 ppm (T1, T2, T3), and a hydroponic control (TH). Spinach (*Spinacia oleracea*) and tilapia (*Oreochromis niloticus*) were supplemented with fixed levels of potassium (K), magnesium (Mg), and calcium (Ca). In spinach, treatment T2 (2.5 ppm) showed greater nutritional stability, with increases in Fe and zinc (Zn) without significant antagonism with Ca and Mg. In tilapia, protein content was higher in control (18.45%) and lower in T1 (16.48%), while fat and collagen increased in the treatments (2.86%, 5%, and 1.78%, respectively), suggesting changes in texture and lipid profile. Therefore, treatment T2 is considered the best, favoring plant quality and minimizing negative effects on meat. Based on these results, we can conclude that adjusting the dosages is necessary to improve sustainability and overall quality in aquaponic systems.

Keywords: Aquaponics, supplementation, iron, tilapia, meat quality.

3.3 Introducción

La acuaponía es una tecnología basada en la hidroponía y acuicultura aplicada en la agricultura, que implica procesos microbiológicos y utiliza el agua de la acuicultura para la nutrición y riego de plantas (Baganz *et al.*, 2022). Además, los sistemas acuapónicos reutilizan más del 90% del agua; en comparación la producción de pescado en sistemas de recirculación requiere menos de 100 L·kg⁻¹ de carne, mientras que más del 50% de los nutrientes para las plantas provienen de los desechos de los peces, esto reduce el uso de fertilizantes y pesticidas, disminuye la huella hídrica y de carbono (Goddek *et al.*, 2019).

La espinaca es un cultivo adecuado para sistemas sostenibles como la acuaponía, gracias a su respuesta positiva a una suplementación mínima de nutrientes. Tsoumalakou *et al.* (2023) demostraron que, con una pequeña adición de hierro, la espinaca mejora su eficiencia en el uso de la luz, la fotosíntesis y la carboxilación, alcanzando rendimientos comparables a sistemas más intensivos. Esto la convierte en una opción rentable y sostenible, sin comprometer calidad y funcionalidad del sistema.

La tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) es una especie recomendada para sistemas acuapónicos por ser rentable y sostenible. Es omnívora y su metabolismo genera amonio, que las bacterias transforman en nitratos, esenciales para el crecimiento de espinaca. Además, presenta una alta tasa de crecimiento, facilidad de reproducción y gran demanda comercial como fuente de proteína (Bonham, 2022).

La espinaca es un excelente alimento, aporta 91% de agua y 2.86 g de proteína por cada 100 g de espinaca cruda, es una fuente rica en vitaminas A, C y K, y macronutrientes entre los cuales destacan el calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), fósforo (P), así como de micronutrientes como el zinc (Zn) y hierro (Fe) (Menchú *et al.*, 2012). La ingesta de alimentos nutritivos como la espinaca es una opción de disminuir las deficiencias nutrimentales en México, en donde se reportan deficiencias de hierro en niños de 1 a 4 años del (30.6%), niños de 5

a 11 años del (17%) y en mujeres de 12 a 49 años de (39.7%) (De la Cruz et al. 2023).

Esta hortaliza puede cultivarse en cualquier estación del año; sin embargo, se adapta mejor a climas frescos que a altas temperaturas. Requiere suelos con buen drenaje subsuperficial y un pH superior a 6 para un desarrollo óptimo (Di, 2023). La espinaca presenta un ciclo vegetativo de entre 7 a 9 semanas desde la siembra hasta la cosecha, dependiendo de las condiciones climáticas, y el rango de altitud más favorable es de 2 600 msnm (Jiménez et al., 2010). Las condiciones óptimas de temperatura para espinaca en acuaponía e Hidroponía son aproximadamente a los 28°C, (Chong et al., 2013;Farooq et al., 2023).

La tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) es una especie de agua dulce caracterizada por su resistencia a estrés asociado al manejo. Aunque a temperaturas debajo de 17 °C no crecen ni se alimentan y pueden morir por debajo de 12 °C; el rango óptimo para el crecimiento de tilapia se encuentra entre 20 a 30 °C, alcanzando hasta 500 g de peso en seis meses (Somerville et al., 2022). Esta especie se clasifica como omnívora y puede cultivarse en sistemas de alta densidad. Los valores óptimos para oxígeno disuelto son mayores a 3 mg ·L⁻¹, el rango ideal de pH se sitúa entre 7 y 8; valores inferiores a 5 pueden ser letales, y puede tolerar hasta un pH de 11 (Auxiliadora, 2006). Dada su resistencia y tolerancia a climas con temperaturas templadas cálidas es una buena opción para acuaponía.

Sin embargo, los requerimientos nutrimentales de las plantas no son abastecidos por completo con los efluentes que los peces proporcionan al sistema, (Roosta & Hamidpour, 2011). En el sistema acuapónico el Fe, Ca, Mg, K y Zn se encuentran en niveles bajos, por lo que se recomienda suplementar la solución nutritiva para evitar deficiencias.

El hierro (Fe) es un micronutriente esencial para la espinaca y para los peces debido a que participa en la síntesis de clorofila, la fotosíntesis y el metabolismo energético en vegetales, así como la formación de hemoglobina y la actividad

antioxidante en peces. En hortalizas, el Fe interviene en reacciones redox fundamentales para la fotosíntesis y la respiración (Alzate et al., 2023; Luo et al., 2024). En la agricultura, la baja disponibilidad de hierro en suelos calcáreos ha desarrollado el uso de quelatos sintéticos como EDDHA y DTPA, utilizados para mantener Fe soluble en condiciones alcalinas, Alzate et al. (2023) mencionan que presentan riesgos ambientales por la capacidad que tienen para movilizar metales tóxicos, pero existen alternativas sostenibles como los bioquelatos, que son derivados de péptidos vegetales y han sido probados con cultivos de pepino, tomate y fresa, demostrando que incluso en un pH de 8 la absorción de hierro mejoró, al igual que el desarrollo radicular y la fotosíntesis, además de contribuir a la biofortificación. En sistemas acuapónicos Meena, et al. (2023) sugieren, que la suplementación foliar con Fe ($1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) combinado con K ($5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) y P_2O_5 ($8.1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) incrementa el rendimiento del cultivo, en el caso de okra ($513\text{ g}\cdot\text{m}^2$ a diferencia del control con $324\text{ g}\cdot\text{m}^2$), además de la altura y el número de hojas, sin alterar la calidad del agua ni la salud del pez. Luo et al., (2024) señalan que en peces (carpa espejo), la suplementación de Fe en forma de $(\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O})$ en una concentración de ($118\text{-}120\text{ mg}\cdot\text{K}^{-1}$) mejora la ganancia de peso, la conversión alimenticia, la actividad antioxidante y el perfil lipídico, pero los niveles excesivos reducen el crecimiento y aumentan el estrés oxidativo. Además, el incremento de Fe en la dieta del pez favorece la producción vegetal y la biofortificación, aumentando la clorofila y Fe en hojas, aumentando absorción de nitrógeno en sistemas integrados (Meena, et al. 2023; Luo et al.,2024).

