

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**“BIOFORTIFICACIÓN AGRONÓMICA MEDIANTE APLICACIÓN
FOLIAR DE Zn EN CLONES SELECTOS DE PAPA
BIOFORTIFICADOS CON Zn EN CONDICIONES DE
INVERNADERO”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERA
AGRÓNOMA**

SHIRLEY VIRGINIA ZEVALLOS RAMIREZ

LIMA -PERÚ

2024

Tesis Shirley Zevallos

INFORME DE ORIGINALIDAD

| | | | |
|---------------------|---------------------|---------------|-------------------------|
| 10% | 10% | 2% | 3% |
| INDICE DE SIMILITUD | FUENTES DE INTERNET | PUBLICACIONES | TRABAJOS DEL ESTUDIANTE |

FUENTES PRIMARIAS

| | | |
|----------|---|---------------|
| 1 | repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet | 2% |
| 2 | repositorio.unsaac.edu.pe Fuente de Internet | 1% |
| 3 | purl.org Fuente de Internet | 1% |
| 4 | repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet | <1% |
| 5 | rdr.io Fuente de Internet | <1% |
| 6 | bibliotecadigital.ciren.cl Fuente de Internet | <1% |
| 7 | rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com Fuente de Internet | <1% |
| 8 | leg.ufpr.br Fuente de Internet | <1% |
| 9 | repositorio.unh.edu.pe Fuente de Internet | <1% |

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**“BIOFORTIFICACIÓN AGRONÓMICA MEDIANTE APLICACIÓN
FOLIAR DE Zn EN CLONES SELECTOS DE PAPA BIOFORTIFICADOS
CON Zn EN CONDICIONES DE INVERNADERO”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERA
AGRÓNOMA**

SHIRLEY VIRGINIA ZEVALLOS RAMIREZ

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

.....
Dr. Juan Waldir Mendoza Cortez
PRESIDENTE

.....
Ing. Mg. Sc. Pedro Pablo Gutiérrez Vílchez
ASESOR

.....
Dr. Oscar Oswaldo Loli Figueroa
MIEMBRO

.....
Ing. Mg. Sc. Julio César Nazario Ríos
MIEMBRO

.....
Ing. Mg. Sc. Elisa Del Carmen Salas Murrugarra
CO- ASESORA

LIMA – PERÚ

2024

DEDICATORIA

A mi abuelo, Geremias Ramirez, por inspirarme hasta sus últimos días.

A mi abuela, Dionisia Almeida, a quien quiero llenarla de orgullo y me anima a luchar por mis sueños.

A mí mamá, Haydee Ramirez, por su esfuerzo y dedicación constante para lograr todo lo que me propongo.

A mi papá, Jesús Zevallos, por alentarme y estar para mí.

A mi hermana Camila, porque quiero mostrarle que todo se puede con esfuerzo y entrega.

A mi tía Elizabeth, por inculcarme el valor de la perseverancia.

A Nini, por estar para mí en los momentos más preciados de la vida.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Mg. Sc. Pedro Pablo Gutiérrez por aceptar ser el patrocinador, por su motivación y colaboración en la planificación y revisión del presente trabajo y por sus consejos en esta etapa profesional y estudiantil.

A la Ing. Mg. Sc. Elisa Salas Murrugarra por su exigencia, su paciencia, disciplina y sus valiosas sugerencias en la ejecución del proyecto de investigación.

A Don Mario, por su colaboración en las labores agrícolas.

A mis amigos: Shamir y Marco Guerra por su colaboración en la ejecución de la tesis.

A la PhD. Gabriela Burgos por sus valiosos comentarios y aportes en biofortificación.

Al PhD. Boeck Bert por su paciencia y apoyo en la parte estadística.

Al PhD. Thiago Mendes, PhD. Hannele Lindqvist-Kreuze y el PhD. Hugo Campos por sus aportes y ánimo en la continuación del trabajo en campo.

Mi agradecimiento a la colaboración entre el Centro Internacional de la Papa y el Laboratorio de Fertilidad de Suelos "Sven Villagarcía Hermoza" de la UNALM, la cual fue financiada por el proyecto: " Avances y logros de la mejora genética de papas y camotes precoces, resilientes y nutritivos"; financiado por la Agencia para el Desarrollo Internacional de los Estados Unidos (USAID).

ÍNDICE GENERAL

| | | |
|--------|--|----|
| I. | INTRODUCCIÓN | 1 |
| II. | REVISIÓN DE LITERATURA..... | 3 |
| 2.1. | La desnutrición por micronutrientes (Hambre Oculta)..... | 3 |
| 2.2. | Importancia del zinc como micronutriente indispensable en la nutrición humana. | 5 |
| 2.3. | Dinámica de micronutrientes suelo-planta. | 7 |
| 2.4. | Dinámica del Zn: Suelo, planta e interacción suelo-planta | 8 |
| 2.4.1. | Zinc en el suelo..... | 8 |
| 2.4.2. | Zinc en planta | 11 |
| 2.4.3. | Interacción del Zinc: suelo-planta | 13 |
| 2.4.4. | Interacción del zinc: planta-sumideros de crecimiento | 14 |
| 2.5. | Deficiencia de zinc en los cultivos | 17 |
| 2.6. | Biofortificación | 20 |
| 2.6.1. | Intervención agronómica | 23 |
| 2.6.2. | Intervención genética..... | 31 |
| III. | METODOLOGÍA..... | 35 |
| 3.1. | Características geográficas, climáticas y edáficas del experimento. | 36 |
| 3.1.1. | Ubicación del experimento | 36 |
| 3.1.2. | Características climáticas | 36 |
| 3.1.3. | Características del suelo | 37 |
| 3.1.4. | Características del agua de riego | 39 |
| 3.2. | Materiales..... | 40 |
| 3.2.1. | Material vegetal | 40 |
| 3.2.2. | Fertilizantes | 43 |
| 3.3. | Tratamientos | 43 |
| 3.4. | Diseño experimental | 44 |
| 3.4.1. | Modelo estadístico..... | 44 |
| 3.4.2. | Análisis estadístico | 45 |
| 3.5. | Distribución del área experimental | 46 |
| 3.6. | Variables evaluadas | 46 |
| 3.7. | Metodología del experimento. | 49 |
| 3.7.1. | Muestreo, colecta y tamizado del suelo..... | 49 |
| 3.7.2. | Acondicionamiento del área experimental | 49 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 3.7.3. | Manejo agronómico del experimento | 50 |
| 3.7.4. | Procesamiento de muestras: Determinación de materia seca y análisis de minerales (zinc y hierro) | 53 |
| IV. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 56 |
| 4.1. | VARIABLES ANALIZADAS DURANTE LA FASE VEGETATIVA..... | 56 |
| 4.1.1. | Altura de planta (PLAHE)..... | 56 |
| 4.1.2. | Número de tallos por planta (SNPP) | 58 |
| 4.1.3. | Vigor de planta (Vigor_plant) | 59 |
| 4.1.4. | Senescencia (SE) | 61 |
| 4.2. | VARIABLES ANALIZADAS DURANTE LA COSECHA..... | 62 |
| 4.2.1. | Número total de tubérculos por planta (TNTPL) | 63 |
| 4.2.2. | Peso total de los tubérculos por planta (TTWP)..... | 65 |
| 4.2.3. | Peso promedio de los tubérculos (ATW) | 67 |
| 4.3. | VARIABLES ANALIZADAS DURANTE LA POSCOSECHA..... | 69 |
| 4.3.1. | Porcentaje de materia seca en tubérculos (MS)..... | 69 |
| 4.3.2. | Concentración de Fe en tubérculo en base seca (mg Fe kg ⁻¹ BS)..... | 71 |
| 4.3.3. | Concentración de Zinc en tubérculo en base seca (mg Zn kg ⁻¹ BS)..... | 72 |
| 4.3.4. | Matriz de correlación de los componentes de rendimiento y calidad vs concentración de Zn con y sin aplicación foliar..... | 78 |
| V. | CONCLUSIONES | 81 |
| VI. | RECOMENDACIONES | 82 |
| VII. | BIBLIOGRAFÍA..... | 82 |
| VIII. | ANEXO | 103 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Sensibilidad relativa de los cultivos antes la deficiencia de Zn. | 20 |
| Tabla 2: La composición mineral (mg kg^{-1}) de la papa a los 0 días después de cosecha mostró un efecto con la fertilización foliar con micronutrientes. | 25 |
| Tabla 3: Concentración de Zn en hojas (foliar) y tubérculos (cáscara y pulpa). | 28 |
| Tabla 4: Concentración media de Zn (mg kg^{-1} MS) en pulpa y cáscara en respuesta a 5 niveles de fertilización agronómica con Zn (edáfica y foliar) en 2 sitios de los Andes ecuatorianos en los años 2013 al 2014. | 31 |
| Tabla 5: Data de variables climáticas promedios registrados durante el experimento. | 37 |
| Tabla 6: Características fisicoquímicas del suelo en estudio. | 39 |
| Tabla 7: Características químicas del agua en estudio | 40 |
| Tabla 8: Lista de material vegetal en estudio. | 43 |
| Tabla 9: Cuadro de tratamientos en el experimento. | 44 |
| Tabla 10: Características del ensayo experimental. | 46 |
| Tabla 11: Escalas ajustadas para el vigor de planta. | 47 |
| Tabla 12: Escalas ajustadas para la senescencia. | 47 |
| Tabla 13: Fórmulas de características evaluadas a la cosecha. | 48 |
| Tabla 14: Fórmulas de características evaluadas a la poscosecha. | 49 |
| Tabla 15: Fertilización, fraccionamiento base del experimento. | 52 |
| Tabla 16: Análisis de varianza para las variables PLAHE, SNPP, Plant_Vigor y SE evaluadas a la fase vegetativa. | 56 |
| Tabla 17: Análisis de varianza para las variables TNTP, TTWP y ATW evaluadas a la cosecha. | 63 |
| Tabla 18: Análisis de varianza para las variables MS, concentración de Zn y Fe evaluadas a la poscosecha. | 69 |
| Tabla 19: Análisis de efectos simples de la interacción GxD al evaluar el contenido de Zn en tubérculos de un grupo de clones biofortificados y una variedad comercial. | 73 |
| Tabla 20: Comparación de estudio realizado por Leiva (2021) y este experimento. | 76 |
| Tabla 21: Correlaciones respecto al tratamiento control y foliar para la concentración de Zn | 80 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Lejos del objetivo de hambre cero, proyección hacia el 2030 revela una disminución de hambre mundial, sin embargo, significa 78 millones personas subnutridas más que en un escenario donde la pandemia no hubiera ocurrido. | 3 |
| Figura 2: Desnutrición crónica en niños menores de 5 años según área de residencia (2021-2022). | 4 |
| Figura 3: Distribución global de la deficiencia de Zn en humanos. | 6 |
| Figura 4: Distribución global de la deficiencia de zinc en los suelos. | 9 |
| Figura 5: Especies de Zn solubles en equilibrio con el Zn del suelo, cuando Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- están a una concentración de 10^{-3} M y H_2PO_4^- está a 10^{-5} M. | 10 |
| Figura 6: Interacción de nutrientes-Zn: Micronutrientes vs Macronutrientes (M-M), Micronutrientes vs Minerales secundarios (M-M/s) y Micronutrientes vs metales pesados (M-H). | 11 |
| Figura 7: Transporte del Zn desde la raíz hasta el brote en las plantas | 13 |
| Figura 8: Esencialidad, deficiencia, toxicidad y tolerancia del Zn en las plantas. | 18 |
| Figura 9: Esquema de causas de deficiencia de Zn en cultivos. | 18 |
| Figura 10: Variación de las concentraciones de Zn en: raíces, brotes, semillas y tubérculos comestibles. | 20 |
| Figura 11: Criterios en la biofortificación en el cultivo de papa. | 22 |
| Figura 12: Plantas cultivadas en suelo calcáreo deficiente en Zn. | 26 |
| Figura 13: Efecto de la concentración de Zn en los tubérculos del cultivar “Maris Peper” sobre la fertilización foliar. | 27 |
| Figura 14: Efecto de las concentraciones de Zn en tubérculos al aplicar fertilizante foliar. | 29 |
| Figura 15: Respuesta de los tubérculos al rendimiento y la concentración de Zn en tubérculos de 60-75 mm de largo. | 29 |

