



Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión
Facultad de Ingeniería Agraria, Industrias Alimentarias y Ambiental
Escuela Profesional de Ingeniería Agronómica

**Efecto de tres fuentes orgánicas y niveles de aplicación sobre la acumulación de
micronutrientes en raíces de betarraga (*Beta vulgaris* L.) en condiciones de suelo
arenoso**

Tesis

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Agrónomo

Autores

Boris Martin Pese Ruiz

Jeandeth Jair Saavedra Martinez

Asesor

Dr. Dionicio Belisario Luis Olivas




DIONICIO BELISARIO LUIS OLIVAS
INGENIERO AGRÓNOMO
CIP N° 066110

Huacho-Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial – Sin Derivadas - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Reconocimiento: Debe otorgar el crédito correspondiente, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se realizaron cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de ninguna manera que sugiera que el licenciante lo respalda a usted o su uso. **No Comercial:** No puede utilizar el material con fines comerciales.

Sin Derivadas: Si remezcla, transforma o construye sobre el material, no puede distribuir el material modificado. **Sin restricciones adicionales:** No puede aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros de hacer cualquier cosa que permita la licencia.



UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN

LICENCIADA

(Resolución de Consejo Directivo N° 012-2020-SUNEDU/CD de fecha 27/01/2020)

Facultad de Ingeniería Agraria, Industrias Alimentarias y Ambiental
Escuela Profesional de Ingeniería Agronómica

METADATOS

DATOS DEL AUTOR (ES):		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	FECHA DE SUSTENTACIÓN
Boris Martin Pese Ruiz	61368634	30/06/2026
Jeandeth Jair Saavedra Martinez	72812757	30/06/2026
DATOS DEL ASESOR:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CÓDIGO ORCID
Dr. Dionicio Belisario Luis Olivas	15651224	https://orcid.org/0000-0002-5367-5285
DATOS DE LOS MIEMBROS DE JURADOS – PREGRADO/POSGRADO-MAESTRÍA- DOCTORADO:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CODIGO ORCID
Dr. Sergio Eduardo Contreras Liza	08787108	https://orcid.org/0000-0002-6895-4332
Dr. Marco Tulio Sanchez Calle	02807986	https://orcid.org/0000-0001-9687-2476
Mg. Sc. Luis Alberto Goñy Ameri	15736762	https://orcid.org/0000-0001-9468-8253

036994Boris Martin Pese Ruiz 036944Jeandeth Jair ...

Efecto de tres fuentes orgánicas y niveles de aplicación sobre la acumulación de micronutrientes en raíces de betarraga (Bet...

UI-FIAIAYA PREGRADO 2026

Unidad de Investigación FIAIAYA-2026

Facultad de Ingeniería Agrarias, Industrias Alimentarias y Ambiental

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::1:3569830271

Fecha de entrega

14 may 2026, 10:02 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

15 may 2026, 9:11 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

BORRADOR_DE_TESIS_Boris_-_Jean.pdf

Tamaño del archivo

771.3 KB

67 páginas

18.013 palabras

103.018 caracteres



Página 2 de 75 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid::1:3569830271

20% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 3 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

20% Fuentes de Internet

10% Publicaciones

9% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Dedicatoria

A Dios, por acompañarnos en cada etapa de este proceso y brindarnos la fortaleza necesaria para culminar este logro.

A nuestros padres, por su apoyo incondicional, sus enseñanzas y por ser la inspiración constante que nos impulsó a alcanzar esta meta.

A nuestras familias, por su comprensión, paciencia y aliento permanente a lo largo de este camino.

Agradecimiento

- Nuestro profundo reconocimiento a nuestros padres, por ser el soporte esencial de nuestra formación, por su ejemplo de vida, valores y confianza permanente, factores determinantes en el logro de nuestra meta profesional.
- De igual manera, manifestamos nuestro reconocimiento a nuestro asesor, Dr. Dionicio Belisario Luis Olivas, por su rigurosa orientación académica, compromiso y valiosos aportes, los cuales contribuyeron significativamente al desarrollo y culminación de la presente investigación.
- De manera especial, agradecemos a todas las personas que formaron parte de este proceso, cuyo apoyo y colaboración enriquecieron cada etapa de este camino.

ÍNDICE

RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1 Descripción de la realidad problemática	3
1.2 Formulación del problema.....	4
1.2.1 Problema general	4
1.2.2 Problemas específicos.....	4
1.3 Objetivos de la investigación.....	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Justificación de la investigación	5
1.5 Delimitación del estudio	5
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 Antecedentes de la investigación.....	7
2.1.1 Antecedentes internacionales	7
2.1.2 Antecedentes nacionales.....	8
2.2 Bases Teóricas	10
2.3 Definición de términos básicos.....	16
2.4 Hipótesis de investigación	17
2.4.1 Hipótesis General	17
2.4.2 Hipótesis Específicas	17
2.5 Operacionalización de las variables	17
CAPITULO III. METODOLOGÍA.....	18
3.1 Diseño metodológico	18
3.1.1 Ubicación.....	18
3.1.2 Características del área experimental	18
3.1.3 Tratamientos	20
3.1.4 Diseño experimental	20
3.1.5 Variables a evaluar	21
3.3 Técnicas de recolección de datos.....	22
3.4 Técnicas de procesamiento de datos.....	22

CAPITULO IV. RESULTADOS	23
4.1 Concentración de los micronutrientes (mg kg ⁻¹)	23
4.1.1 Zinc (Zn).....	23
4.1.2 Cobre (Cu)	25
4.1.3 Manganeso (Mn)	27
4.1.4 Hierro (Fe)	29
4.1.5 Boro (B).....	32
4.2 Acumulación de los micronutrientes en las raíces de betarraga.....	33
4.2.1 Zinc (Zn).....	33
4.2.2 Cobre (Cu)	35
4.2.3 Manganeso (Mn)	37
4.2.4 Hierro (Fe)	38
4.2.5 Boro (B).....	42
CAPITULO V. DISCUSIONES.....	44
CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	47
CAPITULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

INDICE DE TABLAS

Tabla1	Operacionalización de las variables	17
Tabla2	Tratamientos	20
Tabla 3	Análisis de varianza.....	20
Tabla4	Analisis de varianza para la concentración de zinc (mg kg^{-1}) en las raices de betarraga	23
Tabla5	Prueba de Tukey al 5% para la comparación de la concentración de Zinc (mg kg^{-1}) en las raíces.....	24
Tabla6	Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de Zinc (ppm) entre fuentes orgánicas	24
Tabla7	Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de Zinc (ppm) entre dosis.....	25
Tabla8	Analisis de varianza para la concentración de cobre (mg kg^{-1}) en las raices de betarraga	26
Tabla9	<i>Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de cobre (mg kg^{-1})</i>	26
Tabla10	Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de cobre (mg kg^{-1}) entre fuentes orgánicas	26
Tabla11	Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de cobre (mg kg^{-1}) entre dosis.....	27
Tabla12	Analisis de varianza para la concentración de manganeso (mg kg^{-1}) en las raices de betarraga	27
Tabla13	Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de manganeso (mg kg^{-1})	28
Tabla14	Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de manganeso (mg kg^{-1}) entre fuentes orgánicas.....	28
Tabla15	Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de manganeso (mg kg^{-1}) entre dosis	28
Tabla16	Analisis de varianza para la concentración de hierro (mg kg^{-1}) en las raices de betarraga	29
Tabla17	Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de hierro (mg kg^{-1})	29
Tabla18	Analisis de facto simple para fuente dentro cada nivel de dosis	30

Tabla19 Prueba de Tukey al 5% para concentración de hierro (mg kg^{-1}) en Fuentes dentro del nivel 10 t ha^{-1}	30
Tabla20 Prueba de Tukey al 5% para concentración de hierro (mg kg^{-1}) en Fuentes dentro del nivel 15 t ha^{-1}	31
Tabla21 Analisis de efecto simple para dosis dentro cada nivel de fuente	31
Tabla22 Prueba de Tukey al 5% para Dosis dentro de la fuente EBV	31
Tabla23 Analisis de varianza para la concentración de boro (mg kg^{-1}) en las raices de betarraga	32
Tabla24 Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de boro (mg kg^{-1})	32
Tabla25 Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de boro (mg kg^{-1}) entre fuentes orgánicas	33
Tabla26 Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de boro (mg kg^{-1}) entre dosis	33
Tabla27 Analisis de varianza para la acumulación de zinc (g ha^{-1}) en las raices de betarraga	34
Tabla28 Prueba de Tukey al 5% para la comparación de la acumulación de zinc (g ha^{-1})	34
Tabla29 Prueba de Tukey al 5% para la comparación de la acumulación de zinc (g ha^{-1}) entre fuentes orgánicas	34
Tabla30 Prueba de Tukey al 5% para la comparación de la acumulación de zinc (g ha^{-1}) entre dosis	35
Tabla31 Analisis de varianza para la acumulación de cobre (g ha^{-1}) en las raices de betarraga	35
Tabla32 Prueba de Tukey al 5% para la comparación de la acumulación de cobre (g ha^{-1})	36
Tabla33 Prueba de Tukey al 5% para la comparación de acumulación de cobre (g ha^{-1}) entre fuentes orgánicas.....	36
Tabla34 Prueba de Tukey al 5% para la comparación de acumulación de cobre (g ha^{-1}) entre dosis.....	36
Tabla35 Analisis de varianza para la acumulación de manganeso (g ha^{-1}) en las raices de betarraga	37
Tabla36 Prueba de Tukey al 5% para la comparación de la acumulación de manganeso (g ha^{-1}).....	37

Tabla37 Prueba de Tukey al 5% para la comparación de acumulación de manganeso (ppm) entre fuentes orgánicas	38
Tabla38 Prueba de Tukey al 5% para la comparación de acumulación de manganeso (g ha ⁻¹) entre dosis.....	38
Tabla39 Analisis de varianza para la acumulación de hierro (g ha ⁻¹) en las raices de betarraga	39
Tabla40 Prueba de Tukey al 5% para la comparación de la acumulación de hierro (kg ha ⁻¹)	39
Tabla41 Analisis de fecto simple para fuente dentro cada nivel de dosis	40
Tabla42 Prueba de Tukey al 5% para Fuente dentro del nivel de 15 t ha ⁻¹	40
Tabla43 Analisis de efecto simple para dosis dentro cada nivel de fuente	41
Tabla44 Prueba de Tukey al 5% para dosis dentro del nivel de compost	41
Tabla45 Prueba de Tukey al 5% para dosis dentro del nivel de EBV	41
Tabla46 Analisis de varianza para la acumulación de boro (g ha ⁻¹) en las raices de betarraga	42
Tabla47 Prueba de Tukey al 5% para la comparación de la acumulación de boro (g ha ⁻¹)	42
Tabla48 Prueba de Tukey al 5% para la comparación de acumulación de boro (g ha ⁻¹) entre fuentes orgánicas	43
Tabla 49	43

RESUMEN

Objetivo: Evaluar el efecto de tres fuentes orgánicas (humus, compost y estiércol bovino - EBV) y distintos niveles de aplicación sobre la acumulación de micronutrientes en raíces de betarraga (*Beta vulgaris* L.) cultivada en condiciones de suelo arenoso. **Metodología:** Se empleó una metodología experimental basada en un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial 3×3 más un testigo, considerando tres fuentes orgánicas y tres dosis (5, 10 y 15 t ha^{-1}), con tres repeticiones. El experimento se desarrolló en campo durante una campaña agrícola completa, y se evaluaron variables como la concentración y acumulación de micronutrientes (Zn, Cu, Mn, Fe y B) en las raíces, mediante análisis de laboratorio y procesamiento estadístico con ANOVA y prueba de Tukey al 5%. **Resultados:** Los resultados evidenciaron que la aplicación de enmiendas orgánicas influyó significativamente en la acumulación de micronutrientes, aunque con variaciones según el elemento evaluado. En el caso del zinc y cobre, las fuentes orgánicas mostraron efectos significativos, destacando el estiércol bovino (EBV) como la fuente más eficiente para incrementar su concentración en las raíces. Asimismo, se observó que el tratamiento factorial superó al testigo en la mayoría de los micronutrientes, lo que confirma el efecto positivo de las enmiendas orgánicas. Para el manganeso, la dosis aplicada fue el factor más influyente, mientras que en algunos casos no se evidenció interacción significativa entre fuente y dosis. **Conclusión:** el uso de enmiendas orgánicas mejora la disponibilidad y acumulación de micronutrientes en raíces de betarraga cultivada en suelos arenosos, siendo el tipo de fuente orgánica un factor determinante, más que la dosis en algunos casos.

Palabras clave: *Beta vulgaris* L., fuentes orgánicas, suelo arenoso, micronutrientes, acumulación de nutrientes.

ABSTRACT

Objective: To evaluate the effect of three organic sources (humus, compost, and cattle manure - EBV) and different application levels on the accumulation of micronutrients in beetroot (*Beta vulgaris* L.) roots grown under sandy soil conditions. **Methodology:** An experimental methodology was used based on a randomized complete block design with a 3×3 factorial arrangement plus a control, considering three organic sources and three doses (5, 10, and 15 t ha⁻¹), with three replications. The experiment was conducted under field conditions during one agricultural season, and variables such as the concentration and accumulation of micronutrients (Zn, Cu, Mn, Fe, and B) in the roots were evaluated through laboratory analysis and statistical processing using ANOVA and Tukey's test at 5%. **Results:** The results showed that the application of organic amendments significantly influenced micronutrient accumulation, although with variations depending on the element evaluated. In the case of zinc and copper, organic sources had significant effects, highlighting cattle manure (EBV) as the most efficient source for increasing their concentration in roots. Likewise, the factorial treatment outperformed the control in most micronutrients, confirming the positive effect of organic amendments. For manganese, the applied dose was the most influential factor, while in some cases no significant interaction between source and dose was observed. **Conclusion:** The use of organic amendments improves the availability and accumulation of micronutrients in beetroot roots grown in sandy soils, with the type of organic source being a determining factor, more so than the dose in some cases.

Keywords: *Beta vulgaris* L., organic sources, sandy soil, micronutrients, nutrient accumulation.