De acuerdo con P. Marschner et al. (2012). Los rangos óptimos y tóxicos en tejido foliar se encuentran sintetizados en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. Rangos óptimos y tóxicos en tejido vegetal.

Nutrimiento	Deficiencia	Nivel óptimo	Toxicidad
Hierro	$50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$50\text{--}150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$>250\text{--}500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Manganeso	10–20 mg·kg ⁻¹	20–200 mg·kg ⁻¹	>500 mg·kg ⁻¹ (varía por especie; maíz >200, soja >600, girasol >5300)
Zinc	15–20 mg·kg ⁻¹	15–50 mg·kg ⁻¹	>100–300 mg·kg ⁻¹
Cobre	5 mg·kg ⁻¹	5–20 mg·kg ⁻¹	>20–30 mg·kg ⁻¹ (algunas especies toleran hasta 1000 mg·kg ⁻¹)
Molibdeno	0.1–0.5 mg·kg ⁻¹	0.1–5 mg·kg ⁻¹	>10–50 mg·kg ⁻¹
Boro	20 mg·kg ⁻¹	20–100 mg·kg ⁻¹	>100–200 mg·kg ⁻¹ (sensibilidad alta en suelos áridos)

En un estudio de Tsoumalakou et al. (2023) se identificó al Fe como nutrimento crítico para evitar clorosis en espinaca cultivada en acuaponía. La suplementación con Fe-DTPA (2.23 mg·L⁻¹), mejoró la fotosíntesis y aumentó el contenido de clorofila. También se probó la combinación de Fe+K con (430 mg·L⁻¹), aunque el potasio mostró un efecto secundario sin mejoras significativas. Además, se reportó que los nitratos (NO₃⁻) se encontraron entre (88-117 mg·L⁻¹).

En un experimento elaborado por Hernández et al. (2022) reportaron, que mediante digestión ácida y bajo lecturas de espectrofotometría de absorción atómica (AAS), valores de minerales en Tilapia (*Oreochromis ssp.*) en 100 g: calcio (Ca) 150 – 250 mg, hierro (Fe) 2 – 5 mg, zinc (Zn) 1 – 3 mg, magnesio (Mg) 30 – 50 mg, potasio (K) 250 – 350 mg.

El objetivo del presente trabajo es analizar el impacto de la suplementación con hierro en plantas de espinaca (*Spinacia oleracea* L.) sobre el crecimiento y calidad de carne de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en un sistema acuapónico.

3.4 Materiales y métodos

Se llevaron a cabo 2 ciclos de producción de espinaca bajo un sistema acuapónico con tilapia, y testigo hidropónico, en un invernadero localizado en el campo de San Ignacio, dentro de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México. El primer ciclo inició el 02 de agosto del 2024 y concluyó el 31 de agosto del 2024. El segundo ciclo inició el 04 de octubre del 2024 y terminó el 4 de noviembre del 2024.

3.4.2 Tratamientos

En cada ciclo se instalaron 9 sistemas acuapónicos y 3 sistemas hidropónicos (Testigo), distribuidos en un diseño completamente al azar con un factor de concentración (Fe) y un testigo adicional. Cada tratamiento tuvo 3 repeticiones, sumando 12 unidades experimentales.

Los tratamientos fueron:

- T1: 2.5 mg L⁻¹ Fe-EDDHA
- T2: 3.5 mg L⁻¹ Fe-EDDHA
- T3: 4.5 mg L⁻¹ Fe-EDDHA
- Testigo hidropónico: 2.5 mg L⁻¹ Fe

3.4.3 Suplementación de nutrientes en solución nutritiva

Para corregir las deficiencias comunes en acuaponía se añadieron a la solución nutritiva en ambos ciclos:

- 142.24 g sulfato de potasio (K₂SO₄)
- 119.47 g de nitrato de calcio (Ca (NO₃)₂·4H₂O)

- 73. 60 g de sulfato de magnesio ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

La diferencia entre ciclos fue la frecuencia de la aplicación:

- Ciclo 1: Día 0 (100%) y día 14 (50%)
- Ciclo 2: Día 0 (100%), día 7 (50%), día 14 (50%) y día 21 (50%)

En el cuadro 4 se resumen las diferencias de la aplicación de nutrimentos en ambos ciclos.

Para preparar la solución nutritiva de los testigos hidropónicos se utilizó una solución nutritiva específica para espinacas descrita a detalle en (Riaño et al., 2019), para poderla preparar se calculó en base a un análisis de agua del pozo donde se tomó el agua para el experimento y se preparó con las siguientes concentraciones NO_3^- ($0.012 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$), H_2PO_4^- ($0.001 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$), SO_4^{2-} ($0.001 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$), K ($0.005 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$), Ca^{2+} ($0.003 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$), Mg^{2+} ($0.001 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)

Cuadro 4. Diferencias de aplicación de suplementos en los dos ciclos de producción de espinaca

	Ciclo 1	Ciclo 2
Periodo de cultivo	6 al 31 de agosto de 2024	7 de octubre al 4 de noviembre de 2024
Estructura del sistema	Mismo diseño y unidades experimentales	
Tratamientos acuapónicos	T1: 2.5 mg L^{-1} Fe-EDDHA T2: 3.5 mg L^{-1} Fe-EDDHA T3: 4.5 mg L^{-1} Fe-EDDHA	
Testigo hidropónico	2.5 mg L^{-1} Fe	
Sales suplementadas	$142.24 \text{ g K}_2\text{SO}_4$ $119.47 \text{ g Ca}(\text{NO}_3)_2$ 73.60 g MgSO_4	
Frecuencia suplementación	Día 0 (100%) Día 14 (50%)	Día 0 (100%) Día 7, 14 y 21 (50%)
Condiciones del sistema	Constantes en ambos ciclos ($8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 21 plantas por sistema, 3 niveles de Fe, temperatura $22\text{-}28^\circ\text{C}$, 7 pH)	