| | |
|--|----|
| Figura 16: Concentración promedio de tubérculos pelados de papa del cultivar INIAP-NATIVIDAD y Chaucha roja en macetas de invernadero con respuesta a las aplicaciones de Zn al suelo y vía foliar. | 30 |
| Figura 17: Respuesta de los cultivares de trigo biofortificados y estándar (sin biofortificación) en un suelo contaminado y calcáreo, con y sin fertilización de 8 mg kg ⁻¹ Zn | 33 |
| Figura 18: Características climáticas promedios: Temperatura ambiental (°C), temperatura del suelo (°C) y humedad relativa (%) durante los meses de estudio. | 37 |
| Figura 19: Croquis del experimento | 46 |
| Figura 20: Efecto de los genotipos en la altura de planta a los 48 días después del trasplante..... | 57 |
| Figura 21: Efecto de los genotipos en el número de tallos por planta..... | 59 |
| Figura 22: Efecto de los genotipos en el vigor de planta..... | 60 |
| Figura 23: Efecto de los genotipos en el número total de tubérculos por planta..... | 64 |
| Figura 24: Efecto de los genotipos en el peso total de los tubérculos por planta..... | 66 |
| Figura 25: Efecto de los genotipos en el peso promedio de los tubérculos..... | 68 |
| Figura 26: Efecto de los genotipos en la materia seca..... | 70 |
| Figura 27: Efecto de los genotipos en la concentración de Zn..... | 72 |
| Figura 28: Concentración de Zinc (mg kg ⁻¹ BS) por genotipos bajo tratamiento control (sin fertilización) y con fertilización foliar..... | 74 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|---|-----|
| ANEXO 1: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable altura de planta (PLAHE)..... | 103 |
| ANEXO 2: Análisis de Varianza (ANVA) para el número de tallos por planta (SNPP)..... | 104 |
| ANEXO 3: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable vigor de planta (Plant_vigor)..... | 105 |
| ANEXO 4: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable senescencia (SE)..... | 106 |
| ANEXO 5: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable número de tubérculos por planta (TNTPL)..... | 107 |
| ANEXO 6: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable peso de tubérculos por planta (TTWP). | 108 |
| ANEXO 7: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable peso promedio de los tubérculos (ATW)..... | 109 |
| ANEXO 8: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable materia seca (MS)..... | 110 |
| ANEXO 9: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable concentración de Hierro en tubérculo en base peso seco Fe (mg kg ⁻¹ BS)..... | 111 |
| ANEXO 10: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable concentración de Zinc en tubérculo en base de peso seco Zn (mg kg ⁻¹ BS) | 112 |
| ANEXO 11: Promedio de los tratamientos en la fase vegetativa..... | 114 |
| ANEXO 12: Promedio de los tratamientos en la cosecha..... | 115 |
| ANEXO 13: Promedio de los tratamientos durante la poscosecha..... | 116 |
| ANEXO 14: Matriz de correlaciones de Pearson de las variables de estudio (P-value)..... | 117 |
| ANEXO 15: Diseño split-plot en condiciones de invernadero | 118 |
| ANEXO 16: Registro fotográfico | 119 |
| ANEXO 17: Respuesta de los cultivos al tratamiento con fertilizantes basados en micronutrientes..... | 127 |
| ANEXO 18: Deficiencia de Zn en cultivos del mundo..... | 128 |
| ANEXO 19: Dietas recomendadas con contenido de Zn, respecto a la edad de vida y dietas sugeridas por IZiNCG. | 129 |
| ANEXO 20: Captación, translocación y removilización de Zn en plantas. | 130 |
| ANEXO 21: Contenido de zinc, densidad de zinc, contenido de fitato y proporciones molares de fitato a zinc de los alimentos de consumo común. | 131 |
| ANEXO 22: El contenido mineral de 200 g en papas frescas y su contribución a la Ingesta Dietética de Referencia (DRI) en EE. UU. | 132 |
| ANEXO 23: Resultado de análisis de agua..... | 133 |
| ANEXO 24: Resultado de análisis de suelo..... | 134 |

RESUMEN

Ante la deficiencia de zinc (Zn) en poblaciones vulnerables, se propone la biofortificación de cultivos como estrategia de solución. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la fertilización foliar con zinc (FF-Zn) en clones de papa biofortificados. Cuatro clones biofortificados con diferentes niveles de Zn (alto, medio y bajo en Zn y uno alto en Fe y Zn) y una variedad comercial (Yungay), fueron sembrados en invernadero con dos dosis de aplicación foliar (0 % y 0.10 % p/v) bajo un diseño de arreglo factorial (5A x 2B) con parcelas divididas, 4 repeticiones/tratamiento y 5 plantas por parcela. A la cosecha se evaluaron los componentes del rendimiento y se tomaron muestras de tubérculos crudos para la determinación de micronutrientes en laboratorio. Para los componentes de rendimiento, el análisis de modelos mixtos lineales mostró que no existe efectos de interacción G x D significativos, pero si se observaron diferencias altamente significativas entre G. La concentración de Zn en tubérculos mostró un efecto altamente significativo en la interacción G x D. El análisis de efectos simples mostró que los genotipos biofortificados respondieron a la FF-Zn incrementando en promedio sus concentraciones de Zn en un 43 % (rango 28 a 61%) de forma significativa, a pesar de crecer en suelos limitados y alcalinos (pH=7.88). Mientras que la variedad Yungay observó un incremento de un 6%. Este estudio demostró que los clones biofortificados responden mejor a la FF-Zn en comparación con la variedad comercial no biofortificada. Por lo tanto, la biofortificación agronómica y genética son estrategias sinérgicas que pueden lograr un incremento significativo en las concentraciones de Zn a nivel de tubérculo.