INTRODUCCIÓN

La producción agrícola en suelos arenosos enfrenta importantes limitaciones asociadas a su baja fertilidad natural, caracterizada por una reducida capacidad de intercambio catiónico, escaso contenido de materia orgánica y alta susceptibilidad a la lixiviación de nutrientes. Estas condiciones afectan de manera significativa la disponibilidad de elementos esenciales para el crecimiento vegetal, especialmente de los micronutrientes, cuya deficiencia puede comprometer tanto el rendimiento como la calidad nutricional de los cultivos. En este contexto, el manejo adecuado de la fertilidad del suelo constituye un aspecto clave para optimizar la productividad agrícola en sistemas de producción sostenibles.

La betarraga (*Beta vulgaris* L.) es un cultivo de gran importancia económica y nutricional, ampliamente valorado por su contenido de vitaminas, compuestos bioactivos y minerales esenciales como hierro, zinc, manganeso y cobre. Debido a que la parte comestible corresponde a la raíz, la disponibilidad y absorción de nutrientes en el suelo adquieren especial relevancia, ya que influyen directamente en la calidad y valor nutricional del producto final. Sin embargo, en suelos arenosos, la eficiencia en la absorción de micronutrientes suele ser limitada, lo que puede traducirse en deficiencias nutricionales y menor calidad del cultivo.

Ante esta problemática, el uso de enmiendas orgánicas se presenta como una alternativa viable para mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Materiales como el humus, el compost y otros residuos orgánicos estabilizados no solo aportan nutrientes, sino que también incrementan el contenido de materia orgánica, favorecen la actividad microbiana y mejoran la retención de agua y nutrientes. Estos efectos contribuyen a una mayor disponibilidad de micronutrientes en la solución del suelo y, por ende, a una mejor absorción por parte de las plantas.

Diversos estudios han demostrado que la aplicación de enmiendas orgánicas puede incrementar la disponibilidad de micronutrientes como hierro, zinc, manganeso y cobre, mediante procesos de mineralización, quelatación y mejora de la capacidad de intercambio catiónico del suelo. No obstante, la magnitud de estos efectos depende de factores como el tipo de enmienda utilizada, la dosis aplicada y las características propias del suelo. Asimismo, la respuesta del cultivo puede variar dependiendo del micronutriente evaluado y

del indicador utilizado, ya sea concentración en el tejido vegetal o acumulación total en la planta.

En este sentido, resulta necesario profundizar en el estudio del efecto de diferentes fuentes y niveles de enmiendas orgánicas sobre la dinámica de micronutrientes en cultivos de raíz como la betarraga, especialmente bajo condiciones de suelos arenosos. La comprensión de estas interacciones permitirá optimizar las estrategias de manejo nutricional, mejorar la eficiencia en el uso de los nutrientes y contribuir a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

CAPITULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

En los suelos arenosos, la baja retención de agua y la escasa materia orgánica disminuyen la disponibilidad de micronutrientes como Zn, B, Fe y Mn. Su bajo intercambio catiónico y alta permeabilidad favorecen la lixiviación, reduciendo la eficiencia de la fertilización y generando variaciones en la nutrición del cultivo. Esto afecta directamente el rendimiento y la calidad del producto (Singaravel et al., 2005).

La betarraga (*Beta vulgaris* L.) es un cultivo de raíz ampliamente valorado por su aporte de minerales, pigmentos (betalainas) y compuestos bioactivos; la acumulación de micronutrientes en la raíz influye tanto en la calidad nutricional del alimento como en parámetros productivos (peso, tamaño, concentración de sólidos y pigmentos). En consecuencia, deficiencias o desequilibrios en micronutrientes afectan la calidad comercial y el valor nutritivo de la raíz (Abdo et al., 2020).

Las enmiendas orgánicas (estiércoles, compost, residuos de biogás, biochar, entre otras) constituyen una alternativa efectiva para mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas de suelos con baja materia orgánica. Diversos estudios señalan que una adecuada selección y dosis de aplicación pueden incrementar la materia orgánica, mejorar la disponibilidad de N, P y K y modificar la dinámica de micronutrientes, aunque sus efectos dependen del tipo de enmienda y de las condiciones del suelo. En suelos arenosos, enmiendas más estables como el biochar y aquellas con liberación gradual de nutrientes ayudan a reducir la lixiviación y favorecen una mayor retención de micronutrientes. (Zhao et al., 2021).

Sin embargo, persiste una brecha de conocimiento respecto al manejo de la betarraga en suelos arenosos, pues aún faltan estudios que comparen diferentes fuentes orgánicas y niveles de aplicación sobre la acumulación de micronutrientes específicamente en la raíz, y que vinculen estos efectos con la calidad del tubérculo. Asimismo, se requiere determinar dosis que mejoren la retención de micronutrientes sin generar riesgos ambientales. Esta falta de información limita la formulación de recomendaciones técnicas para los productores y afecta la sostenibilidad y calidad de la producción en suelos arenosos (Goss et al. 2013).

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿De qué manera influyen las tres fuentes orgánicas y diferentes niveles de aplicación en la acumulación de micronutrientes en las raíces de betarraga cultivada en condiciones de suelo arenoso?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cómo afecta cada fuente orgánica a la disponibilidad y absorción de micronutrientes (Fe, Zn, B, Mn) en raíces de betarraga en suelo arenoso?
- ¿Qué nivel de aplicación de cada fuente orgánica favorece una mayor acumulación de micronutrientes en las raíces?
- ¿Existe interacción entre fuente orgánica y nivel de aplicación en la acumulación total de micronutrientes en raíces de betarraga?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de tres fuentes orgánicas y distintos niveles de aplicación sobre la acumulación de micronutrientes en raíces de betarraga cultivada en condiciones de suelo arenoso.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar la influencia de cada fuente orgánica en la disponibilidad y absorción de micronutrientes en raíces de betarraga.
- Identificar el nivel de aplicación de cada fuente orgánica que optimiza la acumulación de micronutrientes en raíces.
- Analizar la interacción entre tipo de fuente orgánica y nivel de aplicación sobre la acumulación total de micronutrientes.

1.4 Justificación de la investigación

Conveniencia

El estudio es conveniente porque genera información científica sobre el uso de fuentes orgánicas en suelos arenosos, los cuales presentan alta lixiviación y baja retención de micronutrientes. Esta información permitirá optimizar los programas de fertilización orgánica y mejorar la eficiencia del uso de nutrientes en la betarraga, un cultivo de interés económico y nutricional.

Relevancia social

El cultivo de betarraga es una fuente importante de minerales, fibra y antioxidantes para la población. Incrementar la acumulación de micronutrientes en la raíz contribuye a mejorar su calidad nutricional. Además, el uso de enmiendas orgánicas promueve sistemas agrícolas más sostenibles, favoreciendo la salud del suelo y reduciendo el uso de fertilizantes sintéticos.

Implicaciones prácticas

Los resultados permitirán establecer dosis adecuadas y tipos de enmiendas orgánicas más eficientes en suelos arenosos, mejorando la calidad de la raíz y aumentando su valor comercial. Asimismo, aportará herramientas de manejo aplicables a productores, asociaciones agrícolas y técnicos que trabajan en zonas con limitaciones edáficas.

Utilidad metodológica

La investigación aporta un diseño experimental replicable, integrando análisis de suelo, planta y respuesta fisiológica frente a diferentes fuentes orgánicas. Esto servirá de referencia para futuros estudios en cultivos de raíz y en suelos de baja fertilidad, fortaleciendo la investigación agrícola local y regional.

1.5 Delimitación del estudio

Delimitación espacial

El estudio se desarrolló en un área agrícola caracterizada por suelos de textura arenosa, localizada dentro de la zona de producción donde se establece el cultivo de betarraga. El lugar presenta condiciones edafoclimáticas representativas de regiones con baja retención de agua y nutrientes, lo cual permite evaluar adecuadamente el efecto de las fuentes orgánicas y sus niveles de aplicación sobre la acumulación de micronutrientes.

Delimitación temporal

La investigación abarcó una campaña agrícola completa, desde la preparación del terreno, siembra y manejo del cultivo, hasta la cosecha y análisis final de las raíces. El período del estudio comprendió aproximadamente 90 a 120 días, que corresponde al ciclo fenológico típico de la betarraga.

Delimitación del universo

El universo del estudio estuvo constituido por plantas de betarraga cultivadas en condiciones de suelo arenoso dentro del área agrícola seleccionada. La población experimental incluyó todas las unidades productivas del cultivo establecidas en el terreno, mientras que la muestra estuvo formada por las parcelas experimentales determinadas en el diseño estadístico (tratamientos y repeticiones), de donde se realizaron los muestreos de suelo y raíces para la evaluación de micronutrientes.

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

Jagadeesh et al. (2018) tuvieron como finalidad determinar el efecto de diversas fuentes orgánicas, aplicadas solas o combinadas con AGR, sobre la absorción de N, P y K en remolacha cultivada en suelos alcalinos. El ensayo se estableció bajo un diseño de bloques completos al azar con once tratamientos y tres repeticiones, que incluyeron aplicaciones al 100% de vermicompost, gallinaza, torta de neem, abono verde y AGR, además de combinaciones 50/50 entre AGR y cada fuente orgánica, junto con un tratamiento con la dosis recomendada de fertilización y un control. Los resultados mostraron que la mezcla AGR (50%) + vermicompost (50%) obtuvo la mayor absorción de nitrógeno, mientras que la gallinaza al 100% permitió una absorción superior de fósforo y potasio. En conclusión, la combinación de AGR con vermicompost favorece la captación de N, y la gallinaza se posiciona como una opción orgánica eficaz para optimizar la absorción de P y K, evidenciando el potencial de los abonos orgánicos para mejorar la nutrición del cultivo en suelos alcalinos.

Paulauskienė et al. (2023) compararon las diferencias entre las remolachas cultivadas de forma convencional y orgánica utilizando métodos de investigación químicos y electroquímicos que demuestran los procesos de vida en los productos. Determinaron la composición química principal y las coordenadas de color. Aplicaron métodos de investigación electroquímica holística para demostrar la vitalidad de los productos. Encontraron que el rendimiento de las remolachas cultivadas convencionalmente en función de los cultivares fue de un 4 a un 19% mayor que el de las verduras cultivadas orgánicamente, y la dependencia de la composición química en el sistema de cultivo fue ambigua. Aunque las mayores cantidades de MS (13,70–15,90%), TSS (10,50–12,20%) y azúcares (8,47–8,98%) se encontraron en remolachas cultivadas orgánicamente. La mayor cantidad en el peso fresco de Ca (310 mg kg⁻¹) y Mg (470 mg kg⁻¹) se acumuló en el cv 'Joniai' cultivado convencionalmente; solo las remolachas cv 'Jolie' H cultivadas orgánicamente acumularon la mayor cantidad de Fe (17,40 mg kg⁻¹). Sin embargo, los valores más bajos de los parámetros electroquímicos rH y P mostraron una mejor calidad de la remolacha cultivada ecológicamente, mejor vitalidad y mejor aptitud para el consumo humano.

Muhammad et al. (2023) evaluaron diferentes fuentes orgánicas y sus tasas de aplicación para identificar cuáles mejoran rendimiento y calidad (incluyendo acumulación de reservas en raíces) en variedades de *Beta vulgaris*. Utilizaron varios tratamientos que combinaron distintas enmiendas orgánicas (estiércol de aves, compost) aplicadas a tasas comparativas; diseño en bloques al azar con repeticiones; evaluación de rendimiento de raíz, parámetros de calidad y respuesta varietal. Como resultado obtuvieron que algunas enmiendas orgánicas (estiércol de aves a tasa optimizada) aumentaron significativamente el rendimiento de raíz, contenido de azúcares y reservas, y mostraron mejor respuesta en ciertas variedades. Llegaron a la conclusión que la elección de la fuente orgánica y la dosis influyen en la productividad y calidad de la raíz; una dosis óptima de materia orgánica puede mejorar la acumulación de reservas en raíces y la calidad comercial.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Chang et al. (2022) evaluaron si un compost elaborado a partir de residuos de tierra de blanqueo puede mejorar el rendimiento y la concentración de nutrientes, tanto macro como micro, en betarraga. Para ello se estableció un ensayo con distintos tratamientos correspondientes a diferentes dosis de compost, cada uno con sus respectivas réplicas. Además, se realizó un análisis físico-químico del compost y se efectuaron muestreos foliares para determinar la concentración de nutrientes en las plantas, junto con la evaluación del rendimiento comercial. Los resultados mostraron que ciertas dosis, especialmente una dosis intermedia, generaron un incremento significativo en el rendimiento y un aumento en la concentración foliar de micronutrientes como Zn y B, destacando particularmente el tratamiento T4 por su mayor rendimiento. El análisis de laboratorio del compost evidenció altos contenidos de Fe y otros microelementos que podrían explicar la mejora nutricional observada. En conclusión, el compost producido a partir de residuos de tierra de blanqueo tiene el potencial de mejorar la nutrición foliar y el rendimiento de la betarraga cuando se aplica en dosis adecuadas, y su efectividad depende tanto de la calidad del compost como de la cantidad empleada.

Manga (2022) Investigó que el efecto de dos densidades de siembra y de diferentes fuentes de abonamiento orgánico-guano de isla y humus de lombriz en la producción de dos variedades de betarraga. Se empleó un diseño experimental de bloques completos al azar con arreglo factorial (2 densidades × 3 abonamientos × 2 variedades), conformado por 12 tratamientos y 4 repeticiones, evaluándose tanto el rendimiento como diversos parámetros

biométricos. Los resultados mostraron que el guano de isla generó los mayores rendimientos, alcanzando aproximadamente $30,8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, superando al humus de lombriz y al tratamiento testigo. Asimismo, la densidad de siembra y su interacción con la fuente de abonamiento influyeron significativamente en el rendimiento y otras características agronómicas. En conclusión, la combinación adecuada de densidad y fuente de abono particularmente el guano de isla en este estudio mejora la producción de betarraga, por lo que se recomienda ajustar la dosis y la densidad en función de la variedad y de las condiciones locales.