3.4.4 Características del sistema

Cada sistema acuapónico consistió en dos contenedores:

- Contenedor de polietileno para plantas: (1.03 m x 0.72 m x 0.39 m) relleno de tezontle como sustrato y filtro. Colocados en dos capas: la superior con partículas gruesas (1-4 cm) aproximadamente el 40% del volumen total del sustrato, y la superior con partículas finas (≤ 6 mm) aproximadamente el 60%. Este arreglo se seleccionó por su capacidad de filtración, retención de humedad y aireación, siguiendo la propuesta de Pineda-Pineda et al. (2018).
- Contenedor de polietileno para tanque de peces: con una capacidad de 200 L, llenado con 150 L, conectados mediante tubería de PVC de 1 ½" y bomba sumergible (40 W, 2500 L·h⁻¹). La aireación se realizó con blower GF-370 y 4 piedras difusoras.



Figura 1. Sistemas acuapónicos

3.4.4 Material Biológico

Se distribuyeron 200 tilapias (*Oreochromis niloticus*) de entre (92-96 g) en los 9 sistemas acuapónicos, y se colocó un tanque adicional con tilapias sin suplemento adicional en la solución nutritiva, para hacer el análisis de carne, con densidad de kg·m⁻³. Las plántulas de espinaca (*Spinacia oleracea* L.) de la variedad Oriental se trasplantaron 14 días después de germinar, colocando 21 plantas en cada cama de tezontle.

3.4.5 Monitoreo y muestreo

3.4.5.1 Análisis de Agua

Se monitoreó cada tratamiento con un sensor Groline Hanna® HI981420 para temperatura, pH y conductividad eléctrica (CE), en la solución nutritiva. Se tomaron 100 mL de solución nutritiva, de tres puntos: de la mitad del estanque de peces, en la superficie del estanque y a la salida del contenedor de tezontle. Se tomaron una vez por semana a partir del inicio de cada ciclo, semanalmente. Se analizaron K, Mg, Ca, Na, P, N, Fe en el primer ciclo, y Fe, Mg, Zn, Cu, Mn, K, Ca, Na, P y N en el segundo ciclo. Los análisis de las muestras de agua se llevaron a cabo en el laboratorio de Fisiología vegetal del departamento de Suelos, de la UACH.

3.4.5.2 Muestreo y alimentación de peces

Se alimentaron 3 veces al día, con alimento de la marca Nutripec para la etapa de desarrollo de un tamaño de 3.5 mm. Se realizó un muestreo semanal extrayendo 10 peces de cada tanque en un recipiente con 30 litros de agua con $7\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ de sal para baño profiláctico. Al final del muestreo se regresaron a su correspondiente tanque, según su tratamiento. Se pesó y se registró la talla, para ajustar alimentación (2% de biomasa) recomendada por Somerville et al. (2022).



Figura 2. Muestreo de Tilapias.

3.4.6 Tasa de crecimiento de peces

Para realizar el Cálculo de tasa de crecimiento en peces se utilizó la ecuación descrita por Luo et al. (2024)

$$TCE = \left(\frac{Pf - PI}{PI} \right) \times \left(\frac{100}{T} \right) \quad (1)$$

Donde

PI: Peso del pez al inicio del período.

Pf: Peso del pez al final del período.

T: Duración del período de crecimiento en días.

3.4.7 Análisis de composición química de carne de Tilapia

Se sacrificaron los peces de cada tratamiento, por separado, sacándolos del agua y colocando en hielo. Después de 30 minutos, se retiraron las escamas y los órganos internos. Se pesaron 3 muestras de cada tratamiento, incluyendo el testigo, de 180 gr cada uno. Para posteriormente determinar el contenido de humedad, proteína, grasa y colágeno por espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) en el equipo de FoodScan TM Lab ubicado en el Laboratorio del Posgrado de producción animal de la UACH.



Figura 3. Análisis de composición química de carne de Tilapia.

3.4.8 Plantas

Se tomaron 3 plantas por tratamiento, en total 12 plantas por semana, con un total de 5 muestreos por ciclo. Se registraron las medidas de la altura en (cm) de cada planta, al sacarla del sustrato se le retiro la raíz y se registró el peso fresco en (g) y el conteo de las hojas, se guardaron en una hielera y se llevaron al laboratorio de Fisiología Vegetal del departamento de Fitotecnia de la UACH. Se utilizó un integrador de área foliar marca LI-COR modelo LI-3100, para obtener el área foliar de cada planta. Posteriormente se colocaron las muestras de plantas en una estufa marca Binder 108 modelo ED400 a 70°C durante 72 h, en el laboratorio de Fisiología vegetal del departamento de Suelos de la UACH.

3.4.9 Cálculo de índice de área foliar, densidad y rendimiento

Para calcular el índice de área foliar (LAI) se utilizó la ecuación descrita por Lasheras et al. (2016)

$$IAF = \frac{A_f}{A_s} \quad (2)$$

Donde:

Ar: área foliar total (m²)

A_s : área del suelo o superficie plantada (m^2)

Para calcular el rendimiento de cada tratamiento, se calculó la densidad y el rendimiento del cultivo, descrito en Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), (2012).

$$Densidad = \frac{Número\ de\ plantas}{Área\ (m^2)} \quad (3)$$

La densidad se calculó de acuerdo con el peso promedio de cada tratamiento y el área total ocupada por tratamiento.

$$Rendimiento = \frac{Peso\ fresco\ total\ (Kg)}{Área\ cultivada\ (m^2)} \quad (4)$$

3.4.10 Análisis de nutrientes

3.4.10.1 Análisis de nutrientes Preparación de muestras

Las plantas se cosecharon y se lavaron con agua destilada para eliminar residuos. Posteriormente se colocaron en una estufa a $70^{\circ}C$ durante 72 h hasta alcanzar peso constante. Se registró el peso seco en (g) y las muestras se molieron en un molino. De cada muestra se pesaron 0.5 g para análisis químico.