Palabras claves: Biofortificación, Fertilización Foliar, *Solanum tuberosum*, Zinc

ABSTRACT

In response to Zn deficiencies in vulnerable populations, crop biofortification is proposed as a solution strategy. The objective of this research was to evaluate the effect of foliar zinc fertilisation (FF-Zn) on biofortified potato clones. Four biofortified clones with different levels of Zn levels (High, Medium, Low in Zn, and high in Fe and Zn) and a commercial variety (Yungay) were grown in a greenhouse. This study involved two foliar application treatments (0% and 0.10% w/v), arranged in a factorial design (5Ax2B) with split plots, 4 replicates/treatment, and 5 plants per plot. At harvest, the yield components were evaluated, and the raw tuber samples were collected to determine micronutrients in the laboratory. For all yield components, linear mixed model analysis did not show significant interaction effects (GxD), but highly significant differences were observed between G. Zinc concentration in tubers showed a highly significant effect in the interaction (GxD). Simple effects analysis showed that biofortified genotypes responded to FF-Zn by significantly increasing their Zn concentrations on average by 43% (range 28 to 61%). In contrast, the Yungay variety observed a 6% increase. This study demonstrated that biofortified clones respond better to FF-Zn compared to the commercial variety without biofortification. Therefore, agronomic and genetic biofortification are synergistic strategies that can achieve a significant increase in tuber-level Zn concentrations.

Keywords: Biofortification, Foliar fertilisation, *Solanum tuberosum*, Zinc

I. INTRODUCCIÓN

La población afectada por la inseguridad alimentaria se ha incrementado durante los últimos 5 años. De acuerdo con las proyecciones contempladas de la Organización Mundial de la Salud (OPS/OMS) (2020) hacia el 2030, la tendencia a la desnutrición es continua cada vez, y en la actualidad creciente como consecuencia de la pandemia del coronavirus COVID19 (Mishra et al., 2020). En efecto, se estima que un 30 % de la población humana tiene problemas de deficiencia de micronutrientes denominada hambre oculta, dentro de ellos, el Perú con indicadores altos en la evolución de la desnutrición en los últimos años (OMS, 2015).

Kromann et al. (2017) establecen que la producción actual de cultivos se orienta a producir una cantidad medida por la condición morfológica; sin embargo, no se prioriza la nutrición suficiente de micronutrientes. Dentro de ellos, el zinc, uno de los elementos necesarios en la ingesta diaria. Esto resulta un problema importante de salud pública, considerando que no consumir suficientes micronutrientes limita la resistencia a las enfermedades, aumenta la mortalidad, compromete el desarrollo cognitivo, detiene el crecimiento y reduce la productividad laboral. Siendo las poblaciones de escasos recursos, quienes son propensos a diversos problemas de crecimiento y desarrollo, los más afectados porque solo dependen de pequeñas cantidades de alimentos con una disponibilidad muy limitada de nutrición balanceada (Rugeles et al., 2019).

Dado el propósito de mitigar las insuficiencias de micronutrientes, Zaman et al. (2017), Zou et al. (2019), Mishra et al. (2020) y Sharma et al. (2020) proponen la biofortificación como una estrategia innovadora para abordar la desnutrición de micronutrientes de manera sostenible e incrementar el bienestar mundial. Este proceso implica el uso de métodos de fitomejoramiento y agronómicos como enfoques agrícolas alternativos para lograr el éxito mediante el uso de recursos genéticos y aplicaciones óptimas de fertilizantes con micronutrientes, respectivamente, para aumentar las concentraciones de nutrientes clave en

los cultivos alimenticios básicos e incrementar su calidad nutricional (Sun et al., 2018; Zou et al., 2019; Raigond et al., 2020; Sharma et al., 2020).

Así mismo, ninguna intervención individual aliviará las deficiencias de micronutrientes y la biofortificación complementa las intervenciones existentes (suplementos y alimentos fortificados). Sin embargo, la biofortificación tiene dos ventajas comparativas clave: su rentabilidad a largo plazo y su capacidad para llegar a las poblaciones rurales menos favorecidas (Sun et al., 2018; Mishra et al., 2020).

En tanto, estudios de mejora genética en papa y aplicaciones de Zn permitirán una mayor comprensión acerca de la biofortificación bajo ambos enfoques, a fin de que permitan un mayor contenido de micronutrientes a nivel de tubérculos y así, reducir las tasas de hambre oculta en poblaciones vulnerables. De igual forma, se espera que las aplicaciones foliares de Zn se argumenten en base a la información sostenida en el presente escrito a fin de utilizarse en futuras investigaciones en clones biofortificados de papa.

Los objetivos del presente trabajo son:

- a) Evaluar el efecto de la fertilización foliar con zinc (FF-Zn) en clones de papa biofortificadas tetraploides.
- b) Evaluar el potencial de los clones de papa biofortificadas tetraploides en la concentración de Zn en los tubérculo cuando crecen en suelos salinos con y sin fertilización de zinc.
- c) Evaluar la concentración de Fe en los tubérculos biofortificados a la aplicación foliar de Zn.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. La desnutrición por micronutrientes (Hambre Oculta)

El ritmo de crecimiento de desnutrición creció a un 9.8% hacia el 2021. Esto significó un promedio de 820 millones de personas afectadas por hambre, de las cuales un promedio de 56 millones fue de Latinoamérica. En la Figura 1, se observan estimaciones lejos del objetivo hambre cero, que indican que cerca de 670 millones de personas todavía presentarán desnutrición hacia el 2030, mientras que para Latinoamérica significaría una tendencia estable de desnutrición alrededor de 56 millones (8% de la población). Esto infiere cerca de 80 millones más en comparación a un escenario donde la pandemia por COVID-19 no hubiera ocurrido (UNICEF/WHO/WORLD BANK, 2021; FAO et al., 2022). Sin embargo, la pandemia exacerbo las asimetrías económicas existentes, en cerca del 32% de niños provenientes de países de ingresos bajos afectados debido a su dieta pobre en calidad e inadecuada ingesta de micronutrientes (Stewart et al., 2010; NU. CEPAL, 2021; FAO et al., 2022).

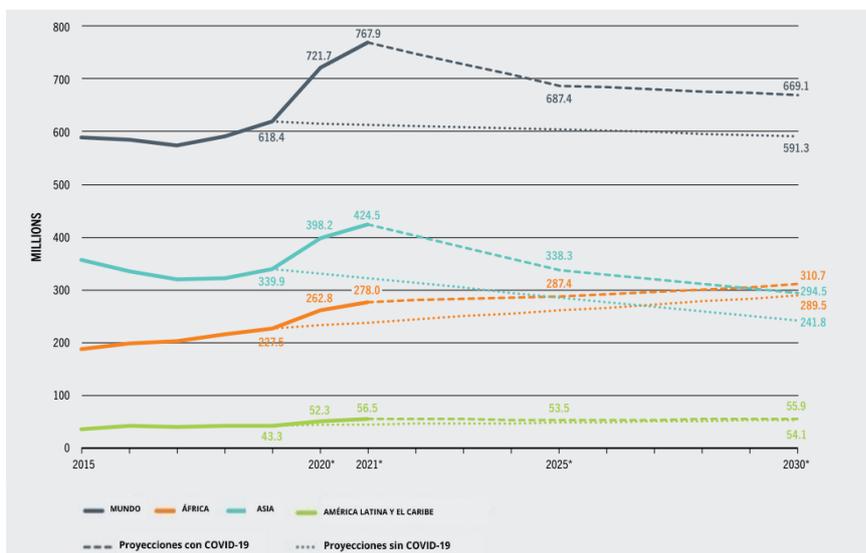


Figura 1: Lejos del objetivo de hambre cero, proyección hacia el 2030 revela una disminución de hambre mundial, sin embargo, significa 78 millones personas subnutridas más que en un escenario donde la pandemia no hubiera ocurrido. Fuente: FAO et al. (2022).

Las tendencias de retraso en el crecimiento, deficiencia de micronutrientes esenciales, anemia materna y otros, es preocupante y alarmante. En Perú, 1 de cada 4 niños menores de 5 años padece de desnutrición crónica infantil, esto implica el aumento del riesgo de sufrir enfermedades crónicas como: hipertensión, obesidad, diabetes tipo 2 y otros (Tarqui et al., 2017). En la Figura 2, se muestra que hacia el 2022, la desnutrición crónica afectó un 11.7% de niños menores de cinco años, sin alguna variación significativa, afectando en 16.8 puntos porcentuales la incidencia en zonas rurales (23.9%) que urbanas (7.1%) (INEI, 2022).

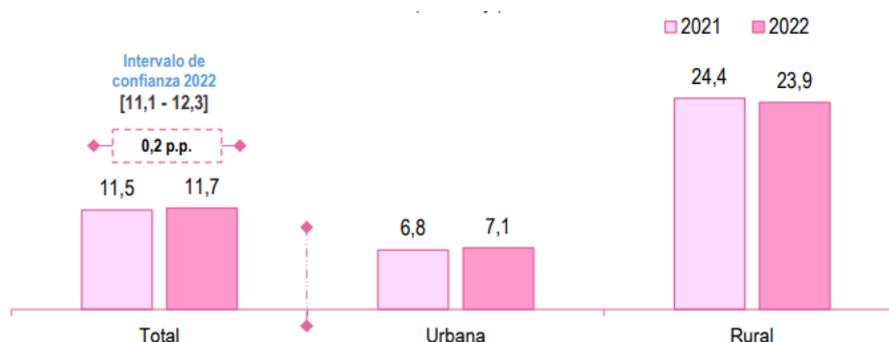


Figura 2: Desnutrición crónica en niños menores de 5 años según área de residencia (2021-2022).

Fuente: INEI (2022).