Quispe (2023) tuvo como objetivo valorar cómo la combinación de soluciones nutritivas — aportando macro y micronutrientes— y abonos orgánicos, específicamente humus de lombriz y compost, influyen en el rendimiento del cultivo de betarraga. El ensayo se estructuró mediante un arreglo factorial que combinó distintas dosis de solución nutritiva con los tipos de abono orgánico, evaluándose el crecimiento, el rendimiento y el comportamiento nutricional del cultivo. Los resultados mostraron que la aplicación conjunta de abonos orgánicos y soluciones nutritivas incrementó el rendimiento y mejoró varios parámetros de calidad, con respuestas dependientes tanto de la dosis aplicada como del tipo de abono orgánico empleado. En conclusión, la interacción entre enmiendas orgánicas y un suministro controlado de macro y micronutrientes puede optimizar la producción de betarraga, destacando la importancia de ajustar las dosis para maximizar la absorción y evitar desequilibrios nutricionales.

Hoyos (2023) evaluó el efecto de la aplicación de guano de isla y humus de lombriz en el rendimiento del cultivo de betarraga. Utilizó el diseño de bloques completamente al azar (3 bloques) con cinco tratamientos (dosis de enmiendas) y repeticiones; mediciones agronómicas (altura, longitud y diámetro de raíz, peso, materia seca) y análisis económico. Obtuvieron como resultado que el tratamiento con $4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ de guano de isla presentó el mayor rendimiento ($41,562 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) y buenas respuestas económicas; dosis intermedias también mostraron índices de rentabilidad altos. Variables biométricas y de rendimiento variaron significativamente entre tratamientos. En conclusión, la aplicación de guano de isla a $4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ (y en menor medida $2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) mejora significativamente el rendimiento y la rentabilidad de la betarraga en las condiciones experimentales; el humus de lombriz mostró respuestas favorables pero inferiores al guano.

La Rosa (2024) evaluó la respuesta del cultivo de betarraga a distintas dosis de compost elaborado a partir de residuos de pescado, con énfasis en el rendimiento y en variables de

calidad del tubérculo. Para ello se desarrolló un ensayo de campo con varios tratamientos definidos por diferentes dosis de compost y sus respectivas réplicas, analizándose el rendimiento, variables morfológicas y parámetros de calidad. Los resultados indicaron que las dosis de compost ejercieron un efecto positivo en el rendimiento y en algunos indicadores de calidad, mostrando un crecimiento y una producción superiores respecto al testigo sin aplicación de compost. En conclusión, el compost proveniente de residuos de pescado constituye una alternativa orgánica viable para la fertilización de la betarraga en la zona estudiada; no obstante, se recomienda ajustar con mayor precisión las dosis óptimas y fortalecer el control de los parámetros de calidad del compost para maximizar sus beneficios agronómicos.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1. Características del suelo arenoso

Los suelos arenosos se caracterizan por su textura gruesa, determinada por un alto contenido de partículas de arena que suelen superar el 70 % de la composición del suelo. Estas partículas, con un diámetro comprendido entre 0,05 y 2,00 mm, generan una estructura suelta, porosa y poco cohesiva, lo que confiere al suelo una alta permeabilidad y baja capacidad de retención de agua y nutrientes. Estas condiciones dificultan el mantenimiento de la humedad y la fertilidad, afectando negativamente el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Singaravel et al., 2005).

En términos físicos, los suelos arenosos poseen una alta macroporosidad que favorece la infiltración rápida del agua, pero también su pérdida por percolación. Su capacidad de campo suele ser inferior al 10 %, mientras que el punto de marchitez permanente varía entre 2 y 4 %, lo que deja un margen muy limitado de agua útil disponible para las plantas. Esto obliga a implementar estrategias de riego más frecuentes y a manejar cuidadosamente la fertilización para evitar la lixiviación de nutrientes (Zhao et al., 2021).

Desde el punto de vista químico, estos suelos presentan una baja capacidad de intercambio catiónico (CIC), generalmente inferior a 10 cmol(+)/kg, debido a su escasa fracción coloidal y su bajo contenido de materia orgánica. Esta baja CIC reduce la capacidad del suelo para retener iones como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Fe^{2+} y Zn^{2+} , que son fácilmente arrastrados hacia capas profundas por el agua de riego o lluvia. En consecuencia, la fertilidad natural del suelo es

baja y depende en gran medida del aporte externo de nutrientes a través de fertilizantes o enmiendas orgánicas (Goss et al. 2013).

Además, la reacción del suelo (pH) tiende a ser ligeramente ácida o neutra, aunque puede variar según el material parental. En zonas de alta lixiviación, los suelos arenosos pueden acidificarse progresivamente, reduciendo aún más la disponibilidad de ciertos micronutrientes como el molibdeno, el boro o el zinc. Esta condición, combinada con la baja CIC, explica la frecuente deficiencia de micronutrientes en cultivos establecidos en este tipo de suelo (Lewu, 2023).

Biológicamente, los suelos arenosos suelen tener una baja biomasa microbiana debido a su limitada materia orgánica y a las fluctuaciones de humedad. La escasa actividad microbiana reduce la mineralización de los nutrientes y el reciclaje natural de la materia orgánica, afectando la dinámica del nitrógeno, fósforo y azufre. Asimismo, la estructura suelta y la escasa agregación disminuyen la capacidad del suelo para retener carbono y proteger la biota edáfica, comprometiendo la sostenibilidad del sistema agrícola (Zhao et al., 2021).

Frente a estas limitaciones, diversas investigaciones han demostrado que la incorporación de materia orgánica mejora sustancialmente las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos arenosos. Las enmiendas orgánicas, como el humus de lombriz, compost o estiércol bovino, incrementan la CIC, la retención de agua y la estabilidad estructural del suelo, además de aportar nutrientes de liberación lenta. Los ácidos húmicos y fúlvicos presentes en estas enmiendas quelan micronutrientes (Fe, Zn, Mn, B y Cu), aumentando su disponibilidad y reduciendo las pérdidas por lixiviación (Abdou et al. 2024).

Asimismo, el uso de enmiendas orgánicas estabilizadas, como el biochar, mejora la adsorción de iones metálicos y actúa como reservorio de nutrientes. En un estudio realizado por (Kwizera et al. 2023), en suelos arenosos de Kenia, la aplicación combinada de biochar y fertilizante inorgánico aumentó significativamente la retención de Fe y Zn, mejorando el rendimiento de la betarraga (*Beta vulgaris* L.). Esto demuestra que los materiales orgánicos no solo incrementan la fertilidad, sino que también promueven la resiliencia del suelo frente a la degradación.

En resumen, los suelos arenosos presentan baja fertilidad natural debido a sus propiedades físicas, químicas y biológicas limitantes. Sin embargo, estas condiciones pueden mejorarse

significativamente mediante la aplicación de materia orgánica, que aumenta la retención de agua, mejora la estructura y eleva la disponibilidad de micronutrientes. Por tanto, el estudio de diferentes fuentes orgánicas y niveles de aplicación en suelos arenosos es esencial para optimizar la productividad agrícola y promover sistemas de cultivo sostenibles, especialmente en especies de raíz como la betarraga, que dependen de una adecuada nutrición mineral para expresar su potencial productivo y de calidad.

2.2.2. Importancia de la betarraga (*Beta vulgaris* L.)

La betarraga (*Beta vulgaris* L.), también conocida como remolacha, es un cultivo de raíz ampliamente valorado tanto por su importancia nutricional como por su relevancia económica y agroindustrial. Perteneciente a la familia Amaranthaceae, esta especie se cultiva en diversas regiones templadas y subtropicales del mundo, adaptándose a diferentes condiciones edafoclimáticas. Su raíz carnosa es rica en hidratos de carbono, minerales, pigmentos naturales (betalainas) y compuestos bioactivos, que le otorgan propiedades funcionales de interés para la salud humana y la industria alimentaria (Abdo, Sohaimy, Shaltout, Abdalla & Zeitoun, 2020).

Desde el punto de vista nutricional, la betarraga es una fuente importante de fibra dietética, folatos, potasio, hierro, manganeso y antioxidantes, especialmente betalainas y polifenoles. Estos compuestos confieren una alta capacidad antioxidante, lo que contribuye a la reducción del estrés oxidativo y a la prevención de enfermedades cardiovasculares y metabólicas. Además, las betalainas poseen aplicaciones industriales como colorantes naturales, sustituyendo a pigmentos sintéticos en productos alimenticios, cosméticos y farmacéuticos (Clifford et al., 2015).

En la agricultura, la betarraga presenta un ciclo corto y buena adaptabilidad, lo que permite su rotación con otros cultivos y su uso eficiente en sistemas de producción sostenible. Su rendimiento y calidad, sin embargo, dependen de la disponibilidad equilibrada de macro y micronutrientes, siendo particularmente sensibles a la deficiencia de elementos como hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn) y boro (B). Estos micronutrientes son esenciales para la síntesis de pigmentos, la fotosíntesis y la respiración celular, procesos directamente relacionados con el desarrollo radicular y la concentración de sólidos solubles totales en la raíz (Goss et al. 2013).

El contenido mineral de la raíz no solo influye en su valor nutricional, sino también en su calidad comercial y tecnológica. Investigaciones recientes indican que un manejo adecuado del suelo y el uso de enmiendas orgánicas pueden mejorar la absorción de micronutrientes y aumentar la concentración de compuestos bioactivos. Paulauskienė et al. (2023) demostraron que las betarragas cultivadas orgánicamente presentan una mayor acumulación de materia seca, sólidos solubles y azúcares naturales, así como mejores indicadores de vitalidad electroquímica, lo que se traduce en una calidad superior para el consumo humano.

Asimismo, el cultivo de betarraga tiene un papel relevante en la seguridad alimentaria y la economía rural, especialmente en regiones donde se produce a pequeña y mediana escala. Su fácil manejo, su demanda en mercados frescos e industriales y su capacidad de adaptación a diversos suelos incluidos los arenosos hacen de este cultivo una alternativa viable para sistemas agrícolas sostenibles. En consecuencia, la investigación sobre la acumulación de micronutrientes en la raíz y su relación con el manejo orgánico del suelo resulta fundamental para optimizar su calidad nutricional, mejorar el rendimiento y promover prácticas agrícolas más sostenibles.

2.2.3. Rol de los micronutrientes en el crecimiento vegetal

Los micronutrientes son elementos esenciales requeridos por las plantas en pequeñas cantidades, pero su función es determinante para el adecuado desarrollo fisiológico y bioquímico. A pesar de que representan una fracción mínima de la composición total de los tejidos vegetales, son indispensables para mantener la integridad estructural, la fotosíntesis, la respiración, la síntesis de enzimas y el metabolismo de los carbohidratos, lípidos y proteínas. Entre los micronutrientes más importantes se encuentran el hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn), cobre (Cu) y boro (B), todos ellos estrechamente relacionados con el crecimiento y productividad de los cultivos (Marschner, 2012).

El hierro (Fe) participa en la síntesis de clorofila y en los sistemas enzimáticos relacionados con la cadena de transporte electrónico durante la fotosíntesis y la respiración celular. Su deficiencia se manifiesta mediante clorosis internerval en hojas jóvenes, afectando la asimilación de carbono y reduciendo el rendimiento de los cultivos (Goss et al. 2013).

El zinc (Zn) es esencial en la síntesis de auxinas (hormonas del crecimiento), la formación de proteínas y la actividad de enzimas deshidrogenasas y transferasas. La deficiencia de Zn

provoca enanismo, entrenudos cortos y hojas pequeñas, síntomas que disminuyen el área fotosintética y limitan la producción (Broadley et al., 2012).

El manganeso (Mn) interviene en la fotólisis del agua en el fotosistema II, proceso clave para la liberación de oxígeno, y actúa como activador de diversas enzimas oxidorreductasas. Su carencia afecta la fotosíntesis y la resistencia al estrés oxidativo (Millaleo et al., 2010).

El cobre (Cu) forma parte de las metaloproteínas involucradas en la lignificación de tejidos, la respiración y la fotosíntesis. También cumple un papel en la defensa antioxidante de la planta, ya que es cofactor de la superóxido dismutasa (SOD), enzima que neutraliza radicales libres generados por estrés ambiental (Yruela, 2009).

Por su parte, el boro (B) es fundamental en la formación de la pared celular, el transporte de azúcares y la división celular, además de ser necesario para el crecimiento del tubo polínico y la fertilidad floral. Su deficiencia genera deformaciones en brotes y raíces, así como reducción del cuajado de frutos (Bolaños et al., 2004).

La disponibilidad de estos micronutrientes depende de diversos factores, entre ellos la reacción del suelo (pH), el contenido de materia orgánica, la actividad microbiana y la textura del suelo. En suelos arenosos, caracterizados por su baja capacidad de intercambio catiónico, estos elementos suelen lixiviarse fácilmente, provocando deficiencias nutricionales. Por ello, la incorporación de enmiendas orgánicas constituye una práctica eficaz para mejorar su retención y disponibilidad, ya que los compuestos húmicos pueden quelar y mantener los micronutrientes en formas solubles que facilitan su absorción radicular (Zhao et al., 2021).

En síntesis, los micronutrientes cumplen funciones vitales en los procesos fisiológicos de las plantas. Su adecuada disponibilidad determina la eficiencia metabólica, la productividad y la calidad del producto agrícola. En el caso de la betarraga, el balance de micronutrientes como Fe, Zn, Mn, Cu y B resulta esencial para la formación y calidad de la raíz, influyendo directamente en su valor nutricional y comercial.

2.2.4. Efecto de las enmiendas orgánicas sobre la disponibilidad de micronutrientes

Las enmiendas orgánicas desempeñan un papel fundamental en la mejora de la fertilidad del suelo y la disponibilidad de micronutrientes, especialmente en suelos arenosos o degradados

donde la lixiviación y la baja capacidad de intercambio catiónico (CIC) limitan la retención de nutrientes. Estas enmiendas, que incluyen materiales como compost, humus de lombriz, estiércol, biochar y residuos vegetales compostados, aportan materia orgánica y compuestos húmicos que modifican las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, favoreciendo la retención, movilidad y absorción de elementos esenciales como hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn), cobre (Cu) y boro (B) (Goss et al. 2013).

Desde el punto de vista químico, la aplicación de materia orgánica incrementa la CIC del suelo, ya que los ácidos húmicos y fúlvicos poseen grupos funcionales capaces de complejar o quelar iones metálicos, evitando su precipitación y aumentando su solubilidad en la solución del suelo. Este proceso reduce las pérdidas por lixiviación y mejora la disponibilidad de micronutrientes para las raíces. En suelos arenosos, donde los nutrientes son fácilmente arrastrados, las enmiendas orgánicas funcionan como reservorios naturales de nutrientes, liberándolos gradualmente a medida que se descomponen (Zhao et al., 2021).