3.4.10.2 Digestión ácida y análisis químico

El material molido se sometió a digestión ácida para la determinación de nutrientes. El nitrógeno total (NO_3^-) se cuantificó mediante el método Kjeldahl, que incluye digestión con H_2SO_4 y catalizadores, destilación y titulación (ITW Reagents, 2018).

Los elementos Ca, K y Mg se determinaron por flamometría (Sherwood M410), mientras que Fe, Zn, Cu y Mn se analizaron mediante espectrofotometría de

absorción atómica (GBC), siguiendo procedimientos estándar para análisis de tejidos vegetales (Chapman & Pratt, 1961; Johnson & Ulrich, 1959).

3.4.10.3 Análisis estadístico

Se realizó un análisis estadístico para determinar el mejor tratamiento mediante un diseño de un solo factor. Se aplicó una prueba de comparación de medias entre tratamientos y sus repeticiones. Los datos obtenidos se analizaron con el programa estadístico Minitab versión 15 (Minitab Statistical Software), utilizando análisis de varianza (ANOVA) para evaluar las diferencias significativas

3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.5.1 Efecto de la concentración de Fe

3.5.1 Efecto de la concentración de Fe en tejido vegetal

En ambos ciclos, el contenido de hierro en hojas de espinaca aumentó progresivamente hasta el día 21, coincidiendo con la fase de mayor demanda fisiológica para procesos como la síntesis de clorofila y la fotosíntesis. Sin embargo, la respuesta no fue proporcional a la dosis suplementada: aunque el tratamiento T3 recibió la mayor concentración de Fe-EDDHA, su contenido en tejido fue menor que T1 y T2 en algunos muestreos. Este comportamiento indica que la absorción de hierro no depende únicamente de la concentración externa, sino de factores fisiológicos y químicos que regulan la disponibilidad y el transporte del nutriente, tal como señalan Marschner (2012) y Alzate *et al.* (2023),

quienes destacan la influencia del pH y la competencia con cationes como Ca y Mg.

En el ciclo 2, la concentración de Fe en solución se mantuvo más estable ($3.5 - 4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ en T2 y T3), lo que favoreció una mayor absorción en hojas (picos de $160-180 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Sin embargo, en el ciclo 1, aunque T3 alcanzó la mayor

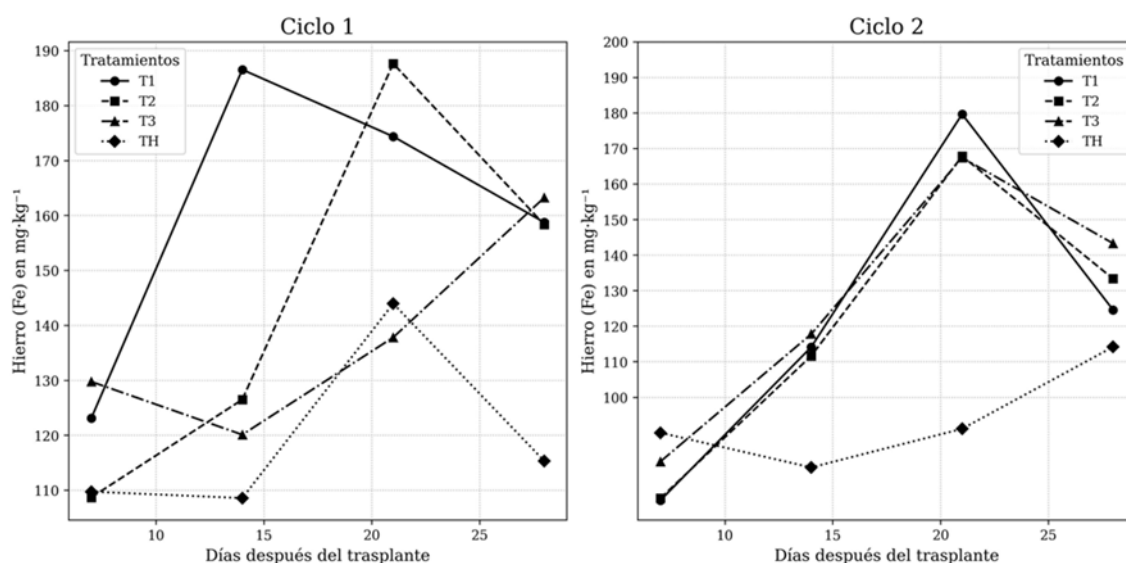


Figura 4. Contenido de Fe en hojas de espinaca.

concentración en solución al final ($3.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), su absorción en hojas no fue proporcional en todos los muestreos. Esto indica que la absorción depende de factores fisiológicos y no solo de la disponibilidad externa

3.5.2 Efecto de la concentración de Fe en solución nutritiva

El testigo hidropónico (TH), que recibió aproximadamente $2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de Fe por el mix de micronutrientes, presentó valores intermedios, lo que confirma que no fue un control sin hierro y que su comportamiento estuvo influenciado por la estabilidad del pH y la conductividad eléctrica en el sistema hidropónico. En el ciclo 2, la estrategia de aplicaciones escalonadas permitió mantener concentraciones más estables en la solución nutritiva ($3.5 - 4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ en T2 y T3), evitando la caída drástica observada en el ciclo 1. Esta estabilidad favoreció la absorción, aunque nuevamente sin una relación lineal con el rendimiento, lo que

coincide con lo reportado por Farooq *et al.* (2023), quienes señalan que la frecuencia de aplicación es más determinante que la dosis máxima.

3.5.3 Efecto de la concentración de Fe en el rendimiento del cultivo de espinaca

Cuadro 5. Rendimiento del cultivo de espinaca durante la cosecha del ciclo 1 y ciclo 2

	Ciclo 1 (kg·m ⁻²)	Ciclo 2 (kg·m ⁻²)
T1	5.69 ^b	6.7 ^a
T2	6.3 ^{ab}	7.45 ^a
T3	7.5 ^a	5.9 ^a
TH	6.7 ^{ab}	6.8 ^a

Letras iguales indican que no existen diferencias significativas entre medias Tukey ($p < 0.05$).