Estas enfermedades antes mencionadas refieren a la falta de micronutrientes, minerales y vitaminas, dentro de ellas el hierro y el zinc. Esto significa un desafío fundamental en países en vía de desarrollo denominado hambre oculta, dado por la desnutrición de micronutrientes invisibles hasta ser abordadas por una condición médica que asocie tales deficiencias nutricionales (Global, 2015; Sun et al., 2018; Sharma et al., 2020). En la actualidad, al menos un tercio de la población mundial tiene un micronutriente deficiente, donde cerca de 2 billones de personas son afectadas por hambre oculta (Hidoto et al., 2017; Mkambula et al., 2022) de los cuales 7 millones de niños menores de cinco años mueren por déficit deficiencias de Fe, Zn, vitamina A y otros (Raigond et al., 2020).

Dentro de estas deficiencias, para el zinc como micronutriente indispensable, según la Organización Mundial de Salud (OMS), cerca de 800,000 personas mueren anualmente debido a la deficiencia de zinc y 450 mil niños menores de 5 años tienen riesgo de morir (Das y Green, 2016). En el Perú, 43.2% de niños menores de tres años fueron afectados por una inadecuada ingesta de zinc según los datos del Centro Nacional de Alimentación

y Nutrición (CENAN) (Tarqui et al., 2017). Sin embargo, aún existen pocos reportes actuales sobre esta deficiencia en la dieta diaria en el Perú.

En consecuencia, ante los problemas de desnutrición reportados con anterioridad, la Organización Mundial de la Salud (OMS), el Grupo Consultivo sobre Investigaciones Agrícolas Internacionales (CGIAR), el programa de biofortificación de HarvestPlus y el Centro Internacional de la Papa (CIP) han iniciado esfuerzos para desarrollar alternativas de solución ante el hambre oculta en cultivos de alimentación básica como arroz, trigo, maíz, frijol, mandioca, frijol caupí, jitomate y papa mediante la biofortificación (Kromann et al., 2017; HarvestPlus y Center DDGs Research, 2018 ;Estrada et al., 2018; Ramirez et al., 2018; Santis et al., 2019; Raigond et al., 2020).

2.2. Importancia del zinc como micronutriente indispensable en la nutrición humana.

Según FAO et al. (2022) los micronutrientes se describen como vitaminas y minerales requeridos en cantidades mínimas y específicas. Significan alimentos esenciales para el bienestar y la salud, los cuales deben suministrarse en cantidad suficiente y diferente para el desarrollo, función y crecimiento adecuado.

El zinc es un micronutriente esencial en los humanos. Un adulto contiene de 2 a 3 g de zinc. Este está presente en todas las partes del cuerpo, órganos, tejidos, huesos, fluidos y es vital para más de 300 enzimas en el cuerpo humano (Das y Green, 2016). Cumple un papel importante en funciones celulares, es regulado por 24 proteínas transportadoras, es un activador de hormonas promotoras del crecimiento e influye en la altura, desarrollo óseo, sistema inmunológico, fertilidad, gusto, olfato, apetito, piel, cabello, uñas y visión (Hagh et al., 2016a; Zaman et al., 2017; Cadena, 2018).

La sugerencia de las revisiones gestionadas por el Grupo Consultivo Internacional de Nutrición con Zinc (International Zinc Nutrition Consultative Group-IZiNCG), revelan a partir de las pérdidas endógenas de zinc (mg/día) que los hombres adultos requieren 2.69 mg día⁻¹; para mujeres adultas el requerimiento fisiológico diario es de 1.86 mg de Zn; en situación de embarazo, se propone un adicional de 0.7 mg día⁻¹, mientras que en etapa de lactancia se requiere de 1 mg día⁻¹, aun así, se requiere agregar los requisitos fisiológicos habituales específicos de la edad. En niños menores de 5 años, en promedio, el

requerimiento diario fisiológico es de 0.73 mg dia^{-1} de Zn (IZiNCG, 2004).

La deficiencia de zinc es la quinta causa principal de muerte y enfermedad en el mundo en desarrollo. Se estima que alrededor de un tercio de la población mundial sufre de deficiencia de zinc (Das y Green, 2016). Esta deficiencia se asocia con problemas de aprendizaje y crecimiento a pesar de la mínima necesidad requerida (Estrada et al., 2018). El zinc juega un rol crítico para reducir tasas de mortandad en enfermedades críticas como neumonía, malaria, diarrea, retraso en el crecimiento mental, enanismo, deterioro de la función cognitiva, problemas de comportamiento, deterioro de la memoria y atrofia neuronal, sistema inmunitario débil, riesgo de morbilidad, infecciones en vías respiratorias y complicaciones perinatales. Estos síntomas involucran comprender la interacción del zinc como micronutriente en la alimentación humana especialmente en niños y menores (Prentice et al., 2008; Bhutta et al., 2013; Bailey et al., 2015; Das y Green, 2016).

En contraste, trabajos demuestran que la ingesta de zinc disminuyo el riesgo de bajo peso en infantes, lo que concluye que la mayor ingesta de zinc se asocia con un menor riesgo de malnutrición, especialmente, en zonas donde existe una deficiencia de micronutrientes marcada, asociada al retraso cognitivo, poca ganancia de peso, infección respiratoria y otros (Jiménez et al., 2013; Monroy et al., 2017; Hoke y McCabe, 2022). La Figura 3, muestra la distribución global de deficiencia de Zn; esta deficiencia es marcada en el Sur, Medio Oriente de Asia, África y países de Latinoamérica; para el Perú, la deficiencia es moderada.

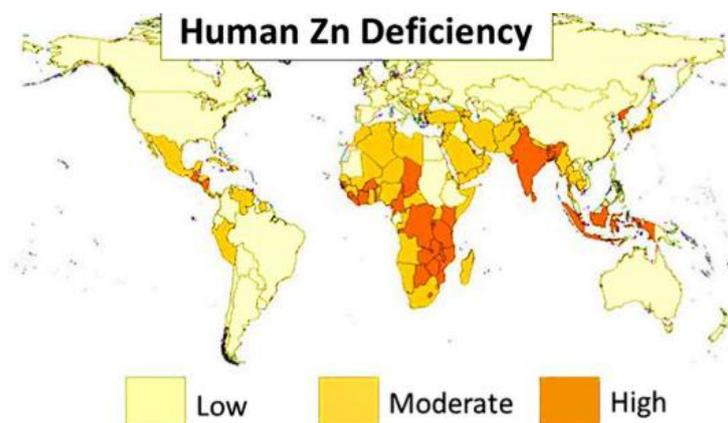


Figura 3: Distribución global de la deficiencia de Zn en humanos.

Fuente: Cakmak et al (2017).

2.3. Dinámica de micronutrientes suelo-planta.

En el desarrollo y crecimiento de las plantas, los micronutrientes juegan un rol importante a través del metabolismo celular y la síntesis de proteínas. Estos elementos actúan como cofactores de diversas enzimas en moléculas orgánicas como carbohidratos, ácidos nucleicos, proteínas y lípidos (Barker y Pilbeam, 2015.; Jalal et al., 2020). Participan en las reacciones redox, biosíntesis de la clorofila, funciones de la membrana citoplasmática y otros. Los micronutrientes como el Fe, Mn, B, Zn, Cu, Mo, Ni y Cl son fundamentales para la protección contra condiciones ambientales extremas, mantener el potencial hídrico estable, así como permitir la resistencia contra patógenos, a pesar de su requerimiento en cantidades menores (Huber et al., 2011). Las concentraciones adecuadas de micronutrientes en las hojas están en el rango de mg g⁻¹ peso seco Cl (100-6000), B (5-100), Fe (50-150), Mn (10-20), Cu (1-5), Zn (15-30), Ni (- 0.1), y Mo (0.1-1.0) (Kirkby, 2011). Sin embargo, su baja absorción no permite las relaciones metabólicas deseables, por consiguiente, no muestran su máximo potencial en la producción (Nakandalage y Seneweera, 2018; Dhaliwal et al., 2019).

Las bajas concentraciones se reflejan en su función como constituyentes de los grupos protéticos en las metaloproteínas, lo cual permite catalizar procesos redox (para Fe, Mn, Cu, Mo principalmente), para Fe y Zn, estos forman complejos enzimáticos mientras que algunos como el Mn, Cu y Zn están presentes en las isoenzimas superóxido dismutasa (SD) que actúan para eliminar radicales de oxígeno tóxicos protegiendo a las membranas, proteínas, ADN, clorofila (Kyrkby y Römheld, 2007).

Broadley et al. (2011) sostienen que los micronutrientes poseen funciones como: el cobre (Cu) para la actividad de peroxidasas y catalasas, el hierro (Fe) para la fotosíntesis, respiración y síntesis de ADN, el manganeso (Mn) para la síntesis de clorofila, el molibdeno (Mo) para la síntesis de la enzima reductasa del nitrato y el Zn para la síntesis del triptófano y lípidos.

Agrawal et al (2016) fundamentan que la abundancia de los micronutrientes en los suelos sigue la siguiente secuencia Fe>Mn>Zn>Cu. Según Wei et al (2006) y Zhang et al. (2012), las concentraciones totales bajas de micronutrientes son gobernados por varios factores, tales como la materia orgánica (MO) del suelo la cual influye directamente, mientras que el P

disponible, pH, CaCO_3 influye a través de su interacción con la MO en la disponibilidad de micronutrientes. Agrawal et al. (2016) mencionan que el material parental, procesos geoquímicos y pedogénicos determinan los niveles totales de micronutrientes en suelos, así como las superficies de adsorción y condiciones fisicoquímicas-biológicas en la rizosfera. Dhaliwal et al. (2019) sostienen la importancia de la interacción suelo-planta/suelo-microbiota y genotipo de planta para la disponibilidad de los micronutrientes.