Además, las enmiendas orgánicas estimulan la actividad microbiana y la producción de exudados rizosféricos, que alteran el pH y liberan compuestos quelantes naturales como ácidos orgánicos, sideróforos y fenoles, los cuales facilitan la solubilización de micronutrientes inmovilizados. Este aumento de la biomasa microbiana contribuye al reciclaje de nutrientes y al equilibrio del suelo, creando un entorno más favorable para la absorción radicular (Abdou et al. 2024).

Diversos estudios han demostrado los efectos positivos de las enmiendas orgánicas en la disponibilidad y acumulación de micronutrientes. (Kwizera et al. 2023), observaron que la aplicación de biochar y fertilizantes orgánicos aumentó la concentración de Fe y Zn en betarraga cultivada en suelos arenosos, mejorando el rendimiento y la calidad del cultivo. De manera similar, Muhammad et al. (2023) reportaron que el estiércol de aves aplicado a tasas óptimas incrementó significativamente el contenido de azúcares y micronutrientes en raíces de *Beta vulgaris*, demostrando la importancia del tipo y dosis de enmienda en la dinámica de nutrientes.

Por otra parte, el uso de composts maduros con alta estabilidad biológica mejora la disponibilidad de Fe, Mn y Zn, ya que estos materiales presentan una liberación lenta de nutrientes que sincroniza con las necesidades del cultivo. En contraposición, las enmiendas

frescas o poco estabilizadas pueden causar inmovilización temporal de nutrientes, debido a la competencia microbiana durante su descomposición inicial (Jagadeesh et al., 2018).

En síntesis, las enmiendas orgánicas no solo aportan nutrientes, sino que mejoran la estructura, retención y capacidad de intercambio del suelo, reducen la lixiviación y favorecen la absorción eficiente de micronutrientes. Su empleo adecuado, en dosis óptimas y con materiales de buena calidad, representa una estrategia sostenible para optimizar la fertilidad y promover una producción agrícola más resiliente, especialmente en suelos de baja fertilidad como los arenosos.

2.3 Definición de términos básicos

Enmienda orgánica: Material de origen biológico aplicado al suelo con el fin de mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas, incrementar la fertilidad y promover la actividad microbiana. Entre las más comunes se incluyen compost, humus de lombriz, estiércol y biochar (Goss et al. 2013).

Materia orgánica del suelo: Conjunto de restos vegetales, animales y microorganismos en diferentes etapas de descomposición que mejoran la estructura, capacidad de retención de agua y disponibilidad de nutrientes en el suelo (Zhao et al., 2021).

Micronutrientes: Elementos esenciales requeridos por las plantas en pequeñas cantidades, pero indispensables para procesos metabólicos, enzimáticos y estructurales. Incluyen Fe, Zn, Mn, Cu, B, Mo y Cl (Marschner, 2012).

Capacidad de intercambio catiónico (CIC): Propiedad del suelo que mide su capacidad para retener y liberar iones cargados positivamente (cationes) como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , y Fe^{2+} . Una CIC alta mejora la fertilidad y reduce la lixiviación (Singaravel et al., 2005).

Lixiviación: Proceso mediante el cual el agua percola a través del suelo, arrastrando nutrientes solubles hacia capas profundas, fuera del alcance de las raíces. Es común en suelos arenosos con baja CIC (Goss et al. 2013).

Acumulación de micronutrientes: Proceso mediante el cual las plantas absorben y almacenan elementos traza en sus tejidos, especialmente en raíces, tallos u hojas, reflejando la disponibilidad y movilidad de los nutrientes en el suelo (Muhammad et al., 2023).

2.4 Hipótesis de investigación

2.4.1 Hipótesis General

No hay efecto de las tres fuentes orgánicas y distintos niveles de aplicación sobre la acumulación de micronutrientes en raíces de betarraga cultivada en condiciones de suelo arenoso.

2.4.2 Hipótesis Específicas

- No hay influencia de cada fuente orgánica en la disponibilidad y absorción de micronutrientes en raíces de betarraga.
- No hay efecto del nivel de aplicación de cada fuente orgánica que optimiza la acumulación de micronutrientes en raíces.
- No hay interacción entre tipo de fuente orgánica y nivel de aplicación sobre la acumulación total de micronutrientes.

2.5 Operacionalización de las variables

Tabla1

Operacionalización de las variables

Concepto	Dimensión	Variables	Indicadores
Acumulacion de micronutrientes en las raíces	Nutrientes	Fe	g, mg kg ⁻¹
		Zn	g, mg kg ⁻¹
		Cu	g, mg kg ⁻¹
		Mn	g, mg kg ⁻¹
		B	g, mg kg ⁻¹

CAPITULO III. METODOLOGÍA

3.1 Diseño metodológico

3.1.1 Ubicación

El experimento se realizó en la Irrigación El Paraíso, perteneciente al distrito de Santa María, provincia de Huaura y región Lima, con coordenadas de 11°28'56.09,LS y 77°15'18.21 LO a una altura de 230 msnm, durante los meses de agosto del 2025 a marzo del 2026.

3.1.2 Características del área experimental

Características de la Unidad Experimental:

Distanciamiento entre surco:	0,70 m
Distanciamiento entre golpe:	0,10 m
Número de plantas por golpe:	1,0
Número de hileras por surco:	2,0
Número de surcos:	4,0
Longitud:	3,0 m
Ancho:	2,80 m
Área:	8,40 m ²

Características de los bloques:

Número de bloque:	3,00
Longitud de bloque:	28,0 m
Ancho de bloque:	3,0 m ²
Área de bloque:	84,00 m ²

Área Experimental:

Área neta del experimento:	252,00 m ²
Área total del experimento:	30x10=300,00 m ²

Croquis del campo experimental

Bloque I	T2	T5	T7	T0	T3	T6	T9	T4	T8	T1
Bloque II	T0	T8	T1	T4	T5	T7	T2	T6	T9	T3
Bloque III	T3	T9	T6	T8	T1	T4	T0	T5	T7	T2

Leyenda:

T0: Testigo

T1: 5 t ha⁻¹-Humus

T2: 5 t ha⁻¹-Compost

T3: 5 t ha⁻¹-EBV

T4: 10 t ha⁻¹-Humus

T5: 10 t ha⁻¹-Compost

T6: 10 t ha⁻¹-EBV

T7: 15 t ha⁻¹-Humus

T8: 15 t ha⁻¹-Compost

T9: 15 t ha⁻¹-EBV

3.1.3 Tratamientos

Los tratamientos fueron los siguientes:

Tabla2

Tratamientos

Clave	Tratamiento
T0	Testigo
T1	5 t ha ⁻¹ -Humus
T2	5 t ha ⁻¹ -Compost
T3	5 t ha ⁻¹ -EBV
T4	10 t ha ⁻¹ -Humus
T5	10 t ha ⁻¹ -Compost
T6	10 t ha ⁻¹ -EBV
T7	15 t ha ⁻¹ -Humus
T8	15 t ha ⁻¹ -Compost
T9	15 t ha ⁻¹ -EBV

3.1.4 Diseño experimental

Se utilizó el Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con arreglo factorial de 3 x 3 + 1 testigo y tres repeticiones. El factor 1 fueron las fuentes orgánicas (EBV, Compost y Humus); y el factor 2, los niveles de aplicación (5, 10 y 15 t ha⁻¹). El esquema de análisis de varianza se muestra en la Tabla 2. Para la comparación de los promedios se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey con una probabilidad del 5%.

Tabla 3

Análisis de varianza

Fuente de Variación	GL	SC	CM	Fcalc.
Bloque	2	SCBloq	CMBloq	
Fuente (F)	2	SCFuent	CMFuen	
Niveles (N)	2	SCDos	CMDos	
Interacc F x N	4	SCInt FxD	CMInt.	
Testigo vs Factorial	1	SCTvFac	CMTvFac	
Error	18	SCErr	CMErr	
Total	29	SCtotal	-	

3.1.5 Variables a evaluar

Al inicio de la cosecha, por cada unidad experimental se eligieron al azar 10 plantas de los dos surcos centrales. Luego se procedió a separar el follaje de la raíz. Posteriormente las raíces colocadas dentro de bolsas de papel Kraft y codificadas y llevados a la estufa para su secado a 70°C por 72 horas, hasta alcanzar peso contante. Luego de ello, las muestras se enviaron al Laboratorio de análisis foliar de la Universidad Nacional Agraria La Molina, para el análisis de los siguientes micronutrientes:

- a) Zinc (Zn)
- b) Cobre (Cu)
- c) Manganeseo (Mn)
- d) Hierro (Fe)
- e) Boro (B)

A partir de la información recibida se analizaron:

- a) Concentración de micronutrientes en la raíz (Información de resultados de laboratorio).
- b) La acumulacion de los micronutrientes en la raíz.

Procedimiento para calcular la acumulación de un micronutriente (MN).

$$MN \text{ (g ha}^{-1}\text{)} = \text{peso de raíz (t ha}^{-1}\text{)} * \text{mg kg}^{-1} \text{ (g t}^{-1}\text{)}$$

$$MN \text{ (g ha}^{-1}\text{)} = (6 \text{ t ha}^{-1}) (20 \text{ g t}^{-1})$$

$$MN \text{ (g ha}^{-1}\text{)} = 120 \text{ g ha}^{-1}$$

3.1.6 Conducción del experimento

- a. Fase Campo: En cada unidad experimental se seleccionaron al azar 10 plantas de los dos surcos centrales. Las plantas fueron lavadas y pesadas.
- b. Fase Laboratorio: Las plantas fueron divididas en raíces y follaje. Ambos tejidos fueron colocados en papel Kraft N° 8 para ser colocadas en l estufa de secado a 70 °C por 72 horas hasta alcanzar peso constante. Posteriormente, estas muestras fueron enviadas al Laboratorio para su respectivo análisis foliar.

3.2 Población y muestra

La población para el experimento fue de 3600 plantas. El tamaño de la muestra por unidad experimental fue de 10.

3.3 Técnicas de recolección de datos

La técnica de recolección de datos fue la medición directa. Para ello se utilizó balanza digital (peso seco). Esta técnica garantiza objetividad, repetibilidad y exactitud en el registro del dato obtenido.

3.4 Técnicas de procesamiento de datos

Para el procesamiento de la información se emplearon técnicas estadísticas. Primero se realizó la codificación y tabulación de los datos en hojas de cálculo. Posteriormente se efectuó una depuración de los registros para garantizar su consistencia. Se verificó los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. Luego se ejecutó un Análisis de Varianza (ANOVA) correspondiente al diseño experimental utilizado, con el fin de determinar la existencia de diferencias estadísticas entre los tratamientos evaluados. Cuando el ANVA resultó significativo, se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey al 5%. Todos los procedimientos estadísticos se realizaron en el software R.

CAPITULO IV. RESULTADOS

4.1 Concentración de los micronutrientes (mg kg⁻¹)

4.1.1 Zinc (Zn)

Los resultados del análisis de varianza para la concentración de zinc (Zn) en raíces de betarraga se presentan en la Tabla 4. Se observa que existen diferencias significativas asociadas principalmente al factor Fuente y a la interacción evaluada como Testigo vs Factorial, mientras que los demás factores no evidenciaron efectos estadísticamente significativos. El efecto de Bloque tampoco fue significativo, lo que indica una adecuada homogeneidad experimental o baja variabilidad entre bloques.

El promedio general de concentración de zinc fue de 15,73 mg kg⁻¹ con un coeficiente de variación de 8,16%, considerado como relativamente bajo y que refleja buena precisión experimental y confiabilidad en los datos.

Tabla4

Análisis de varianza para la concentración de zinc (mg kg⁻¹) en las raíces de betarraga

Fuentes de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Fcalc.	p-value
Bloque	2	9,80000	4,900	2,986	0,075 ns
Fuente	2	16,88889	8,444	5,147	0,017 *
Dosis	2	2,88889	1,444	0,880	0,431 ns
Fuente*Dosis	4	7,55556	1,889	1,151	0,364 ns
Test. vs Factorial	1	45,63333	45,633	27,813	0,000 **
Residuo	18	29,53333	1,641		
Total	29	112,30000			
CV =	8,16%				
Promedio general	15,73				

ns: no significativo; *: significativo al 0,05; **: significativo al 0,01 de probabilidad

En la Tabla 5, de acuerdo a la prueba de Tukey al 5% se observa que el tratamiento Factorial alcanzó una concentración promedio de zinc de 16,11 mg kg⁻¹, superando significativamente al Testigo que presentó un valor menor de 12,00 mg kg⁻¹. Esto confirma que el tratamiento factorial incrementó de manera efectiva la concentración de zinc en las raíces en comparación con el testigo.

Tabla5

Prueba de Tukey al 5% para la comparación de la concentración de Zinc (mg kg^{-1}) en las raíces

Tratamiento	Zn (mg kg^{-1})	
Testigo	12,00	a
Factorial	16,11	b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la Tabla 6, de acuerdo a la prueba de Tukey al 5% se muestra diferencias claras en la capacidad de cada fuente para aportar este micronutriente a las raíces. En primer lugar, la fuente EBV presenta la mayor concentración de zinc ($17,22 \text{ mg kg}^{-1}$) y es significativamente superior a las demás fuentes evaluadas. Por otro lado, tanto Compost ($15,67 \text{ mg kg}^{-1}$) como Humus ($15,44 \text{ mg kg}^{-1}$) no difieren estadísticamente entre sí, pero sí son inferiores a EBV.

Estos resultados permiten afirmar que, dentro de las fuentes orgánicas estudiadas, EBV es la más eficiente para incrementar la concentración de zinc en las raíces, mientras que compost y humus presentan un comportamiento similar y menos efectivo en comparación.