En el (Cuadro 5), se observa que la mayor concentración en tejido no garantizó la mayor productividad: en el ciclo 1, T3 alcanzó el valor más alto (7.5 kg·m⁻²), mientras que en el ciclo 2 el mejor resultado fue para T2 (7.45 kg·m⁻²), confirmando que dosis moderadas y aplicaciones frecuentes son más efectivas que concentraciones elevadas. Este patrón coincide con estudios en espinaca y okra en acuaponía (Tsoumalakou *et al.*, 2023; Meena *et al.*, 2023), donde la suplementación controlada optimizó la eficiencia fotosintética sin generar antagonismos nutrimentales.

El mayor contenido de Fe en hojas no garantizó el mayor rendimiento, porque en el ciclo 1: T3 tuvo el mayor rendimiento (7.5 kg·m⁻²), pero en el ciclo 2, T2 con Fe moderado y aplicaciones escalonadas superó a T3. Esto sugiere que los excesos de Fe pueden generar antagonismos con Ca y Mg, afectando procesos fisiológicos y reduciendo la eficiencia fotosintética (Marschner, 2012; Alzate *et al.*, 2023).

La estrategia de aplicación empelada en el ciclo 2, mantuvo la estabilidad del Fe en solución y evitó caídas bruscas, lo que se tradujo en un mejor rendimiento en T2, incluso con dosis intermedia.

Estos resultados difieren de lo reportado por Farooq et al. (2023), quienes encontraron que dosis moderadas de Fe ($1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) optimizaron la absorción y el rendimiento en sistemas acuapónicos, mientras que dosis más altas redujeron la eficiencia y generaron estrés fisiológico. Asimismo, estudios sobre nutrición férrica en agricultura (Alzate et al., 2023) señalan que la forma del hierro y la interacción con otros nutrientes son determinantes para su aprovechamiento, lo que explica por qué la suplementación elevada no siempre se traduce en mayor acumulación en tejido ni en mayor productividad. En este sentido, la evidencia confirma que la eficiencia del sistema depende más de la estrategia de manejo (frecuencia y equilibrio nutrimental) que, de la concentración máxima aplicada, coincidiendo con lo observado por Tsoumalakou et al. (2023) y Meena et al. (2023) en cultivos de espinaca y okra.

3.5.4 Contenido nutrimental en hojas de espinaca

El análisis de nutrientes en tejido vegetal (Cuadro 6) mostró que la suplementación con hierro no solo influyó en la acumulación de Fe, sino también en la dinámica de otros micronutrientes. En el primer ciclo, la dosis intermedia (T2, $3.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) presentó el mayor contenido de Fe ($187.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), junto con los valores más altos de Zn ($84.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y Cu ($3.58 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), lo que sugiere una sinergia Fe–Zn y Fe–Cu en niveles moderados. Por el contrario, la dosis más alta (T3, $4.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) redujo la concentración de Mg ($1.31 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y Zn ($57.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), evidenciando antagonismos entre cationes cuando el Fe se encuentra en exceso, tal como señalan Marschner (2012) y Alzate *et al.* (2023). En el segundo ciclo, las diferencias se atenuaron, aunque T2 mantuvo un patrón favorable en micronutrientes, confirmando que la estrategia de manejo (dosis moderada y aplicaciones escalonadas) favorece el equilibrio nutrimental más que la concentración máxima. Estos resultados refuerzan la importancia de considerar las interacciones entre nutrientes en sistemas acuapónicos para evitar

desequilibrios que comprometan la eficiencia fisiológica y la sostenibilidad del cultivo.

Cuadro 6. Comparación de medias del contenido nutrimental en tejido vegetal
Primer ciclo de producción de espinaca, 28 días (06 de agosto del 2024 al 03 de septiembre del 2024)

	N	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn
		%				mg·kg ⁻¹	
T1	3.34 ^a	4.23 ^a	0.45 ^a	1.53 ^a	174.4 ^a	2.68 ^a	68 ^a
T2	3.34 ^a	4.1 ^a	0.43 ^a	1.45 ^{ab}	187.6 ^a	3.58 ^a	84.84 ^a
T3	3.08 ^a	4.1 ^a	0.35 ^a	1.31 ^b	124.7 ^a	2.9 ^a	57.43 ^a
TH	3.34 ^a	3.6 ^a	0.41 ^a	1.45 ^{ab}	183.95 ^a	1.45 ^b	59.2 ^a
CV	7.23	10.8	12.68	8.57	16.04	16.2	17.8

Segundo ciclo de producción de espinaca, 28 días (07 de octubre del 2024 al 04 de noviembre del 2024)

	N	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn
	%					mg·kg ⁻¹	
T1	3.1 ^{ab}	3.81 ^a	0.37 ^a	1.34 ^a	124.6 ^a	2.68 ^a	49.6 ^a
T2	2.95 ^b	3.79 ^a	0.37 ^a	1.21 ^a	133.3 ^a	3.58 ^a	52.78 ^a
T3	3.16 ^{ab}	3.91 ^a	0.39 ^a	1.32 ^a	143.3 ^a	2.9 ^a	49.14 ^a
TH	3.3 ^a	3.95 ^a	0.39 ^a	1.30 ^a	114.2 ^a	1.45 ^b	33.77 ^b
CV	7.23	2.95	7.33	11.34	16.34	16.2	11.39

Medias con la misma letra en la misma columna no representan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey (p < 0.05). CV coeficiente de variación; T1: tratamiento 1; T2: tratamiento 2; T3: tratamiento 3; TH: testigo hidropónico.

3.5.5 Concentración de nutrientes en solución nutritiva

La dinámica de macronutrientes en la solución nutritiva evidenció diferencias marcadas entre los dos ciclos. En el ciclo 1, nitratos, potasio, calcio y magnesio mostraron caídas abruptas después de los primeros días, reflejando agotamiento y falta de reposición, mientras que el fósforo se mantuvo en niveles muy bajos, lo que pudo limitar la eficiencia fisiológica del cultivo. En contraste, el ciclo 2

presentó concentraciones más estables y elevadas de N-NO_3 ($175\text{--}225\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), K (hasta $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) y Ca (picos cercanos a $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), además de una mejor disponibilidad de Mg y P, gracias a la estrategia de aplicaciones escalonadas. Esta estabilidad nutrimental favoreció el rendimiento y confirma que la frecuencia y el balance de nutrientes son más determinantes que la dosis máxima de Fe, coincidiendo con lo reportado por Roosta y Hamidpour (2011) y Farooq *et al.* (2023). En términos de sostenibilidad, mantener niveles adecuados de macronutrientes no solo optimiza la productividad vegetal, sino que también reduce el riesgo de desequilibrios que comprometan la calidad del sistema acuapónico.