Dentro de las interacciones abióticas, la humedad y temperatura de suelo afectan la disponibilidad de micronutrientes. Una saturación de agua en el suelo afecta la solubilidad, ya que conduce a condiciones reductoras y anaeróbicas. Para el caso del Fe, según Amelung et al. (2016) en los suelos el contenido de Fe oscila entre 0.2 a 5% siendo complejos extremadamente insolubles que afectan su disponibilidad. Están presentes como hierro férrico Fe^{+3} o hierro ferroso Fe^{+2} , siendo la forma férrica la predominante en suelos aireados. Esto significa que en plantas como papa deben de gastar energía en cambiar el estado redox a Fe^{+2} , ya que solo las plantas lo absorberán en ese estado, siendo otros mecanismos los implicados en mejorar estas deficiencias. Mientras que, para el Zn, resulta más práctico, en cuanto la concentración de Zn en la solución suelo aumentará a un bajo pH y disminuirá en suelos alcalinos, cuyos mecanismos se describirán posteriormente.

2.4. Dinámica del Zn: Suelo, planta e interacción suelo-planta

2.4.1. Zinc en el suelo

Alloway (2009) menciona que la concentración media total de Zn en suelos cultivados se aproxima a los 65 mg kg^{-1} . Para suelos alcalinos, la disponibilidad de P, Zn, Fe, Mn, Cu y B es muy baja. En la solución del suelo, las concentraciones son extremadamente bajas para Zn, Cu, Mo, Mn (cada uno $<1 \mu\text{M}$) y Fe ($<0,1 \mu\text{M}$) (White, 2011a). Alloway (2008) encontró en 68 muestras de suelo analizadas para el Perú, niveles bastante bajos de zinc en suelos, las cuales fueron divididas en cinco zonas que indicaron el porcentaje del producto de suelo (Zn-DTPA) por concentración de Zn en planta, llamados productos de concentración. Se encontró un 87%, 4% y 9% para las zonas III (El 80% medio de los productos de concentración), IV (90-95% superior de los productos de concentración) y V (95-100% superior de los productos de concentración) respectivamente, de las cuales se indica que las zonas IV y V representarían concentraciones disponibles altas, mientras que la zona III mayoritaria, probablemente condiciones deficientes poco severas, pero posiblemente

ocultas. A pesar de no encontrar valores de zinc bajos correspondientes a las zonas más bajas (I y II) sobre los productos de concentración, se muestran contenidos bajos de Zn para suelos y plantas, indicando escasez de zinc (Sillanpää, 1982). Alloway (2008) resalta que la deficiencia de Zinc en los suelos es generalizada. En la Figura 4, se estima alrededor de un tercio de los suelos cultivados tienen bajo contenido de Zn disponible, lo cual da como resultado un cultivo deteriorado y baja calidad nutricional en los granos (Cakmak, 2008).

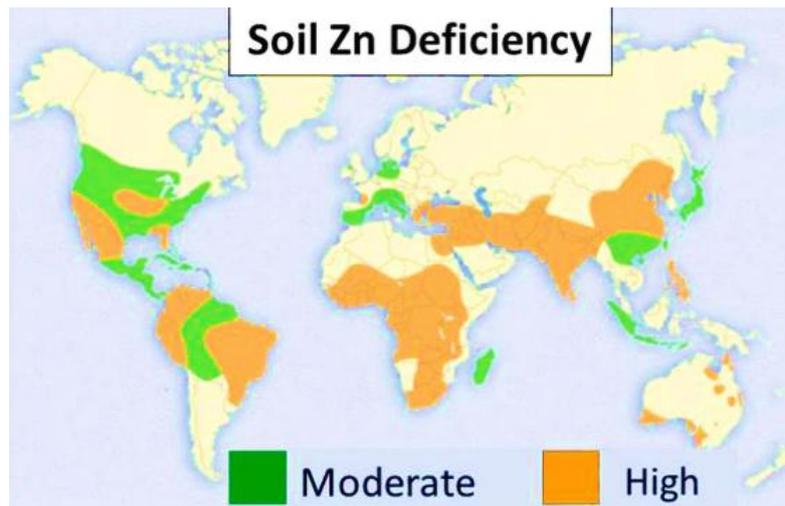


Figura 4: Distribución global de la deficiencia de zinc en los suelos.

Fuente: Cakmak et al. (2017).

Autores coinciden que el contenido de Zn en los suelos oscila en promedio entre 10 a 100 mg kg^{-1} de suelo (Mertens y Smolders, 2013; Amelung et al., 2016; Nakandalage y Seneweera, 2018). Mientras que en la solución suelo en la Figura 5, se muestra la concentración de zinc cerca de 10^{-4} M (6.5 mg kg^{-1}) a pH 5.0 (punto a) y 10^{-10} M (0.007 mg kg^{-1}) a pH 8.0 (punto b). El contenido total de zinc en los suelos se puede distribuir en tres principales fracciones o fuentes: (1) El zinc soluble presente en la solución suelo, presentado como catión divalente Zn^{+2} y como ion monovalente $\text{Zn}(\text{OH})^{+}$ (Alloway, 2008) y fracciones orgánicas solubles; (2) el zinc intercambiable encontrado en el complejo de cambio o fracción coloidal (Asociado con las partículas de arcilla, hidróxidos de Fe y Al, compuestos húmicos); (3) complejos de zinc insolubles en fase sólida (Dhaliwal et al., 2019). Alloway (2008) menciona que la distribución del zinc se rige por las constantes de equilibrio de reacciones de: (1) precipitación y disolución, (2) complejación y descomplejación, (3) adsorción y desorción, en las que interviene el Zn.

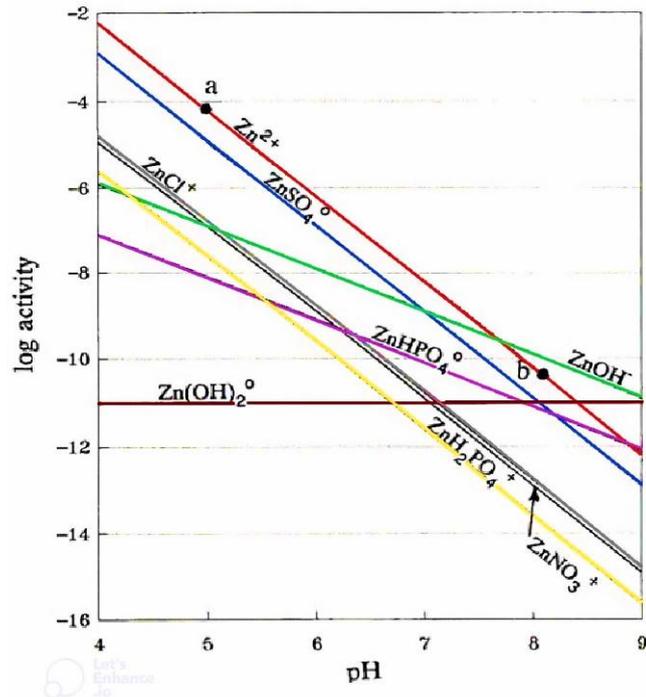


Figura 5: Especies de Zn solubles en equilibrio con el Zn del suelo, cuando Cl⁻, SO₄⁻², NO₃⁻¹ están a una concentración de 10⁻³ M y H₂PO₄⁻¹ está a 10⁻⁵M.

Fuente: Adaptado de Lindsay (1991).

Dentro de los factores asociados a la deficiencia de zinc en los suelos se encuentran: el material parental de los suelos (rocas y minerales originarios) y el contenido de zinc en ellos, el pH del suelo, la materia orgánica, la textura del suelo, la fertilización fosfatada, la saturación de agua en los suelos, temperatura de suelo y la interacción del Zn con otros nutrientes (Hafeez, 2013). La distribución de Zn en el suelo es determinada por un factor dominante conocido como pH. La movilidad del Zn se encuentra reducida a un nivel mayor a pH= 7 (Loué, 1988). El zinc es absorbido como catión divalente; a un pH elevado se toma como un catión monovalente ZnOH (Broadley et al., 2011). A un aumento de pH en los suelos, la solubilidad de Zn disminuye debido a su mayor capacidad de adsorción en su forma dominante Zn (OH)₂, posible hidrolización del zinc, materia orgánica y minerales arcillosos, además inhibe la absorción por competencia catiónica con Fe⁺², Cu⁺² y Mn⁺. Suelos encañados, son cada vez propensos a la deficiencia de zinc comparado con suelos ligeramente ácidos y neutros (Alloway, 2008). Ghasemi-Fasaei y Ronaghi (2008); Dhaliwal et al., 2019, sostienen que en condiciones de suelo alcalinos/ calcáreos, se observó la absorción de micronutrientes en forma de complejos orgánicos solubles. Akhtar et al. (2019) describe las interacciones de P y Zn como antagónicas en las plantas, reporta que un alto

contenido de fosfatos reduce la absorción de Zn, principalmente en suelos calcáreos y alcalinos que poseen un pH alto y materia orgánica baja.