Tabla6

Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de Zinc (ppm) entre fuentes orgánicas

Fuente	Zn (mg kg^{-1})	
EBV	17,22	a
Compost	15,67	b
Humus	15,44	b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la Tabla 7, según la prueba de Tukey al 5% no existen diferencias significativas entre los niveles evaluados (5, 10 y 15 t ha^{-1}). Esto indica que estadísticamente que presentan respuestas similares. Aunque numéricamente la dosis de 15 t ha^{-1} presenta el valor más alto de concentración de zinc ($16,55 \text{ mg kg}^{-1}$), seguida por 10 t ha^{-1} ($16,00 \text{ mg kg}^{-1}$) y 5 t ha^{-1} ($15,77 \text{ mg kg}^{-1}$), estas diferencias no son lo suficientemente grandes como para ser consideradas significativas desde el punto de vista estadístico.

Tabla7*Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de Zinc (ppm) entre dosis*

Dosis (t ha ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)	
10	16,00	a
15	16,55	a
5	15,77	a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.1.2 Cobre (Cu)

En la Tabla 8, según el análisis de varianza para la concentración de cobre (Cu) en raíces de betarraga se muestra que varios factores influyen significativamente en la acumulación de este micronutriente.

En primer lugar, el factor Fuente presenta un efecto significativo, lo que indica que el tipo de fuente de cobre utilizada influye en la concentración del elemento en las raíces. De manera similar, el factor Dosis también resulta significativo, evidenciando que, en este caso, la cantidad aplicada sí tiene un impacto importante sobre la variable evaluada.

Por otro lado, la interacción Fuente*Dosis no fue significativa, aunque se encuentra cercana al umbral de significancia, lo que podría sugerir una ligera tendencia a la interacción, pero no lo suficientemente fuerte como para confirmarla estadísticamente.

El contraste Testigo vs Factorial muestra un efecto significativo, indicando que el tratamiento adicional difiere del conjunto de tratamientos factoriales, lo cual refuerza la existencia de diferencias importantes en el comportamiento del cobre bajo distintas condiciones experimentales.

Para Bloques no se observó diferencias significativas, lo que sugiere que la variabilidad entre bloques fue baja y que el diseño experimental fue adecuado.

El promedio general de cobre fue de 3,933 mg kg⁻¹ con un coeficiente de variación de 11,29%, considerado como moderado, indicando una precisión experimental aceptable.

Tabla8*Análisis de varianza para la concentración de cobre (mg kg^{-1}) en las raíces de betarraga*

Fuentes de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Fcalc.	p-value
Bloque	2	0,26667	0,133	0,643	0,537 ns
Fuente	2	1,55556	0,778	3,750	0,044 *
Dosis	2	1,55556	0,778	3,750	0,044 *
Fuente*Dosis	4	2,22222	0,556	2,679	0,065 ns
Test. vs Factorial	1	1,63333	1,633	7,875	0,011 *
Residuo	18	3,73333	0,207		
Total	29	10,96667			
CV =	11,29%				
Promedio general	3,933				

ns: no significativo; *: significativo al 0,05

En la Tabla 9, la comparación entre el testigo y el tratamiento factorial muestra que ambos tratamientos son estadísticamente diferentes. El tratamiento factorial presenta un valor promedio mayor ($4,11 \text{ mg kg}^{-1}$) en comparación con el testigo ($3,33 \text{ mg kg}^{-1}$), diferencia que resulta significativa.

Tabla9*Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de cobre (mg kg^{-1})*

Tratamiento	Cu (mg kg^{-1})	
Testigo	3,33	a
Factorial	4,11	b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la Tabla 10, al comparar las fuentes orgánicas, se observa que EBV presenta el mayor valor promedio de cobre ($4,44 \text{ mg kg}^{-1}$), seguido por humus ($4,00 \text{ mg kg}^{-1}$) y compost ($3,88 \text{ mg kg}^{-1}$). Sin embargo, solo se evidencia diferencia significativa entre EBV y compost, mientras que humus no difiere estadísticamente de ambos.

Tabla10*Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de cobre (mg kg^{-1}) entre fuentes orgánicas*

Fuente	Cu (mg kg^{-1})	
EBV	4,44	a
Humus	4,00	ab
Compost	3,88	b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la Tabla 11, la comparación entre las dosis aplicadas (5, 10 y 15) muestra valores que varían entre 3,88 y 4,44 mg kg⁻¹. Se observa que la dosis 5 presenta el valor más alto y difiere significativamente de la dosis 15, mientras que la dosis 10 no muestra diferencias significativas respecto a las otras dosis.

Tabla11

Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de cobre (mg kg⁻¹) entre dosis

Dosis (t ha ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	
5	4,44	a
10	4,00	ab
15	3,88	b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

4.1.3 Manganeso (Mn)

Los resultados del análisis de varianza para la concentración de manganeso (Mn) en raíces de betarraga se presentan en la Tabla 12. Se observa que existen diferencias significativas para el factor Dosis y a la comparación testigo vs Factorial. Asimismo, el factor Bloque también mostró un efecto significativo, evidenciando cierta variabilidad entre bloques.

El promedio general de concentración de manganeso fue de 17,98 mg kg⁻¹, con un coeficiente de variación de 10,40%, considerado como moderado, lo que refleja una precisión experimental aceptable y adecuada confiabilidad en los resultados obtenidos.

Tabla12

Análisis de varianza para la concentración de manganeso (mg kg⁻¹) en las raíces de betarraga

Fuentes de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Fcalc,	p-value
Bloque	2	28,46667	14,233	4,033	0,035 *
Fuente	2	14,51852	7,259	2,057	0,156 ns
Dosis	2	56,96296	28,481	8,069	0,003 **
Fuente*Dosis	4	14,81481	3,704	1,049	0,409 ns
Ad vs Factorial	1	51,57037	51,570	14,611	0,001 **
Residuo	18	63,53333	3,530		
Total	29	229,86666			
CV =	10,40%				
Promedio general	17,980				

ns: no significativo; *: significativo al 0,05; **: significativo al 0,01 de probabilidad

En la Tabla 13, la comparación entre el testigo y el tratamiento factorial muestra que ambos tratamientos son estadísticamente diferentes. El testigo presenta un valor promedio mayor de manganeso ($22,00 \text{ mg kg}^{-1}$) en comparación con el tratamiento factorial ($17,62 \text{ mg kg}^{-1}$), diferencia que resulta significativa

Tabla13

Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de manganeso (mg kg^{-1})

Tratamiento	Mn (mg kg^{-1})	
Testigo	22,00	a
Factorial	17,62	b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la Tabla 14, al comparar las fuentes orgánicas, se observa que compost ($17,77 \text{ mg kg}^{-1}$), EBV ($18,44 \text{ mg kg}^{-1}$) y humus ($16,66 \text{ mg kg}^{-1}$) presentan valores relativamente cercanos entre sí. No existen diferencias estadísticas entre las fuentes evaluadas, lo que indica un comportamiento similar en la concentración de manganeso en las raíces.

Tabla14

Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de manganeso (mg kg^{-1}) entre fuentes orgánicas

Fuente	Mn (mg kg^{-1})	
Compost	17,77	a
EBV	18,44	a
Humus	16,66	a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la Tabla 15, la comparación entre las dosis aplicadas (5, 10 y 15) muestra valores que varían entre $15,88$ y $19,33 \text{ mg kg}^{-1}$. Se observa que la dosis 5 presenta el valor más alto y difiere significativamente de la dosis 15, mientras que la dosis 10 no muestra diferencias significativas respecto a las otras dosis.

Tabla15

Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de manganeso (mg kg^{-1}) entre dosis

Dosis (t ha^{-1})	Mn (mg kg^{-1})		
5	19,33	a	
10	17,55		ab
15	15,88		b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.1.4 Hierro (Fe)

Los resultados del análisis de varianza para la concentración de hierro (Fe) en raíces de betarraga se presentan en la Tabla 16. Se observa que existen diferencias significativas asociadas principalmente al factor Fuente y a la interacción Fuente $\times$ Dosis, lo que indica que tanto el tipo de fuente y dosis influyeron de manera importante en la concentración del nutriente en las raíces.

El promedio general de concentración de hierro fue de 233,662 mg kg⁻¹, con un coeficiente de variación de 18%, considerado como relativamente alto, lo que indica una mayor variabilidad en los datos y una precisión experimental moderada.

Tabla16

Análisis de varianza para la concentración de hierro (mg kg⁻¹) en las raíces de betarraga

Fuentes de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F _{calc} ,	p-value
Bloque	2	8669,600	4334,800	2,450	0,114 ns
Fuente	2	12693,630	6346,815	3,587	0,048 *
Dosis	2	6716,963	3358,482	1,898	0,178 ns
Fuente*Dosis	4	30168,370	7542,093	4,263	0,013 *
Test. vs Factorial	1	1157,337	1157,337	0,654	0,429 ns
Residuo	18	31848,400	1769,356		
Total	29	91254,300			
CV =	18%				
Promedio general	233,662				

ns: no significativo; *: significativo al 0,05

En la Tabla 17, la prueba de Tukey al 5% no evidenció diferencias significativas en la concentración de hierro entre el tratamiento testigo (252.33 mg kg⁻¹) y el factorial (231.62 mg kg⁻¹), esto indica que, estadísticamente, los tratamientos presentan un comportamiento similar.

Tabla17

Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de hierro (mg kg⁻¹)

Tratamiento	Fe (mg kg ⁻¹)	
Testigo	252,33	a
Factorial	231,62	a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

En la Tabla 18, el análisis mostró que los bloques y las dosis no tuvieron efectos significativos sobre la concentración de hierro. Sin embargo, la fuente sí presentó un efecto significativo en las dosis 10 y 15 ($p < 0.05$), mientras que en la dosis 5 no se observaron diferencias. Esto indica que la respuesta del hierro depende del nivel de dosis, siendo significativa solo en dosis más altas.

Tabla18

Análisis de fecho simple para fuente dentro cada nivel de dosis

Fuentes de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Fcalc,	p-value
Bloque	2	8669,600	4334,8	2,4499	0,1145 ns
Dosis	2	6716,963	3358,481	1,8981	0,1787 ns
Fuente/5 t ha ⁻¹	2	11505,556	5752,778	3,2513	0,0623 ns
Fuente/10 t ha ⁻¹	2	13222,889	6611,444	3,7366	0,0439 *
Fuente/15 t ha ⁻¹	2	18133,556	9066,778	5,1243	0,0173 *
Ad vs Factorial	1	1157,337	1157,337	0,6541	0,4292 ns
Residuo	18	31848,400	1769,356		
Total	29	91254,300			

ns: no significativo; *: significativo al 0,05

En la Tabla 19, en el nivel 10, EBV registra el valor más alto (282.66 ppm), seguido por humus (247.33 ppm) y compost (189.66 ppm). Se observan diferencias significativas entre EBV y compost, mientras que humus presenta un comportamiento intermedio sin diferir de ambos.

Tabla19

Prueba de Tukey al 5% para concentración de hierro (mg kg⁻¹) en Fuentes dentro del nivel 10 t ha⁻¹

Fuente	Fe (mg kg ⁻¹)	
EBV	282,66	a
Humus	247,33	ab
Compost	189,66	b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la Tabla 20, para el nivel 15, el EBV mostró el mayor valor (298 mg kg⁻¹), seguido por compost (250 mg kg⁻¹) y humus (188 mg kg⁻¹). Existen diferencias significativas entre EBV y humus, mientras que compost se mantiene en una posición intermedia sin diferencias con las otras fuentes.

Tabla20

Prueba de Tukey al 5% para concentración de hierro (mg kg⁻¹) en Fuentes dentro del nivel 15 t ha⁻¹

Fuente	Fe (mg kg ⁻¹)		
EBV	298	a	
Compost	250		ab
Humus	188		b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la Tabla 21, el análisis de efectos simples para dosis dentro de cada nivel de fuente mostró que solo en la fuente EBV se presentaron diferencias significativas entre dosis.

Tabla21

Análisis de efecto simple para dosis dentro cada nivel de fuente

Fuentes de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Fcalc,	p-value
Bloque	2	8669,600	4334,80	2,4499	0,1145 ns
Fuente	2	12693,630	6346,815	3,5871	0,0488 *
Dosis/compost	2	9361,556	4680,778	2,6455	0,0983 ns
Dosis/EBV	2	18912,889	9456,444	5,3446	0,0151 *
Dosis/Humus	2	8610,889	4305,444	2,4333	0,1160 ns
Ad vs Factorial	1	1157,337	1157,337	0,6541	0,4292 ns
Residuo	18	31848,400	1769,356		
Total	29	91254,300			

ns: no significativo; *: significativo al 0,05

En la Tabla 22, en el nivel de EBV, la dosis 15 muestra el valor más alto (298 mg kg⁻¹), seguida de 10 (282.66 mg kg⁻¹) y 5 (194 mg kg⁻¹). Se observan diferencias significativas, ya que la dosis 5 es inferior, mientras que 10 y 15 no difieren entre sí.

Tabla22

Prueba de Tukey al 5% para Dosis dentro de la fuente EBV

Dosis (t ha ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)		
15	298,00	a	
10	282,66	a	
5	194,00		b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.1.5 Boro (B)

Los resultados del análisis de varianza para la concentración de boro (B) en raíces de betarraga se presentan en la Tabla 23. Se observa que ninguno de los factores evaluados mostró efectos estadísticamente significativos, ya que Bloque, Fuente, Dosis, la interacción Fuente × Dosis y la comparación testigo vs Factorial presentaron valores de p mayores a 0.05. Esto indica que los tratamientos aplicados no generaron diferencias en la concentración de boro en las raíces.

El promedio general de concentración de boro fue de 14,71 mg kg⁻¹, con un coeficiente de variación de 27,8%, considerado alto, lo que refleja una elevada variabilidad en los datos y una menor precisión experimental, por lo que los resultados deben interpretarse con cautela.

Tabla23

Análisis de varianza para la concentración de boro (mg kg⁻¹) en las raíces de betarraga

Fuentes de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Fcalc,	p-value
Bloque	2	1,40000	0,700	0,042	0,959 ns
Fuente	2	11,55556	5,778	0,346	0,712 ns
Dosis	2	6,88889	3,444	0,206	0,815 ns
Fuente*Dosis	4	12,22222	3,056	0,183	0,944 ns
Test. vs Factorial	1	17,63333	17,633	1,056	0,317 ns
Residuo	18	300,60000	16,700		
Total	29	350,300			
CV =	27,8%				
Promedio general	14,707				

ns: no significativo

En las Tabla 24, 25 y 26, según la prueba de Tukey al 5% se confirma que no se observaron diferencias significativas para la comparación entre el testigo y el tratamiento factorial, entre fuentes y entre dosis aplicadas.