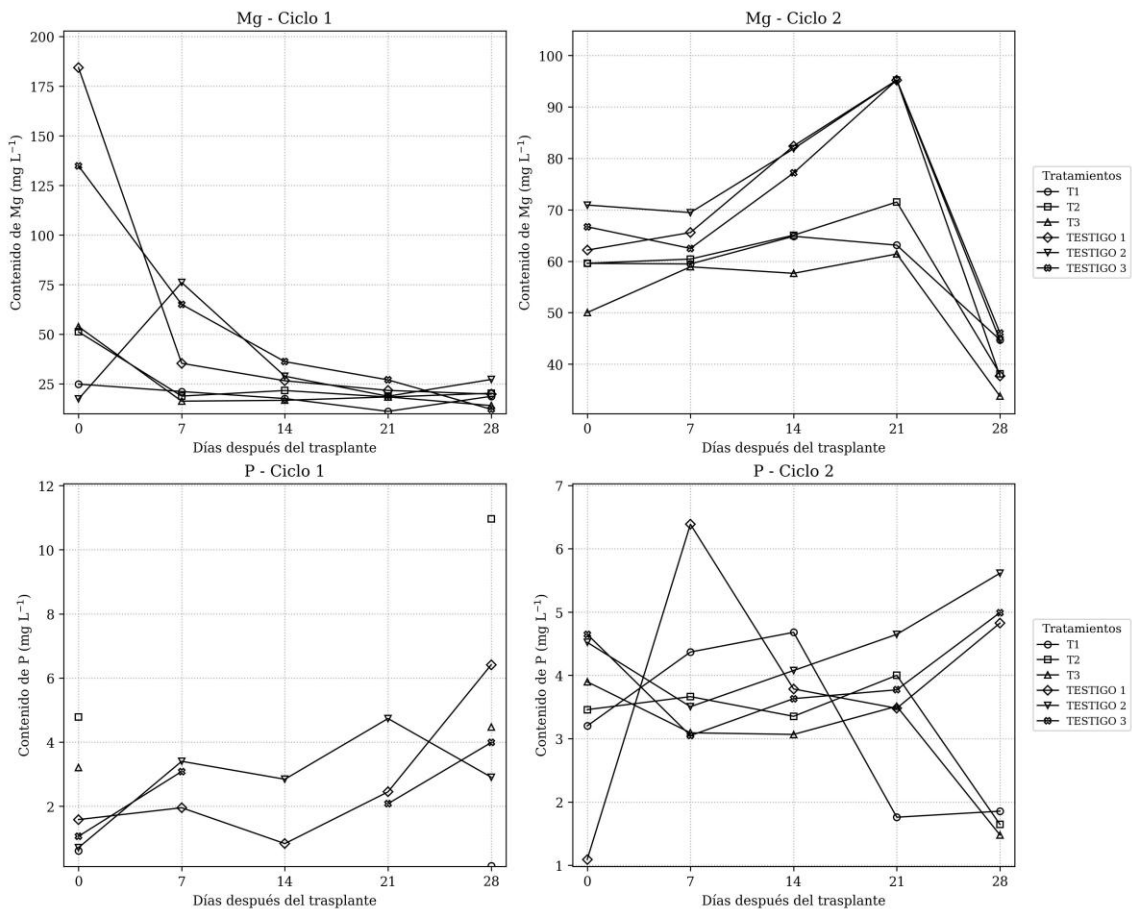


Figura 5. Concentración de fósforo y magnesio en solución nutritiva en el ciclo 1 y en el ciclo 2.