Sadeghzadeh y Rengel (2011) sustentan que el Zn se presenta en la solución del suelo como complejo orgánico y iones tales como: $Zn(OH)^+$ ($pH > 6,5$) y Zn^{2+} a pH ($pH < 5$). A un pH elevado, el Zn puede precipitar en sus formas insolubles como ferrita de Zn ($ZnFe_2O_4$) y/o silicatos de Zn ($ZnSiO_4$), los cuales reducirán el Zn^{2+} en suelos. Por encima de un $pH = 7.7$, el $Zn(OH)^+$ es la especie más abundante, el Zn también se puede presentar como sulfato de Zn y fosfato de Zn. Asimismo, las interacciones con nutrientes respecto al Zn describen que la fertilización con N da como resultado un aumento en la disponibilidad del Zn en el suelo (Dhaliwal et al., 2019), mientras que una alta disponibilidad de P induce la deficiencia de Zn. Dentro de sus efectos antagónicos, el zinc interactúa negativamente con tres nutrientes secundarios: S, Ca y Mg, dentro de los micronutrientes, Fe, Mn, Cu y Mo (Das y Green, 2016). En la Figura 6, Mertens y Smolders (2013) señalan las relaciones antagónicas y sinérgicas de Zn respecto a otros elementos.

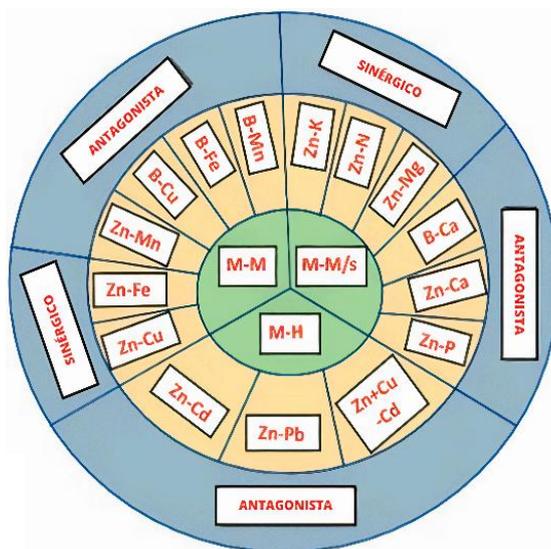


Figura 6: Interacción de nutrientes-Zn: Micronutrientes vs Macronutrientes (M-M), Micronutrientes vs Minerales secundarios (M-M/s) y Micronutrientes vs metales pesados (M-H).

Fuente: Mertens y Smolders (2013).

2.4.2. Zinc en planta

El zinc en los cultivos se relaciona con características morfológicas y fisiológicas en las

plantas, además de desempeñar diversas funciones estructurales y reguladoras junto a un relevante número de proteínas, cuya función es conocida en la transcripción (Figueredo et al., 2012; Sadeghzadeh, 2013; Kręzel y Maret, 2016).

En las plantas, el zinc forma complejos ligandos de Zn^{+2} que permite desempeñar su función catalítica y estructural (Palmgren et al., 2008; Pandey, 2015). Dada sus funciones, el zinc se involucra en el metabolismo de los carbohidratos, la actividad de la anhidrasa carbónica (CA), contenido de la clorofila, estructura de los cloroplastos, metabolismo de las proteínas, funcionamiento del material genético (ADN y ARN), regulación de la síntesis de auxinas, formación de polen entre otros (Hafeez, 2013; Sadeghzadeh, 2013; Pandey, 2015). Fisiológicamente, influye en la integridad de las membranas y la desintoxicación de especies reactivas de oxígeno ROS.

Cakmak y Marschner (1988) mencionan que plantas deficientes de zinc son susceptibles a enfermedades de raíces debido a la fuga de compuestos orgánicos dañados por el estrés oxidativo. Dada su importancia (Cakmak, 2008) reporta que el Zn protege las plantas del ataque de patógenos, como la infestación de nematodos por la raíz, patógenos que pudren la raíz, posiblemente al reducir la exudación de compuestos orgánicos en la rizosfera. En el trabajo de Grewal et al. (1996) se reporta que la infección en los cultivares de trigo disminuyeron significativamente con el uso de fertilizantes de Zn. La incidencia y severidad de la enfermedad del “tizón temprano” causada por *Alternaria grandis* E.G. Simmons fue menor con la aplicación al suelo de Zn y B más Zn en *Solanum tuberosum* L. cv. Ágata por lo cual el Zn juega un rol crítico en la tolerancia de la enfermedad (Machado et al., 2018). La aplicación foliar de $ZnSO_4$, fue capaz de controlar las concentraciones de virus de la papa (PVY y PLRV) incrementando la resistencia a enfermedades virales al incrementar el nivel de componentes fenólicos, o cual permite el desarrollo de mecanismos de defensa contra virus (Ibrahim et al., 2016).

El zinc junto a otros micronutrientes se presenta en una concentración inferior a los 0.5 g por kg de materia seca considerándose esto indispensable para la nutrición vegetal (Dhaliwal et al., 2019). Por otro lado, Kyrkby y Römheld (2007), Hafeez (2013) y Amezcua y Lara, (2017) indican que la concentración adecuada de Zinc en plantas debe oscilar entre los 15 a 30 $mg\ kg^{-1}$ en base seca.

2.4.3. Interacción del Zinc: suelo-planta

Según Sadeghzadeh y Rengel (2011), en la interacción suelo-planta, las raíces tomarán el Zn^{+2} de la solución suelo y seguirán un movimiento lineal lento por difusión hacia la membrana plasmática a través de proteínas de transporte de las familias premedidas de zinc y hierro (ZIP), las cuales son responsables de su absorción desde la rizosfera (Guerinot, 2000). Por su parte, a través del gradiente eléctrico, el citoplasma cargado negativamente, atraerá el Zn^{+2} hacia las células. En condiciones de bajo contenido de zinc en el suelo, el transporte del zinc esta mediado por una baja velocidad y alta afinidad ($k_m = 0.6 - 2 \text{ nM}$). Finalmente, el Zn^{+2} es transportado hacia el xilema sea vía apoplástica (entre espacios celulares) o simplasto (células de la raíz unidas por plasmodesmos). En la Figura 7, se observa la carga de nutrientes en el xilema como factor determinante en la transferencia desde las raíces hacia el tallo.

Akhtar et al. (2019) describen los estudios cinéticos, señala que una primera fase inicial, desde su acumulación en las raíces es rápida dada la disponibilidad del elemento y su unión a la pared celular en las raíces, posteriormente, la traslocación es lenta. Hacia el xilema dentro de la planta, el Zn se une con ácidos orgánicos o existe de forma divalente libre, por tanto, en la savia del floema, existe una concentración de Zn alta. El zinc no participa en reacciones redox en la planta.

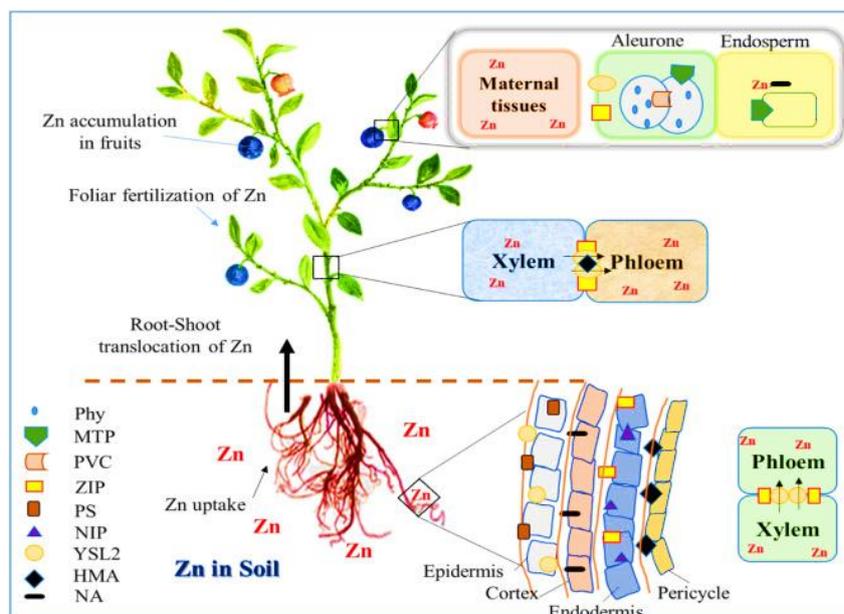


Figura 7: Transporte del Zn desde la raíz hasta el brote en las plantas.

Fuente: Natasha et al. (2022).

2.4.4. Interacción del zinc: planta-sumideros de crecimiento

Si bien la fertilización edáfica (vía suelo) permite la interacción suelo-planta, cuando se suministran nutrientes a las raíces deficientes en el nutriente, puede acumularse en las vacuolas de las células de la raíz, provocando un retraso en la traslocación desde raíces hacia los brotes (White, 2011a). Por tanto, una de las justificaciones del suministro de nutrientes por aplicación foliar (aplicado directamente en las hojas o llamada vía foliar) visualiza mejores respuestas que las suministradas a través del tratamiento hacia raíces, sin embargo, es un complejo de eficacia variable (Eichert y Fernández, 2011).