Tabla24

Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de boro (mg kg⁻¹)

Tratamiento	B (mg kg ⁻¹)	
Testigo	17,00	a
Factorial	14,44	a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Tabla25

Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de boro (mg kg^{-1}) entre fuentes orgánicas

Fuente	B (mg kg^{-1})	
Compost	14,22	a
EBV	13,77	a
Humus	15,33	a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Tabla26

Prueba de Tukey al 5% para la comparación de concentración de boro (mg kg^{-1}) entre dosis

Dosis (t ha^{-1})	B (mg kg^{-1})	
10	15,00	a
15	13,77	a
5	14,55	a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.2 Acumulación de los micronutrientes en las raíces de betarraga

4.2.1 Zinc (Zn)

En la Tabla 27, según el análisis de varianza para la acumulación de zinc (Zn) en raíces de betarraga, se evidencia que el factor más determinante en este caso es la dosis aplicada, mientras que la fuente no presenta influencia significativa.

Por otro lado, los factores Bloques y Fuente no resultaron significativos. Asimismo, la interacción Fuente*Dosis tampoco fue significativa.

El contraste Testigo vs Factorial presenta un efecto altamente significativo, evidenciando que el tratamiento adicional difiere marcadamente del conjunto de tratamientos factoriales, confirmando un comportamiento distinto en la acumulación de zinc.

El promedio general de acumulación de zinc fue de $112,273 \text{ g ha}^{-1}$ con un coeficiente de variación de 18,26%) considerado como relativamente alto, lo que sugiere una mayor variabilidad en los datos pero dentro del rango aceptable para ensayos de campo.

Tabla27*Analisis de varianza para la acumulación de zinc (g ha^{-1}) en las raices de betarraga*

Fuentes de variabilidad	de	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Fcalc,	p-value
Bloque		2	1460,5184	730,259	1,738	0,204 ns
Fuente		2	93,6117	46,806	0,111	0,895 ns
Dosis		2	19107,9152	9553,958	22,743	0,000 **
Fuente*Dosis		4	1405,7659	351,441	0,837	0,519 ns
Ad vs Factorial		1	20170,7050	20170,705	48,015	0,000 **
Residuo		18	7561,6430	420,091		
Total		29	49800,159			
CV =		18,26%				
Promedio general		112,273				

ns: no significativo; **: significativo al 0,01 de probabilidad

En la Tabla 28, según la prueba de Tukey al 5% para la acumulación de zinc el tratamiento Factorial alcanzó una acumulación promedio de $120,91 \text{ g ha}^{-1}$, siendo superior significativamente al Testigo que presentó un valor considerablemente menor de $34,48 \text{ g ha}^{-1}$.

Tabla28*Prueba de Tukey al 5% para la comparación de la acumulación de zinc (g ha^{-1})*

Tratamiento	Zn (g ha^{-1})	
Testigo	34,48	a
Factorial	120,91	b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la Tabla 29, según la prueba de Tukey al 5% para la acumulación de zinc, se muestra que no existen diferencias significativas entre las fuentes orgánicas. Aunque desde el punto de vista numérico la fuente EBV presenta la mayor acumulación de zinc ($123,48 \text{ g ha}^{-1}$), seguida por Compost ($120,11 \text{ g ha}^{-1}$) y Humus ($119,14 \text{ g ha}^{-1}$), estas diferencias son pequeñas y no alcanzan significancia estadística.

Tabla29*Prueba de Tukey al 5% para la comparación de la acumulación de zinc (g ha^{-1}) entre fuentes orgánicas*

Fuente	Zn (g ha^{-1})	
EBV	123,48	a
Compost	120,11	a
Humus	119,14	a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la Tabla 30, de acuerdo a la prueba de Tukey al 5% para la acumulación de zinc entre dosis, se muestra diferencias significativas entre todos los niveles evaluados. La dosis de 15 t ha⁻¹ alcanza la mayor acumulación de zinc (152,75 g ha⁻¹), siendo significativamente superior a las demás. Le sigue la dosis de 10 t ha⁻¹ con 122,34 g ha⁻¹, mientras que la dosis más baja, 5 t ha⁻¹, presenta la menor acumulación (87,64 g ha⁻¹), diferenciándose estadísticamente.

Tabla30

Prueba de Tukey al 5% para la comparación de la acumulación de zinc (g ha⁻¹) entre dosis

Dosis (t ha ⁻¹)	Zn (g ha ⁻¹)		
15	152,75	a	
10	122,34		b
5	87,64		c

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

4.2.2 Cobre (Cu)

Los resultados del análisis de varianza para la acumulación de cobre en raíces de betarraga se presentan en la Tabla 31. Se observa que existen diferencias significativas asociadas principalmente al factor Dosis y al contraste testigo vs Factorial, los cuales presentaron efectos altamente significativos. En contraste, los factores Fuente y la interacción Fuente × Dosis no evidenciaron efectos estadísticamente significativos, al igual que el factor Bloque.

El promedio general de acumulación de cobre fue de 28,336 g ha⁻¹ con un coeficiente de variación de 18,35%, considerado como moderado, lo que refleja una precisión experimental aceptable y una variabilidad manejable en los datos.

Tabla31

Análisis de varianza para la acumulación de cobre (g ha⁻¹) en las raíces de betarraga

Fuentes de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Fcalc,	p-value
Bloque	2	39,3285	19,664	0,727	0,496 ns
Fuente	2	36,0821	18,041	0,667	0,525 ns
Dosis	2	1272,1124	636,056	23,531	0,000 **
Fuente*Dosis	4	153,3339	38,333	1,418	0,268 ns
Test. vs Factorial	1	1138,7828	1138,783	42,129	0,000 **
Residuo	18	486,5560	27,031		
Total	29	3126,196			
CV =	18,35%				
Promedio general	28,336				

ns: no significativo; **: significativo al 0,01 de probabilidad

En la Tabla 32, según la prueba de Tukey el tratamiento factorial registra un valor promedio considerablemente mayor ($30,39 \text{ g ha}^{-1}$) siendo superior significativamente al testigo ($9,85 \text{ g ha}^{-1}$), evidenciando un efecto significativo del tratamiento sobre la acumulación de cobre.

Tabla32

Prueba de Tukey al 5% para la comparación de la acumulación de cobre (g ha^{-1})

Tratamiento	Cu (g ha^{-1})	
Testigo	9,85	a
Factorial	30,39	b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la Tabla 33, al comparar las fuentes orgánicas, se observa que el humus presenta el valor promedio más alto de cobre ($31,56 \text{ ppm}$), seguido de EBV ($30,78 \text{ ppm}$) y compost ($28,81 \text{ ppm}$). Sin embargo, según la prueba de Tukey al 5%, no existen diferencias estadísticas significativas entre ellas en la concentración de cobre.

Tabla33

Prueba de Tukey al 5% para la comparación de acumulación de cobre (g ha^{-1}) entre fuentes orgánicas

Fuente	Cu (g ha^{-1})	
Compost	28,81	a
EBV	30,78	a
Humus	31,56	a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la Tabla 34, la comparación entre las dosis aplicadas muestra diferencias estadísticas significativas. La dosis de 15 presenta el valor más alto de cobre ($38,86 \text{ g ha}^{-1}$), seguida de la dosis de 10 ($30,24 \text{ g ha}^{-1}$) y la dosis de 5 ($22,05 \text{ g ha}^{-1}$). Estos resultados evidencian que el incremento en la dosis aplicada genera un aumento significativo en la concentración de cobre.

Tabla34

Prueba de Tukey al 5% para la comparación de acumulación de cobre (g ha^{-1}) entre dosis

Dosis (t ha^{-1})	Cu (g ha^{-1})	
15	38,86	a
10	30,24	b
5	22,05	c

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.2.3 Manganeso (Mn)

Los resultados del análisis de varianza para la acumulación de manganeso en raíces de betarraga se presentan en la Tabla 35. Se observa que existen diferencias significativas para el factor Fuente, así como al factor Dosis y al contraste testigo vs Factorial, los cuales presentaron efectos altamente significativos. En contraste, la interacción Fuente $\times$ Dosis no evidenció efectos estadísticamente significativos, al igual que el factor Bloque.

El promedio general de acumulación de manganeso fue de 125,094 g ha⁻¹ con un coeficiente de variación de 18,42%, considerado como moderado, lo que refleja una precisión experimental aceptable y una variabilidad manejable en los datos.

Tabla35

Análisis de varianza para la acumulación de manganeso (g ha⁻¹) en las raíces de betarraga

Fuentes de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Fcalc,	p-value
Bloque	2	2188,491	1094,246	2,061	0,156 ns
Fuente	2	3978,368	1989,184	3,747	0,043 *
Dosis	2	21329,530	10664,765	20,089	0,000 **
Fuente*Dosis	4	3251,345	812,836	1,531	0,235 ns
Test. vs Factorial	1	13361,069	13361,069	25,168	0,000 **
Residuo	18	9555,8520	530,881		
Total	29	53664,655			
CV =	18,42%				
Promedio general	125,094				

ns: no significativo; *: significativo al 0,05; **: significativo al 0,01 de probabilidad

En la Tabla 36, la prueba de Tukey indica que existen diferencias estadísticas significativas en la acumulación de manganeso. El tratamiento factorial presenta un valor promedio considerablemente mayor (132,12 g ha⁻¹) en comparación con el testigo (61,78 g ha⁻¹), evidenciando un efecto significativo del tratamiento sobre la acumulación de manganeso.

Tabla36

Prueba de Tukey al 5% para la comparación de la acumulación de manganeso (g ha⁻¹)

Tratamiento	Mn (g ha ⁻¹)	
Testigo	61,78	a
Factorial	132,12	b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la Tabla 37, al comparar las fuentes orgánicas, se observa que el humus presenta el valor promedio más alto de manganeso (145,89 g ha⁻¹), seguido de EBV (134,13 g ha⁻¹) y compost (116,36 g ha⁻¹). En este caso, el humus y el compost presentan diferencias estadísticas significativas entre sí, mientras que EBV no difiere estadísticamente ni del humus ni del compost, indicando un comportamiento intermedio entre ambas fuentes.

Tabla37

Prueba de Tukey al 5% para la comparación de acumulación de manganeso (ppm) entre fuentes orgánicas

Fuente	Mn (g ha ⁻¹)		
Humus	145,89	a	
EBV	134,13		ab
Compost	116,36		b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la Tabla 38, la comparación entre las dosis aplicadas muestra que entre las dosis de 15 y 10 t ha⁻¹ no existen diferencias estadísticas significativas. La dosis de 15 registra el valor más alto (163,01 g ha⁻¹). Por otro lado, la dosis de 5 t ha⁻¹ presenta y un valor menor (95,01 g ha⁻¹), lo que indica que es estadísticamente inferior a las otras dos dosis. Estos resultados sugieren que mayores dosis favorecen la concentración de manganeso, aunque sin diferencias entre los niveles más altos evaluados.

Tabla38

Prueba de Tukey al 5% para la comparación de acumulación de manganeso (g ha⁻¹) entre dosis

Dosis (t ha ⁻¹)	Mn (g ha ⁻¹)		
15	163,01	a	
10	138,36	a	
5	95,01		b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.2.4 Hierro (Fe)

Los resultados del análisis de varianza para la acumulación de hierro en raíces de betarraga se presentan en la Tabla 39. Se observa que existen diferencias significativas el factor Dosis, a la interacción Fuente × Dosis y al contraste testigo vs Factorial. En contraste, el factor Fuente no evidenció efectos estadísticamente significativos, al igual que el factor Bloque.

El promedio general de acumulación de hierro fue de 1.632 kg ha^{-1} con un coeficiente de variación de 26,6%, considerado como relativamente alto, lo que indica una mayor variabilidad en los datos y una menor precisión experimental en comparación con las variables anteriores.

Tabla39

Análisis de varianza para la acumulación de hierro (g ha^{-1}) en las raíces de betarraga

Fuentes de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Fcalc,	p-value
Bloque	2	0,33235	0,166	0,881	0,431 ns
Fuente	2	0,55737	0,279	1,477	0,254 ns
Dosis	2	4,76212	2,381	12,622	0,000 **
Fuente*Dosis	4	2,38584	0,596	3,162	0,039 *
Test. vs Factorial	1	2,82276	2,823	14,963	0,001 **
Residuo	18	3,39570	0,189		
Total	29	14,256			
CV =	26,6%				
Promedio general	1,632				

ns: no significativo; *: significativo al 0,05; **: significativo al 0,01 de probabilidad

La prueba de Tukey al 5% mostró diferencias significativas en la acumulación de hierro entre los tratamientos. El tratamiento factorial (1.734 g ha^{-1}) presentó un valor significativamente mayor que el testigo (0.712 g ha^{-1}), esto indica que el tratamiento factorial incrementó significativamente la acumulación de hierro.

Tabla40

Prueba de Tukey al 5% para la comparación de la acumulación de hierro (kg ha^{-1})

Tratamiento	Fe (kg ha^{-1})	
Testigo	0,712	a
Factorial	1,734	b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Realizando el análisis de efectos simples, en la Tabla 41 se puede apreciar que hubo diferencias significativas entre las fuentes orgánicas cuando se aplicaron en la cantidad de 15 t ha^{-1} . En las dosis de 5 y 10 t ha^{-1} no se manifestaron diferencias significativas entre las fuentes orgánicas aplicadas.

Tabla41*Análisis de efecto simple para fuente dentro cada nivel de dosis*

Fuentes de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Fcalc,	p-value
Bloque	2	0,33234	0,16618	0,8809	0,4315 ns
Dosis	2	4,76212	2,38106	12,6216	0,0004 **
Fuente/5 t ha ⁻¹	2	0,63692	0,31846	1,6881	0,2129 ns
Fuente/10 t ha ⁻¹	2	0,22084	0,11042	0,5853	0,5672 ns
Fuente/15 t ha ⁻¹	2	2,08546	1,04273	5,5273	0,0134 *
Test. vs Factorial	1	2,82276	2,82276	14,963	0,0011 **
Residuo	18	3,39570	0,18865		
Total	29	14,25616			

ns: no significativo; *: significativo al 0,05; **: significativo al 0,01 de probabilidad

Habiéndose encontrado diferencias significativas entre las fuentes orgánicas en el nivel 15 t ha⁻¹, en la Tabla 42 se puede observar que entre el compost y el EBV no hubo diferencias significativas y presentaron valores de 2,68 y 2,62 kg ha⁻¹, respectivamente. El humus promovió una acumulación de 1,63 kg ha⁻¹ y fue menor significativamente a las dos anteriores.