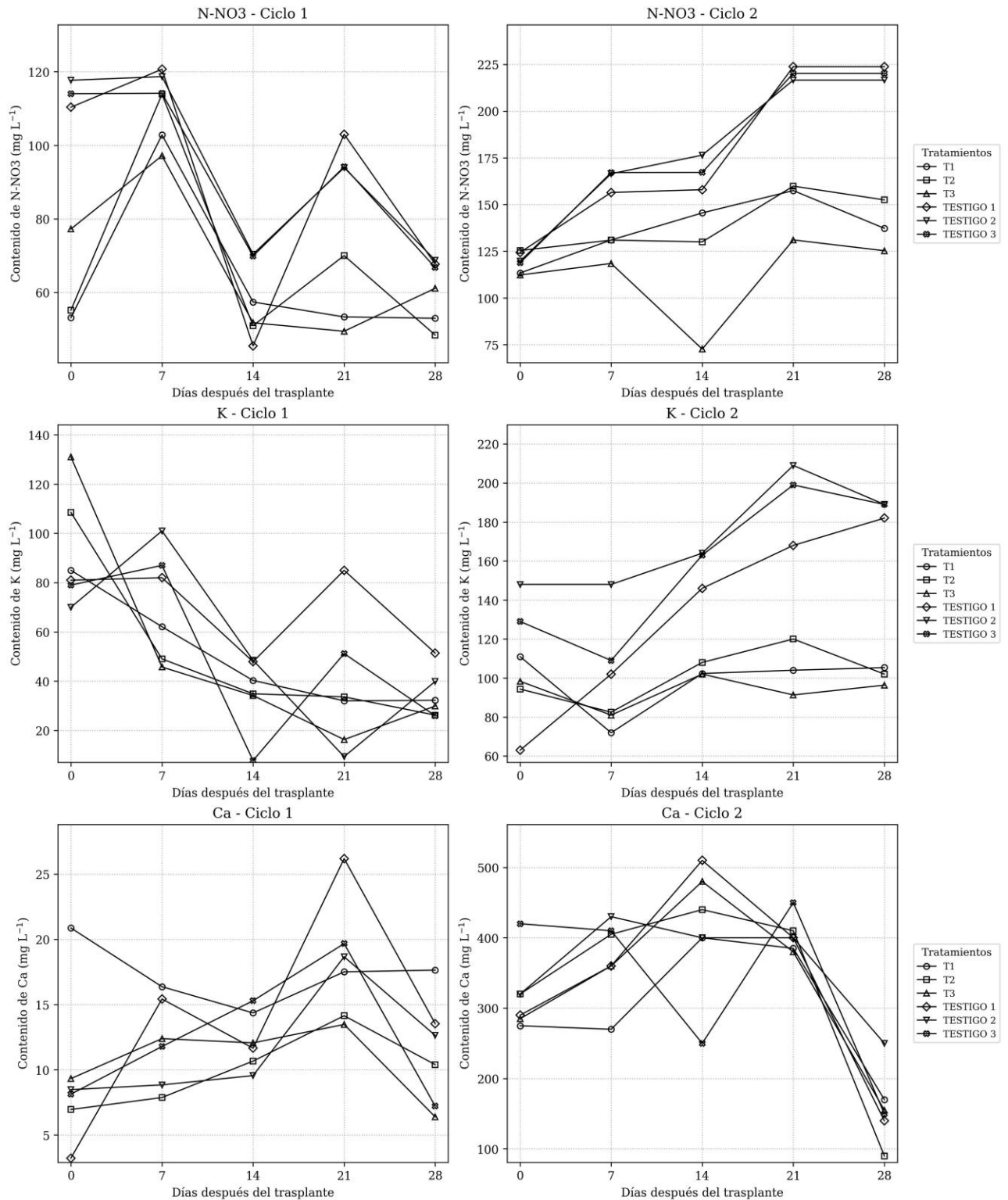


Figura 6. Concentración de calcio, potasio y nitrógeno en forma de nitratos en solución nutritiva para el ciclo 1 y el ciclo 2

3.5.6 Efectos de la suplementación en el crecimiento y la composición química de carne de Tilapia

La suplementación con hierro en el sistema acuapónico modificó significativamente la composición química de la carne de tilapia. El contenido proteico fue mayor en el testigo (18.45%), mientras que los tratamientos con Fe presentaron valores menores (16.48–17.61%), lo que indica que la suplementación redujo ligeramente la concentración de proteína, posiblemente por un aumento en la retención de humedad y ajustes metabólicos. En contraste, la grasa mostró un comportamiento inverso: T1 y T2 (dosis baja y moderada) registraron los valores más altos (2.86% y 2.62%), mientras que T3 y el testigo tuvieron menor contenido lipídico (1.91% y 1.65%). Asimismo, el colágeno aumentó en los tratamientos suplementados (1.69–1.78%) frente al testigo (0.74%), lo que puede influir en la textura del filete. Estos resultados coinciden con lo reportado por Luo *et al.* (2025), quienes señalan que el hierro afecta el metabolismo lipídico y la actividad antioxidante en peces, generando cambios en la composición corporal. Desde el punto de vista productivo, es necesario equilibrar la dosis para evitar disminuciones en proteína y mantener la calidad sensorial y nutricional del pescado, garantizando la sostenibilidad del sistema.

Cuadro 7. Composición química de carne de tilapias.

Tratamiento	P (%)	G (%)	H (%)	C (%)
T1	16.48 ± 0.2 ^c	2.86 ± 0.09 ^a	76.7 ± 0.09 ^c	1.78 ± 0.05 ^a
T2	16.93 ± 0.1 ^c	2.62 ± 0.1 ^a	77.08 ± 0.2 ^c	1.77 ± 0.07 ^{ab}
T3	17.61 ± 0.07 ^b	1.91 ± 0.04 ^b	77.99 ± 0.1 ^b	1.69 ± 0.09 ^b
Testigo	18.45 ± 0.018 ^a	1.65 ± 0.01 ^b	78.76 ± 0.03 ^a	0.74 ± 0.06 ^c

T1: tratamiento 1, T2: tratamiento 2, T3: tratamiento 3, P: proteína, G: grasa, H: humedad, C: colágeno.

Cuadro 8. Efecto de la suplementación con Fe, Ca, K y Mg en el crecimiento de Tilapia en un cultivo auapónico con espinaca en el ciclo 1

Tratamientos	Niveles de hierro del tratamiento		
	T1	T2	T3
Peso inicial (g)	93.50 ± 4.78	92 ± 3.50	96.50 ± 3.53
Peso final (g)	99.54 ± 3.22	100.09 ± 4.41	108.65 ± 4.79
Ganancia de peso (%)	5.87 ± 0.80	14.89 ± 2.23	11.49 ± 1.15

Cuadro 9. Efecto de la suplementación con Fe, Ca, K y Mg en el crecimiento de tilapia en un cultivo acuapónico con espinaca en el ciclo 2.

Tratamientos	Niveles de hierro del tratamiento		
	T1	T2	T3
Peso inicial (g)	132.45 ± 4.38	126.19 ± 3.70	133 ± 3.75
Peso final (g)	145.74 ± 4.89	150.43 ± 4.88	163.65 ± 4.93
Ganancia de peso (%)	10.03 ± 0.99	19.20 ± 4.36	23.04 ± 4.54

El crecimiento de tilapia mostró diferencias entre ciclos y tratamientos. En el ciclo 1, la dosis intermedia (T2, $3.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) generó la mayor ganancia de peso (14.89%), mientras que en el ciclo 2 la dosis alta (T3, $4.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) alcanzó el mejor resultado (23.04%). Este comportamiento sugiere que la respuesta al hierro no depende únicamente de la concentración, sino de la estabilidad nutrimental del sistema, la cual fue superior en el segundo ciclo gracias a las aplicaciones escalonadas. Estos hallazgos coinciden con Luo *et al* (2025), quienes destacan que el hierro, además de prevenir deficiencias, mejora el metabolismo y la eficiencia alimenticia cuando se maneja en equilibrio con otros nutrientes. En términos productivos, ajustar la dosis y la frecuencia de aplicación es clave para optimizar el crecimiento de peces sin comprometer la sostenibilidad del sistema acuapónico.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman que la suplementación con hierro es indispensable en sistemas acuapónicos para garantizar el desarrollo adecuado de la espinaca. La concentración intermedia ($3.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe-EDDHA), combinada con aplicaciones escalonadas de calcio, potasio y magnesio, mostró el mejor rendimiento vegetal sin generar antagonismos nutrimentales ni estrés osmótico. Aunque la dosis más alta ($4.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) favoreció la biomasa inicial, no aseguró un mayor rendimiento final y presentó riesgos de desequilibrio mineral. En tilapia, la suplementación modificó la composición de carne, reduciendo proteína y aumentando grasa y colágeno, lo que implica la necesidad de ajustar las dosis para mantener la calidad del producto. En conclusión, la estrategia de aplicación frecuente y dosis moderadas de hierro mejora la productividad vegetal y la sostenibilidad del sistema acuapónico, contribuyendo a la integración eficiente de la producción agrícola y acuícola, garantizando sistemas más eficientes y sostenibles.