Aunque algunos autores argumentan que la fertilización foliar complementa la aplicación tradicional de fertilizante al suelo y permite que los cultivos alcancen niveles de producción (Murillo et al., 2013). La fertilización foliar tiene independencia de la actividad radicular y la disponibilidad de agua en el suelo. Esta absorción foliar de nutrientes se visualiza en tres etapas: (1) La primera etapa es la retención del producto en la hoja, favorecida por las condiciones de alta humedad relativa por la permeabilidad en la cutícula y la temperatura media (20°C) que hace que las gotas se mantengan en contacto con la superficie foliar; (2) transporte de nutriente a las células hacia las células epidermales, la absorción vía foliar ocurre debido a una gradiente entre la concentración de la solución aplicada en la superficie de la hoja y la del interior de la epidermis. En este estado, las moléculas de agua interactúan unas a otras con grupos carbonados ionizables formando cavidades que permiten transportar los nutrientes; (3) el nutriente se transporta hacia otras capas en las hojas y atraviesa espacios intercelulares (apoplasto) o diferentes tejidos (simplasto) hasta llegar al tejido vascular, donde son translocados a través del floema o transportados en el xilema con el movimiento de agua para finalmente destinar su movilidad hacia el tejido destino llamado más adelante como sumidero de crecimiento.

La importación de minerales por medio del xilema es dado por la transpiración, especialmente en órganos expuestos a la superficie que en tubérculos. Marschner, (1995) mencionó que cuando los minerales se liberan en los vasos xilemáticos, se transportan junto al agua como iones libres o complejos orgánicos de bajo peso molecular. Para el Zn y Fe, su traslocación en el xilema aumenta ya que se presentan predominantemente como complejos moleculares. Su transporte en el xilema esta medido por su unión a ácidos orgánicos o se presenta como catión divalente libre (White, 2011b).

En el xilema, la tasa de translocación aumenta cuando los cationes se acomplejan; para el Zinc, la familia ZIP permite a entrada del Zn al floema (White, 2011b). En la savia del xilema, la concentración de Fe, Zn, Mn y Cu, normalmente están en los rangos de 1-40, 1-148, 4-80, y 0.2-9 μM , respectivamente, sin embargo, pueden alcanzar mayores concentraciones dependiendo del aporte y suministro de los elementos (White, 2011b).

Para el floema, el transporte es importante y conduce a diferencias específicas en la partición de minerales hacia los órganos, por un lado, exporta minerales desde los brotes y por otro, importa minerales hacia el tubérculo. Sin embargo, esta partición de minerales es afectada por el diferente suministro de nutrientes, el medio ambiente, la variación genotípica, así como la variación de las densidades de micronutrientes (Fe y Zn) distribuidas hacia el tejido (Reichert, 2009). En la savia floemática, sus concentraciones son elevadas y su movilidad va en aumento conforme los complejos de Zn^{+2} con solutos orgánicos de bajo peso molecular (Akhtar et al., 2019) con componentes de azúcar o metabolitos orgánicos en la savia floemática producto de la fotosíntesis (malato de Zn, por ejemplo) (Gupta et al., 2016). Las concentraciones de Fe, Zn, Mn y Cu suelen presentarse en el rango de 40-168, 14-245, 4-76, y 8-43 μM , respectivamente (White, 2011b). Esto explica que la movilidad del Zn es mayor en el floema que en el xilema, debido a su concentración junto a solutos quelantes (Gupta et al., 2016).

Para la descarga floemática en los órganos de almacenamiento como los tubérculos, los solutos se transportan a través de pasos apoplásticos, los nutrientes se removilizan en el tejido y se trasladan en el floema y/o xilema a las raíces y brotes en desarrollo desde donde se trasladan hacia los sumideros de crecimiento, esta movilización depende de varios factores: (1) el requerimiento de los órganos de almacenamiento para tales nutrientes, (2) el estado nutricional de la parte vegetativa, (3) la relación entre el tamaño y número de los sumideros como los frutos, semillas o tubérculos, (4) la tasa de absorción de nutrientes en la etapa reproductiva (White, 2011b). Para el Fe, Zn, Cu, Mo y Bo, la movilidad en el floema es intermedio y su deficiencia se muestra inicialmente en hojas jóvenes. La intensidad de movilización de micronutrientes estará por lo tanto relacionada con el grado de senescencia de las hojas (Eichert y Fernández, 2011). Cakmak (2008) y (2010) sugiere que las aplicaciones inmediatas antes de la senescencia foliar en cereales mejoran la concentración de Zn en los granos. En tubérculos de papa, White et al. (2017) mencionan que la biofortificación con Zn podría estar restringido por la movilidad limitada de Zn en el floema.

Fernández et al. (2015) mencionan que la movilidad de un nutriente en el floema dependerá de la capacidad del elemento de entrar en él, su capacidad de moverse, y su capacidad salir del floema hacia los tejidos destino. Sobre la movilidad del Zn en el floema, este varía según la fenología del cultivo. Al aplicarse vía foliar, su grado de penetración en las hojas es de 1 a 5 %, en otras palabras, resalta su limitada movilidad en el floema. Por tanto, su eficacia es mayor en tejidos que reciben directamente la pulverización foliar.

En papa, los tubérculos son los sumideros de crecimiento dominantes tanto por carbohidratos como por minerales (Reichert, 2009). Una alta absorción de minerales se asocia particularmente en las etapas de desarrollo final de la planta. Esta transferencia directa hacia el tubérculo debe facilitar el transporte de Zn y Fe durante el llenado y aumento de volumen, porque estos micronutrientes son removilizados deficientemente de las hojas y los tallos. Este proceso de transferencia de minerales ocurre desde el xilema al floema a través de las células. Los minerales se importan a un órgano (tubérculo) a través del xilema y el floema, así como se exportan desde un órgano a través del floema (hojas) en la aplicación foliar por ejemplo (Marschner, 1995).

Kromann et al. (2017) discuten un estudio realizado por Delgado (2015) en la zona costera del Perú, con pH alto y suelo calcáreo, el cual no mostró efectos en las aplicaciones de sulfato de Zn al suelo ($11 \text{ kg Zn ha}^{-1} + 2$ aplicaciones foliares de Zn) en el rendimiento y la concentración de Zn en los tubérculos del Grupo Chilotanum. Sin embargo, mostraron mayores concentraciones de Zn en los tallos en los tratamientos edáficos, lo que indica la movilidad del Zn en el xilema, ya que translocó desde las raíces hacia los tallos. Esto se relaciona con la baja movilidad del Zn en el floema (White et al., 2012). Es necesario mencionar que luego de la aplicación requieren una movilidad adecuada del Zn en el floema, de lo contrario limitará su disponibilidad. Desde el punto de vista nutricional, en suelos con baja disponibilidad de Zn se ha encontrado que la aplicación foliar es vital, es posible que se puedan lograr concentraciones más altas sin pérdida de rendimiento (White y Broadley, 2011).

Jalal et al. (2020) revelan que la aplicación de Zn logra que la absorción de Fe aumente hasta cierto nivel. Un elevado nivel de Zn resulta en una reducción de la absorción de Fe en trigo. Esta relación antagónica se explica debido a la movilidad transitoria del Fe en el floema. El

hecho de que Fe tiene baja movilidad xilemática y capacidad de translocación en la planta de papa limita su posibilidad de biofortificación agronómica mediante fertilizante de Fe (White y Broadley, 2011).

En un estudio en suelos alcalinos de Pakistán para el cultivo de trigo, la aplicación de Zn aumentó su absorción total, mostró un pequeño aumento en la absorción del Mn, y la aplicación hasta los 8 kg ha⁻¹ de Zn incrementó la absorción de Fe; sin embargo, mayores dosis de Zn resultaron en una menor absorción de Fe (Abbas et al., 2009). En síntesis, numerosos factores alteran la acumulación de Zn y son: La especie, condiciones bióticas y abióticas, características morfológicas, cobertura de raíces en el suelo, área foliar, distribución de Zn y regulación de la concentración en hojas, tallos, frutos, así como, dependerá de las etapas de crecimiento de la planta (Gupta et al., 2016).

2.5. Deficiencia de zinc en los cultivos

Aunque en algunos casos es difícil distinguir síntomas de deficiencia en zinc en el cultivo, Sadeghzadeh y Rengel (2011), Hafeez (2013), Pandey (2015) y Amezcuca y Lara (2017) reportan distorsión en las hojas, retraso en el crecimiento, esterilidad en las espigas, afección en la capacidad de absorción de agua en las plantas, clorosis intervenal, muerte de ápices, arrosetamiento y en ocasiones graves, hojas moteadas. Esto ocasionaría un déficit en la tasa de fotosíntesis neta, la cual es entendida como fenómeno común ante la deficiencia de Zn en planta (Figura 8). En hojas, las concentraciones críticas de deficiencia se muestran por debajo de 15-20 µg Zn g⁻¹ peso seco (Broadley et al., 2011).

Dado que en los cereales hay baja concentración de zinc debido que son cultivados en suelos potencialmente deficientes en el nutriente, se disminuye su concentración en el grano, generando que la mitad de la población humana sufra de la deficiencia de este nutriente (Alloway, 2008; Cakmak, 2008; Das y Green, 2016).



Figura 8: Esencialidad, deficiencia, toxicidad y tolerancia del Zn en las plantas.

Adaptado de Natasha et al. (2022).