Tabla42*Prueba de Tukey al 5% para Fuente dentro del nivel de 15 t ha⁻¹*

Fuente	Fe (kg ha ⁻¹)	
Compost	2,68	a
EBV	2,62	a
Humus	1,63	b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la Tabla 43 se presenta el análisis de efectos simple para dosis dentro de fuente. El análisis de varianza mostró efecto significativo de la dosis dentro del compost y el EBV, pero no en humus.

Tabla43*Análisis de efecto simple para dosis dentro cada nivel de fuente*

Fuentes de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F _{calc} ,	p-value
Bloque	2	0,33235	0,16618	0,8809	0,4315 ns
Fuente	2	0,55737	0,27869	1,4773	0,2547 ns
Dosis/Compost	2	4,50769	2,25385	11,9472	0,0005 **
Dosis/EBV	2	2,57571	1,28785	6,8267	0,0062 **
Dosis/Humus	2	0,06456	0,03228	0,1711	0,8441 ns
Ad vs Factorial	1	2,82276	2,82276	14,9630	0,0011 **
Residuo	18	3,39570	0,18965		
Total	29	14,25616			

ns: no significativo; *: significativo al 0,05; **: significativo al 0,01 de probabilidad

En la Tabla 44, al evaluar las dosis dentro de la fuente orgánica compost, se observa que la dosis de 15 t ha⁻¹ (2,68 kg ha⁻¹) presenta la mayor acumulación de hierro y difiere significativamente de la dosis 5 t ha⁻¹ (0,94 kg ha⁻¹). La dosis 10 t ha⁻¹ (1,79 kg ha⁻¹) muestra un comportamiento intermedio, sin diferir estadísticamente ni de la dosis de 15 t ha⁻¹ ni de la dosis 5 t ha⁻¹.

Tabla44*Prueba de Tukey al 5% para dosis dentro del nivel de compost*

Dosis (t ha ⁻¹)	Fe (kg ha ⁻¹)	
15	2,68	a
10	1,79	ab
5	0,94	b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

En la Tabla 45, correspondiente al nivel de EBV, la dosis 15 t ha⁻¹ (2,62 kg ha⁻¹) presenta la mayor concentración de hierro y difiere significativamente de las dosis 10 t ha⁻¹ (1,50 kg ha⁻¹) y 5 t ha⁻¹ (1,46 kg ha⁻¹), las cuales no presentan diferencias estadísticas entre sí, según la prueba de Tukey al 5%.

Tabla45*Prueba de Tukey al 5% para dosis dentro del nivel de EBV*

Dosis (t ha ⁻¹)	Fe (kg ha ⁻¹)	
15	2,62	a
10	1,50	b
5	1,46	b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

4.2.5 Boro (B)

Los resultados del análisis de varianza para la acumulación de boro en raíces de betarraga se presentan en la Tabla 46. Se observa que existen diferencias significativas únicamente en la comparación testigo vs Factorial, lo que indica un efecto diferencial entre estos esquemas de tratamiento sobre la acumulación de boro. En contraste, los factores Fuente, Dosis y la interacción Fuente×Dosis no mostraron efectos estadísticamente significativos, al igual que el efecto de Bloque.

El promedio general de acumulación de boro fue de 102,327 g ha⁻¹, con un coeficiente de variación de 39,64%, considerado alto, lo que indica una variabilidad considerable en los datos y una menor precisión experimental.

Tabla46

Análisis de varianza para la acumulación de boro (g ha⁻¹) en las raíces de betarraga

Fuentes de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Fcalc,	p-value
Bloque	2	1015,473	507,737	0,309	0,738 ns
Fuente	2	1926,741	963,371	0,586	0,567 ns
Dosis	2	7159,146	3579,573	2,176	0,142 ns
Fuente*Dosis	4	2314,577	578,644	0,352	0,839 ns
Test. vs Factorial	1	9987,702	9987,702	6,072	0,024 *
Residuo	18	29608,18860	1644,899		
Total	29	52011,828			
CV =	39,64%				
Promedio general	102,327				

ns: no significativo; *: significativo al 0,05 de probabilidad

En la Tabla 47, la comparación entre el testigo y el tratamiento factorial muestra diferencias estadísticas entre ambos tratamientos. El tratamiento factorial presenta un valor promedio considerablemente mayor de acumulación de boro (108,4 g ha⁻¹) en comparación con el testigo (47,58 g ha⁻¹). Esta diferencia es significativa, lo que indica que el tratamiento factorial favorece la acumulación de boro en relación con el testigo.

Tabla47

Prueba de Tukey al 5% para la comparación de la acumulación de boro (g ha⁻¹)

Tratamiento	B (g ha ⁻¹)
-------------	-------------------------

Testigo	47,58	a
Factorial	108,4	b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la Tabla 48, al comparar las fuentes orgánicas, se observa que EBV presenta el valor promedio más alto de acumulación de boro ($118,58 \text{ g ha}^{-1}$), seguido por humus ($108,75 \text{ g ha}^{-1}$) y compost ($97,89 \text{ g ha}^{-1}$). Sin embargo, no existen diferencias estadísticas significativas entre ellas en cuanto a la acumulación de boro.

Tabla 48

Prueba de Tukey al 5% para la comparación de acumulación de boro (g ha^{-1}) entre fuentes orgánicas

Fuente	B (g ha^{-1})	
Compost	97,89	a
EBV	118,58	a
Humus	108,75	a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la Tabla 49, la comparación entre las dosis aplicadas (5, 10 y 15) muestra variaciones en los valores promedio de concentración de boro, siendo la dosis de 15 la más alta ($127,54 \text{ g ha}^{-1}$), seguida de 10 ($109,92 \text{ g ha}^{-1}$) y 5 ($87,75 \text{ g ha}^{-1}$). No obstante, no se generaron diferencias significativas entre los niveles evaluados en la acumulación de boro.

Tabla 49

Prueba de Tukey al 5% para la comparación de acumulación de boro (g ha^{-1}) entre dosis

Dosis (t ha^{-1})	B (g ha^{-1})	
10	109,92	a
15	127,54	a
5	87,75	a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

CAPITULO V. DISCUSIONES

En términos generales, los resultados muestran que la aplicación de fuentes orgánicas en suelo arenoso mejoró el comportamiento nutricional de la betarraga respecto al testigo, aunque el patrón de respuesta no fue uniforme para todos los micronutrientes. Al integrar concentración y acumulación, se observa que la fuente orgánica tuvo mayor peso en algunos casos sobre la concentración, mientras que la dosis explicó con más claridad la acumulación total en raíz, lo cual es coherente con la naturaleza de esta variable, ya que la acumulación depende no solo de la concentración del nutriente en el tejido, sino también de la biomasa o rendimiento de raíz producida. Este comportamiento coincide con lo reportado para cultivos de *Beta vulgaris* y otros sistemas hortícolas, donde las enmiendas orgánicas mejoran la disponibilidad de micronutrientes, pero la extracción total por planta suele expresarse con mayor claridad cuando aumenta la producción de materia seca o de raíz (Ijaz et al., 2023; Rahimi et al, 2021).

Para el zinc (Zn), la concentración fue mayor en el tratamiento factorial que en el testigo, y dentro de las fuentes orgánicas destacó el EBV, mientras que las dosis no modificaron significativamente la concentración. Sin embargo, al evaluar la acumulación, el patrón cambió: la fuente dejó de ser decisiva y la dosis pasó a ser el factor dominante, con incrementos progresivos desde 5 hasta 15 t ha⁻¹. Esta divergencia sugiere que el EBV favoreció una mayor disponibilidad o absorción específica de Zn por unidad de tejido, pero que la extracción total del elemento dependió sobre todo del aumento de biomasa radical inducido por mayores dosis. Este resultado es consistente con estudios que muestran que las enmiendas orgánicas incrementan el Zn disponible mediante complejación orgánica, aumento de la CIC y liberación gradual, aunque la acumulación final en planta responde fuertemente al crecimiento del cultivo (Dey et al., 2020; Younas et al., 2024).

En el caso del cobre (Cu), la concentración respondió significativamente tanto a fuente como a dosis, con ventaja del EBV frente al compost y con mejor respuesta en la dosis baja respecto a la alta; sin embargo, la acumulación mostró un comportamiento distinto, pues dependió principalmente de la dosis, aumentando de forma sostenida hasta 15 t ha⁻¹, sin diferencias entre fuentes. Esto permite inferir que, aunque ciertas fuentes orgánicas pueden elevar la concentración de Cu en el tejido, la remoción total por hectárea queda determinada por el incremento de rendimiento de raíz. Este tipo de respuesta ha sido descrito en estudios sobre fertilización orgánica, donde el Cu disponible se incrementa por la mineralización de

residuos y la formación de complejos organometálicos, pero su acumulación total en cosecha responde más al crecimiento del cultivo que a la sola riqueza del tejido (Dey et al., 2020; Hakimi et al., 2024). De modo similar, en betarraga se ha reportado que la nutrición orgánica mejora calidad y rendimiento, pero no siempre mantiene la misma jerarquía entre concentración mineral y extracción total, debido al llamado efecto de dilución o concentración asociado al crecimiento de la raíz (Ijaz et al., 2023; Petek et al., 2019).

Para el manganeso (Mn), la concentración fue mayor en el testigo que en el factorial y disminuyó al aumentar la dosis, mientras que la acumulación mostró el patrón opuesto: fue superior en el factorial, dependió significativamente de fuente y dosis, y alcanzó sus valores más altos con humus y con 10–15 t ha⁻¹. Esta aparente contradicción no es realmente inconsistente; más bien indica que con mayores dosis orgánicas la planta produjo más masa radical, de manera que el Mn pudo quedar más “diluido” en el tejido, pero la cantidad total acumulada por hectárea aumentó. En otras palabras, menor concentración no implica necesariamente menor extracción total. Este comportamiento coincide con estudios donde las enmiendas orgánicas incrementan el desarrollo del cultivo y la absorción total de micronutrientes aun cuando la concentración no aumente en la misma proporción (Rahimi et al., 2021; Thapa et al., 2025). Además, se ha señalado que el humus y otros materiales orgánicos estables pueden mejorar la retención de Mn por su efecto sobre la materia orgánica activa, la microbiota y la capacidad buffer del suelo, lo que ayuda a explicar el mejor comportamiento del humus en acumulación (Madhupriya et al., 2025; Getahun et al., 2020).

En hierro (Fe), tanto la concentración como la acumulación evidenciaron que la respuesta no dependió únicamente de la fuente o de la dosis por separado, sino de la interacción entre ambas. En concentración, el EBV destacó a 10 y 15 t ha⁻¹; y en acumulación, a 15 t ha⁻¹ el compost y el EBV superaron al humus, mientras que dentro de compost y EBV la dosis de 15 t ha⁻¹ fue superior a las menores. Este patrón tiene una sólida explicación edáfica: el Fe es uno de los micronutrientes más sensibles al pH, a la aireación, a la materia orgánica y a la naturaleza de los complejos quelatados en el suelo. Por ello, no basta con aplicar más materia orgánica; importa también su calidad química y su capacidad de formar compuestos solubles o quelados que mantengan el hierro disponible en la rizosfera. Diversos trabajos muestran precisamente que el compost, el estiércol transformado, el biochar enriquecido o ciertas mezclas orgánicas pueden mejorar la disponibilidad de Fe y su acumulación en el

cultivo, pero que la magnitud de esa respuesta depende del tipo de enmienda y de la tasa aplicada (Dey et al., 2020; Kwizera et al., 2024).

Respecto al boro (B), la concentración no varió significativamente entre testigo y factorial, ni entre fuentes o dosis; sin embargo, la acumulación sí fue mayor en el factorial que en el testigo. Este resultado sugiere que las fuentes orgánicas no modificaron de forma marcada la concentración de B en el tejido radicular, pero sí favorecieron una mayor extracción total debido al incremento del rendimiento de raíz. Debe considerarse además que el boro presenta alta movilidad en suelos arenosos y es muy sensible a pérdidas por lixiviación, por lo que su respuesta experimental suele ser más variable que la de otros micronutrientes. El elevado coeficiente de variación hallado en la acumulación de B refuerza esta interpretación. La literatura muestra que algunas enmiendas orgánicas pueden aumentar el B soluble, aunque el efecto suele ser menos consistente que para Zn o Fe y depende mucho del material aplicado y de la dinámica hídrica del suelo (Dey et al., 2020; Hayat et al., 2025).

De manera integrada, los resultados permiten sostener que en suelo arenoso la fertilización orgánica no actuó igual sobre todos los micronutrientes, pero sí mostró una tendencia general a superar al testigo, sobre todo cuando la respuesta se evaluó como acumulación en raíz. Esto es agronómicamente importante, porque en cultivos de raíz la calidad nutricional y la exportación de nutrientes dependen tanto de la riqueza mineral del tejido como del peso de raíz cosechada. En ese sentido, el EBV mostró mayor eficiencia para elevar la concentración de Zn y Fe en varios escenarios, mientras que el humus destacó en acumulación de Mn y el compost tuvo un papel competitivo en acumulación de Fe a dosis altas. A su vez, la dosis de 15 t ha⁻¹ fue la más consistente para maximizar la acumulación de Zn, Cu y Fe, y una de las más altas para Mn, lo que indica que en suelos arenosos la magnitud del aporte orgánico es decisiva para contrarrestar la baja retención y la alta lixiviación.

CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- a) La aplicación de fuentes orgánicas en suelo arenoso permitió mejorar el estado nutricional de la betarraga, evidenciándose diferencias significativas respecto al testigo en la mayoría de los micronutrientes evaluados, lo que confirma la importancia del uso de enmiendas orgánicas para incrementar la disponibilidad de nutrientes en este tipo de suelos de baja fertilidad natural.
- b) Las fuentes orgánicas evaluadas mostraron efectos diferenciados sobre la concentración de micronutrientes en las raíces, destacando el EBV como la fuente más eficiente para incrementar la concentración de zinc y hierro, mientras que el compost y el humus presentaron respuestas variables dependiendo del elemento, lo que indica que la calidad del material orgánico influye directamente en la disponibilidad y absorción de micronutrientes.
- c) El nivel de aplicación de las enmiendas orgánicas no tuvo un efecto significativo sobre la concentración de la mayoría de los micronutrientes; sin embargo, sí influyó de manera consistente en la acumulación de los mismos en las raíces, observándose incrementos progresivos a medida que aumentó la dosis, lo que evidencia que la cantidad de materia orgánica aplicada es determinante para la extracción total de nutrientes por el cultivo.
- d) La acumulación de micronutrientes en las raíces de betarraga resultó ser un indicador más sensible que la concentración para evaluar el efecto de los tratamientos, debido a su relación directa con el rendimiento del cultivo, permitiendo evidenciar con mayor claridad las ventajas del uso de enmiendas orgánicas en comparación con el testigo.
- e) El comportamiento de los micronutrientes no fue uniforme; mientras que el zinc, cobre y hierro respondieron positivamente a la aplicación de dosis altas de enmiendas orgánicas, el manganeso presentó un efecto de dilución en la concentración, pero un incremento en la acumulación, y el boro mostró alta variabilidad, lo que refleja la complejidad de la dinámica de estos elementos en suelos arenosos.
- f) Se evidenció interacción significativa entre fuente y dosis en el caso del hierro, lo que indica que la disponibilidad de este micronutriente depende tanto de la calidad

de la enmienda orgánica como de la cantidad aplicada, resaltando la necesidad de considerar ambos factores en el manejo nutricional del cultivo.

- g) La dosis de 15 t ha⁻¹ se identificó como la más eficiente para maximizar la acumulación de micronutrientes en las raíces de betarraga, especialmente para zinc, cobre y hierro, constituyéndose como una alternativa viable para mejorar la fertilidad de suelos arenosos y la calidad nutricional del cultivo.

6.2 Recomendaciones

- a) Uso de enmiendas orgánicas como práctica fundamental en el manejo de suelos arenosos destinados al cultivo de betarraga, debido a su efecto positivo en la mejora de la disponibilidad y acumulación de micronutrientes, así como en la fertilidad del suelo.
- b) Priorizar el uso de la fuente orgánica EBV cuando el objetivo sea incrementar la concentración de micronutrientes como zinc y hierro en las raíces, mientras que el uso de humus y compost puede ser considerado en función de su efecto complementario sobre otros elementos y condiciones específicas del suelo.
- c) Aplicación de dosis iguales o cercanas a 15 t ha⁻¹ de materia orgánica, ya que este nivel mostró mayor eficiencia en la acumulación de micronutrientes en las raíces de betarraga, especialmente en zinc, cobre y hierro, contribuyendo a una mayor extracción de nutrientes por el cultivo.
- d) Considerar la acumulación de micronutrientes como un indicador clave en la evaluación de la eficiencia de fertilización, debido a su relación directa con el rendimiento del cultivo, complementando así el análisis tradicional basado únicamente en la concentración.
- e) Realizar estudios adicionales que incluyan la evaluación de macronutrientes, parámetros de rendimiento y calidad de la raíz, con el fin de comprender de manera integral la respuesta del cultivo a las enmiendas orgánicas en suelos arenosos.
- f) Ampliar la investigación evaluando diferentes tipos de enmiendas orgánicas, combinaciones entre ellas y su interacción con fertilización mineral, para optimizar el manejo nutricional del cultivo y mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes.
- g) Evaluar el efecto residual de las enmiendas orgánicas en ciclos posteriores de cultivo, con el propósito de determinar su impacto a mediano y largo plazo sobre la fertilidad del suelo y la disponibilidad de micronutrientes.

- h) Considerar variables edáficas complementarias como pH, capacidad de intercambio catiónico y contenido de materia orgánica, a fin de explicar con mayor precisión la dinámica de los micronutrientes en suelos arenosos.

CAPITULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbas, M. S., Akmal, M., Khan, K., Aziz, I., & Rafa, H. (2021). Zn ferti-fortification of wheat (*Triticum aestivum* L.) using zinc enriched compost and biochar in rainfed area. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(18), 2191-2206. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1921189>
- Abdo, E., Sohaimy, S., Shaltout, O., Abdalla, A., & Zeitoun, A. (2020). Nutritional evaluation of beetroots (*Beta vulgaris* L.) and its potential application in a functional beverage. *Plants*, 9(12), 1752. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/plants9121752>
- Abdou, N., Samnoudi, I., Ibrahim, A., & Tawwab, A. (2024). Biochar amendment alleviates the combined effects of salinity and drought stress on water productivity, yield and quality traits of Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24(2), 2091-2110. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s42729-024-01754-5>
- Bolaños, L., Lukaszewski, K., Bonilla, I., & Blevins, D. (2004). Why boron?. *Plant Physiology and Biochemistry*, 42(11), 907–912. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2004.11.002>
- Broadley, M., Brown, P., Cakmak, I., Rengel, Z., & Zhao, F. (2012). Chapter 7 - Function of Nutrients: Micronutrients. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 191–248). Recuperado de <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00007-8>
- Chang, Y., Chang, D., Cardoza, C., & Cabrera, V. (2022). Aprovechamiento de compost a base de residuos de tierra de blanqueo para mayor rendimiento de betarraga (*Beta vulgaris* L.), Barranca. *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria*, 6(18), 491-502. Recuperado de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2664-09022022000300491&script=sci_arttext
- Clifford, T., Howatson, G., West, D. J., & Stevenson, E. J. (2015). The potential benefits of red beetroot supplementation in health and disease. *Nutrients*, 7(4), 2801-2822. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/nu7042801>

- Dey, A., Srivastava, P., Pachauri, S. P., & Shukla, A. (2020). Effect of application of some organic amendments on soil properties, extractable micronutrients and their chemical fractions in a sandy loam soil. *Polish Journal of Soil Science*, 53(2), 181-198. Recuperado de <https://journals.umcs.pl/pjss/article/view/9097>
- Getahun, A., Muleta, D., Assefa, F., Kiros, S., & Hungria, M. (2020). Biochar and other organic amendments improve the physicochemical properties of soil in highly degraded habitat. *European Journal of Engineering Research and Science*, 5(3), 331-338. Recuperado de <https://eu-opensci.org/index.php/ejeng/article/view/61735>
- Goss, M. J., Tubeileh, A., & Goorahoo, D. (2013). A review of the use of organic amendments and the risk to human health. *Advances in agronomy*, 120, 275-379. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407686-0.00005-1>
- Hakimi, F., Sebbar, A., Bouamri, R., Sidikou, A. A. H., El Janati, M., & Bouaziz, A. (2024). Effects of compost and compost tea on soil properties and nutrient uptake of the Moroccan date palm cultivar “Mejhoul” under organic cultivation. *Journal of Ecological Engineering*, 25(7), 224-240. Recuperado de <https://doi.org/10.12911/22998993/188334>
- Hayat, F., Ashraf, M., Masood, S., Zafar-ul-Hye, M., & Hussain, S. (2025). Wheat productivity and micronutrients availability in soil by the use of chemical and organic fertilizers under alkaline calcareous conditions. *Soil and Environment*, 44(1). Recuperado de <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2025SoEnv..44...92H/abstract>
- Hoyos, G. (2023). *Efecto de la Aplicación de Guano de Isla Y Humus de Lombriz en el Rendimiento del Cultivo de Betarraga (Beta Vulgaris L.) Variedad Early Wonder en el Fundo la Victoria. (tesis pregrados)*. Recuperado de <https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/5999/TESIS%20-%20GROVER%20HOYOS%20ZORRILLA.pdf?isAllowed=y&sequence=5>
- Ijaz, M., Ul-Allah, S., Sattar, A., Sher, A., Hussain, I., & Nawaz, A. (2023). Evaluation of various organic amendment sources to improve the root yield and sugar contents of sugar beet genotypes (*Beta vulgaris* L.) under arid environments. *Sustainability*, 15(5), 3898. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/su15053898>

- Jagadeesh, C., Madhavi, M., Prasad, M., & Padmaja, V. (2018). Effect of organic manures on growth and yield attributes of beet root cv. crimson globe. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(11), 3538-3553. Recuperado de <https://www.ijcmas.com/7-11-2018/Chitti%20Jagadeesh,%20et%20al.pdf>
- Kwizera, E., Mungai, N., Opiyo, A. M., & Niyokuri, N. A. (2024). Effect of biochar and inorganic fertilizer on the quality of beetroot (*Beta vulgaris* L.) in Kenya. *International Journal of Horticultural Science*, 7-13. Recuperado de <https://doi.org/10.31421/ijhs/30/2024/13744>
- Kwizera, E., Opiyo, A., & Mungai, N. (2023). Effects of biochar and inorganic fertiliser on the growth and yield of beetroot (*Beta vulgaris* L.) in Kenya. *International Journal of Horticultural Science* 29 37-45 Recuperado de <https://doi.org/10.31421/ijhs/29/2023/12499>
- La Rosa, J. (2024). *Fertilización ecológica con compost de residuos de pescado para evaluar la respuesta en cultivo de betarraga (Beta vulgaris L.)*, Supe 2022. (tesis pregrado). Recuperado de <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14067/9925/TESIS.pdf>
- Lewu, N. (2023). Micromineral Content of Swiss Chard (*Beta vulgaris* L. var. cicla) Leaves Grown on Zeolite-Amended Sandy Soil. *Indonesian Journal of Agricultural Research* 05(03), 177-186, Recuperado de https://digitalknowledge.cput.ac.za/bitstream/11189/9895/1/Micromineral_Content_Swiss_Chard.pdf
- Madhupriya, D., Baskar, M., Mohanapragash, A. G., Renuga, V., Sriramachandrasekaran, M. V., & Salma Santhosh, S. (2025). Reviving soils with bioactive green gold: Micronutrient-enriched organics for sustainable agriculture. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 57(2), 135-204. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/00103624.2025.2570486>
- Maharjan, B., Panday, D., Blanco-Canqui, H., & Mikha, M. (2021). Potential amendments for improving productivity of low carbon semiarid soil. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 4(3), e20171. Recurado de <https://doi.org/10.1002/agg2.20171>

- Manga, M. (2022). *Efecto de densidad de siembra y fuentes de abonamiento orgánico en producción de dos variedades de beterraga (Beta vulgaris L.), en Oropesa-Quispicanchi-Cusco.* (tesis pregrado). Recuperado de https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/6620/253T20220150_TC.pdf
- Marschner, P. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9>
- Millaleo, R., Reyes, C., Ivanov, A., Mora, M., & Alberdi, M. (2010). Manganese as essential and toxic element for plants: Transport, accumulation and resistance mechanisms. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(4), 470–481. Recuperado de <https://doi.org/10.4067/S0718-95162010000200008>
- Muhammad, I., Allah, S., Sattar, a., Sher, A., Hussainm, I., & Nawaz, A. (2023). Evaluation of various organic amendment sources to improve the root yield and sugar contents of sugar beet genotypes (*Beta vulgaris* L.) under arid environments. *Sustainability*, 15(5), 3898. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/su15053898>
- Najafi, M., Razeghizadeh, T., Taghizadeh, M. S., & Boostani, H. (2019). Effect of sheep manure and its produced vermicompost and biochar on the properties of a calcareous soil after barley harvest. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(20), 2610-2625. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1671444>
- Paulauskienė, A., Šileikienė, D., Karklelienė, R., Tarasevičienė, Ž. y Česonienė, L. (2023). Investigación de la calidad de las remolachas (*Beta vulgaris* L., ssp. vulgaris var. conditiva Alef.) cultivadas en diferentes sistemas agrícolas aplicando métodos de investigación químicos y holísticos. *Sostenibilidad*, 15 (9), 7102. <https://doi.org/10.3390/su15097102>
- Petek, M., Toth, N., Pećina, M., Karažija, T., Lazarević, B., Palčić, I., Veres, S., & Ćustić, M. (2019). Beetroot mineral composition affected by mineral and organic fertilization. *PLoS One*, 14(9), e0221767. Recuperado de <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221767>

- Quispe, N. (2023). *Efecto de dosis entre macro-micronutrientes y abonos orgánicos en el cultivo de beterraga (Beta vulgaris L. ssp. Vulgaris) conducido en el Centro Agronómico K' ayra.* (tesis pregrado). Recuperado de <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/7304>
- Rahimi, A., Heydarzadeh, S., Gitari, H., Khiavi, H. K., Maitra, S., & Hosseinpour, A. (2021). Yield and quality traits of field-grown sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in response to foliar application of micronutrients and different levels of manure. *International Journal of Bioresource Science*, 8(2), 103-112. Recuperado de [10.30954/2347-9655.02.2021.7](https://doi.org/10.30954/2347-9655.02.2021.7)
- Sadegh, F., Fallah, S., Bahmanyar, M., & Emadi, M. (2018). Application of biochar and compost for enhancement of rice (*Oryza sativa* L.) grain yield in calcareous sandy soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(5), 552-566. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1431272>
- Singaravel, R., Prasath, V., & Elayaraja, D. (2005). Role of bio-resources in improving the fertility of coastal sandy soils for sustainable groundnut production. *Proceedings of management of tropical sandy soils for sustainable agriculture* 27, 329-333. Recuperado de <https://www.fao.org/4/ag125e/AG125E25.htm>
- Younas, N., Naveed, M., Yaseen, M., Younas, M., Mumtaz, M., Babar, M., Nadeem, M., Soysal, S., Al-ashkar, I., & Mustafa, A. (2024). Processed manures with added zinc improve zinc biofortification in lentils under saline conditions. *Agronomy*, 14(6), 1289. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/agronomy14061289>
- Yruela, I. (2009). Copper in plants: acquisition, transport and interactions. *Functional Plant Biology*, 36(5), 409–430. Recuperado de <https://doi.org/10.1071/FP08288>
- Zhao, Y., Chen, Y., Dai, H., Cui, J., Wang, L., & Sui, P. (2021). Effects of organic amendments on the improvement of soil nutrients and crop yield in sandy soils during a 4-year field experiment in Huang-Huai-Hai Plain, Northern China. *Agronomy*, 11(1), 157. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/agronomy11010157>