5. LITERATURA CITADA

- AOAC International. (2007). Official Method 2007.04: Fat, Moisture, and Protein in Meat and Meat Products by NIR (FoodScan). AOAC International.
- Alzate, M., Cardarelli, M., Rouphael, Y., Cesco, S., Pii, Y., & Colla, G. (2023). Iron nutrition in agriculture: From synthetic chelates to biochelates. *Scientia Horticulturae*, 312. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111833>
- Auxiliadora, M. (2006). *Manejo del cultivo de tilapia*.
- Bonham, V. (2022). *Oreochromis niloticus (Nile tilapia) Summary Datasheet Type(s) Preferred Scientific Name Preferred Common Name Summary of Invasiveness*.
- Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). (2012). *Manual de Determinación de rendimiento*. <https://idp.cimmyt.org/publicacion/manual-del-determinacion-de-rendimiento/>
- Chapman, H. D., & Pratt, P. F. (1961). *Methods of Analysis for Soils, Plants and Waters*. University of California, Division of Agricultural Sciences.
- Chong, W. J., Liu, Y., Qian, M., Qian, W., & Shao, D. (2013). Mild Fe-deficiency improves biomass production and quality of hydroponic-cultivated spinach plants (*Spinacia oleracea* L.). *Food Chemistry*, 138(4), 2188–2194. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.12.025>
- De la Cruz, V., García, A., Shamah, T., Villalpando, S., Valdez, R., & Mejía Fabiola. (2023). Micronutrient status in Mexican children: analysis of the Ensanut 2022. *Salud Publica de Mexico*, 65. <https://doi.org/10.21149/14781>
- Di, A. H. (2023). *Ecofisiología de especies hortícolas* (1a ed.). Profe Ediciones. https://www.researchgate.net/profile/Adalberto-Di-Benedetto/publication/384039256_Di_Benedetto_2023a/links/66e58dcda438c86fdcccf578/Di-Benedetto-2023a.pdf#page=193
- Farooq, A., Verma, A. K., Hittinahalli, C. M., Harika, N., & Pai, M. (2023). Iron supplementation in aquaculture wastewater and its effect on the growth of spinach and pangasius in nutrient film technique based aquaponics. *Agricultural Water Management*, 277. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108126>
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. (2019). Aquaponics Food Production systems Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future. In *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. European Cooperation

in science & Technology. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6>

Hernández, M., Martínez, E., & Carranza, F. (2022). *Determinación del análisis bromatológico proximal y minerales en tilapias (oreochromis ssp) cultivadas en tres lagos de El Salvador*.

ITW Reagents. (2018). *Determinación de Nitrógeno por el Método Kjeldahl*. https://www.itwreagents.com/uploads/20180122/A173_ES.pdf

Jiménez, J., Arias, L. A., Espinosa, L., Fuentes, L. S., Garzón, C., Gil, R., Niño, N., & Rodríguez, M. (2010). *El cultivo de la Espinaca (Spinacia oleracea L.) y su manejo fitosanitario en Colombia*. www.utadeo.edu.co

Johnson, C. M., & Ulrich, A. (1959). *Analytical Methods for Use in Plant Analysis*. California Agricultural Experiment Station Bulletin

Lasheras, J., León, J., & Ramírez, P. (2016). *Estimación del Área Foliar mediante un Método Directo No Destructivo en Vid*.

Luo, X. L., Yan, J. J., Rauan, A., & Ji, H. (2024). Impact of iron supplementation on media bed aquaponic system: Focusing on growth performance, fatty acid composition and health status of juvenile mirror carp (*Cyprinus carpio* var. *specularis*), production of lettuce (*Lactuca sativa* var. *ramosa* Hort), water quality and nitrogen utilization rate. *Aquaculture*, 582. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.740509>

Marschner, P., York, N., San Diego, P., & Francisco, S. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants Third Edition*. www.macmillansolutions.com

Meena, L. L., Verma, A. K., Krishnani, K. K., Reang, D., Chandrakant, M. H., & John, V. C. (2023). Effects of foliar application of macronutrients (K, P) and micronutrient (Fe) on the growth of okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) and Pangasius (*Pangasianodon hypophthalmus*) in a recirculating aquaponic system. *South African Journal of Botany*, 160, 384–393. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.07.029>

Menchú, M., Méndez, H., & Alfaro, N. (2012). *Tabla de composición de alimentos de centroamérica*. <http://www.incap.int>

Minitab, LLC. (2007). *Minitab Statistical Software (Versión 15)* <https://www.minitab.com>

- Pineda-Pineda, J., Miranda-Velázquez, I., Ramírez-Arias, J. A., Rio, R. R. Del, Vargas-Hernández, M., Roldán-Guzmán, V., & García-Jaimes, A. (2018). Culture of lily (*Lilium* sp.) 'Table Dance' in an aquaponic system. *Acta Horticulturae*, 1227, 355–363. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1227.44>
- Riaño, E., Caidedo, L., Torres, A., Hurtado, H., & Gómez, E. (2019). *Cambios en los niveles de nutrientes en solución hidropónica de espinaca baby (Spinacia oleracea L.), para su futura aplicación en acuaponía*.
- Roosta, H. R., & Hamidpour, M. (2011). Effects of foliar application of some macro- and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. *Scientia Horticulturae*, 129(3), 396–402. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.04.006>
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2022). Producción de alimentos en acuaponía a pequeña escala – Cultivo integral de peces y plantas. In *Producción de alimentos en acuaponía a pequeña escala – Cultivo integral de peces y plantas*. FAO. <https://doi.org/10.4060/i4021es>
- Thermo Fisher Scientific. (2021). *Sample preparation techniques for AAS, ICP-OES and ICP-MS for regulated testing laboratories*. <https://documents.thermofisher.com/TFS-Assets/CMD/Technical-Notes/tn-44483-aas-icp-oes-icp-ms-sample-prep-regulated-test-tn44483-en.pdf>
- Tsoumalakou, E., Mente, E., Vlahos, N., & Levizou, E. (2023). Spinach Responds to Minimal Nutrient Supplementation in Aquaponics by Up-Regulating Light Use Efficiency, Photochemistry, and Carboxylation. *Horticulturae*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030291>