Se entiende que el zinc en el suelo actúa por difusión, por tanto, no hay absorción conveniente que asegure una planta suficientemente nutrida (Cakmak y Kutman, 2018). Das y Green (2016) reportan la interacción antagonista con P, S, Ca y Mg, así como con otros micronutrientes como Fe, Mn, Cu y Mo. Además, se considera que quienes consumen un cultivo deficiente en zinc presentarán deficiencias directas en micronutrientes, por tanto, es indispensable complementar tácticas entre el mejoramiento vegetal y la fertilización (Das y Green, 2016; Zaman et al., 2017). De este modo llama la atención cuestionar la absorción eficiente de zinc en los cultivos. Las causas de deficiencia son descritas en la Figura 9.



Figura 9: Esquema de causas de deficiencia de Zn en cultivos.

Adaptado de Alloway (2008).

Un alto consumo de cultivos con baja disponibilidad e inhibidores de absorción debe apuntar a conocer los perfiles de metabolitos en cultivos y su diversidad genética. Cerca del 50% de cultivos cereales en el mundo son cultivados en suelos deficientes de zinc (Jalal et al., 2020).

Dada su importancia se han desarrollado estrategias para incorporar el contenido de zinc en cultivos alimenticios, una de ellas es afrontar la falta de zinc mediante la biofortificación (Zaman et al., 2017; Cambraia et al., 2019). Las variedades biofortificadas podrían contribuir potencialmente en la ingesta y absorción de hierro, zinc y micronutrientes, lo que debería ser un foco de investigación futura para mejorar los niveles de Fe y Zn en la dieta humana (Monroy-Valle et al., 2017; De Haan et al., 2019; Maciel et al., 2021).

Por otro lado, se manifiesta que la suplementación de zinc mejora los parámetros biométricos en la planta como longitud de raíz, número de raíces, entre otros (Haider et al., 2018) se reportan trabajos en remolacha donde el zinc beneficia respuestas fisiológicas con el crecimiento y producción (Vergara et al., 2019), además de trabajos en cultivos básicos donde Das y Green (2016) manifiestan la mejora de calidad en papa dada la aplicación de zinc. En efecto, Kromann et al. (2017) y White et al. (2017) reportaron incremento en la concentración de zinc en tubérculos de papa mediante la biofortificación agronómica, la cual colabora con mejoras en las dietas nutricionales en poblaciones con insuficiencia de zinc. No obstante, se requiere de mayores estudios, respecto a la acumulación de nutrientes de manera efectiva (Sharma et al., 2020).

De acuerdo con Brown (2005) la papa se ubicó entre los valores más bajos de contenido de ácidos fenólicos totales comparados con las frutas y hortalizas, lo cual permite una mayor absorción de micronutrientes. De acuerdo con la Tabla 1, la papa tiene una sensibilidad relativa media a la deficiencia de Zn. En la Figura 10, se muestran las concentraciones de Zn, mayores en cultivos de raíces y hortalizas que en semillas, frutas o tubérculos. Kromann et al. (2017) argumentan que la papa andina puede biofortificarse agronómicamente con zinc, vía foliar y suelo. Gutierrez (2018) afirma que las aplicaciones foliares con zinc incrementan el contenido de micronutrientes tanto en la pulpa como en la cáscara de papa.

Tabla 1: Sensibilidad relativa de los cultivos antes la deficiencia de Zn.

| Alta | Media | Baja |
|---------------------|-----------|-----------|
| Frijol | Cebada | Alfalfa |
| Cítricos | Algodón | Espárrago |
| Arroz | Lechuga | Zanahoria |
| Árboles frutales | Papa | Trébol |
| Uva | Soya | Pastos |
| Trigo | Tomate | Avena |
| Maíz | Remolacha | Centeno |
| Cebolla | Rábano | |

Fuente: Alloway (2008)

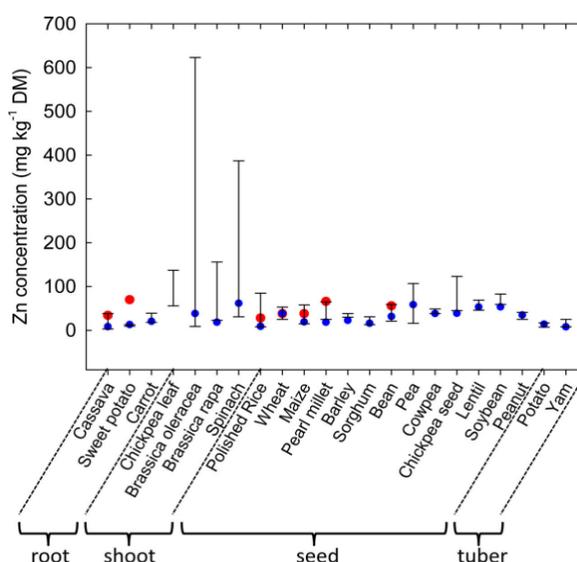


Figura 10: Variación de las concentraciones de Zn en: raíces, brotes, semillas y tubérculos comestibles.

Fuente: White y Broadley (2011).

2.6. Biofortificación

FAO et al. (2022) reportaron hacia el 2021, más de 3 mil millones de personas no accedían a una dieta saludable y menos costosa, lo cual permitió entender que mejorar el valor nutricional a través de la biofortificación sería rentable ya que dirigiría la estrategia hacia segmentos poblacionales sin radicalizar patrones de consumo, facultando la prevención de impactos negativos en la salud pública a largo plazo. Según Mkambula et al. (2022), el

consenso de Copenhague clasificó esta estrategia entre las inversiones de mayor valor para el desarrollo económico, por cada USD invertido se obtendrían hasta 17 USD de beneficios. En la actualidad, el 17% de la población mundial corre el riesgo de una ingesta inadecuada de Zn (OMS, 2021). Por tanto, es de rol crítico alimentar a una población creciente con suficientes micronutrientes como el Zn en su dieta diaria (Stangoulis y Knez, 2022).

La biofortificación es una importante herramienta o tiene un rol clave en el manejo de la nutrición, una de las más significativas técnicas para eliminar la malnutrición y proveer al cuerpo humano una fuente sostenible y duradera de nutrientes, entre vitaminas y minerales (Younas et al., 2022). Asimismo, significa mejorar la disponibilidad en dietas dominadas por cultivos básicos pobres en micronutrientes (Global, 2015). La biofortificación representa una prometedora y económica opción estratégica para incrementar los micronutrientes en partes comestibles de cultivos (Sharma, et al., 2020).

Se reportan prácticas para biofortificar con hierro, zinc y yodo, entre ellas, la biofortificación con zinc en arroz, en semillas de frijol caupí, en semillas de soja, entre otros (Zaman et al., 2017; Márquez-Quiroz et al., 2018; Dai et al., 2020; Sharma et al., 2020). Dentro de la biofortificación con zinc, en agricultura dos posibilidades han sido estudiadas: biofortificación agronómica y genética.

La biofortificación de zinc en trigo contribuye en decrecer las deficiencias de Zn (Hussain et al., 2019). Mejorar la disponibilidad de Zn en suelos y planta en el sistema de producción de arroz mediante manejo agronómico y mejoramiento genético se reportó en el trabajo de (Zaman et al., 2017). En los cereales, mediante el enfoque agronómico, mejoramiento genético y biotecnológico se puede incrementar la eficiencia en la traslocación de Zn en plantas (Zaman et al., 2017). La biofortificación genética y agronómica puede ser complementaria y mejorar el contenido de Zn y Fe en trigo, así como reducir la malnutrición por micronutrientes (Velu et al., 2014). Estudios han demostrado efectos positivos en la combinación de la biofortificación agronómica y el mejoramiento genético, siendo la forma más eficiente de minimizar las deficiencias de Zn, siendo la estrategia más efectiva (Gomez-Coronado et al., 2016; Swamy et al., 2016; Kromann et al., 2017). En la Figura 11, se aprecia una sostenible solución llamada biofortificación y sus intervenciones.

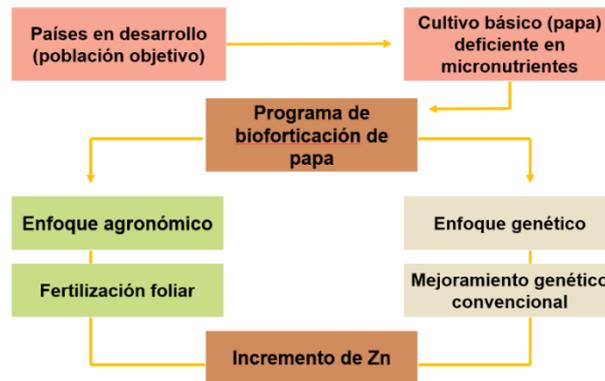


Figura 11: Criterios en la biofortificación en el cultivo de papa.

Fuente: Adaptado de Sharma et al. (2020).

Entre otros trabajos reportados en biofortificación aplicada se encuentra el cultivo de maíz biofortificado con provitamina A, enfocado en la mejora visual en niños entre 5 a 7 años en Zambia (Gannon et al., 2014); en Kenia la yuca con provitamina A en escolares (Talsma et al., 2016); en Ruanda, los frijoles biofortificados con hierro mejoraron la hemoglobina (Bouis y Saltzman, 2017); en Uganda y Mozambique, se mejoró los contenidos de provitamina A en camote de pulpa naranja, esto indico que puede mejorar la salud infantil y reducir la prevalencia de diarrea en niños menores de 5 años (Hotz et al., 2012; Jones y de Brauw, 2015). En programas escolares se posibilitó la mejora del estado nutricional en la población reduciendo la deficiencia de Fe y Zn (Beintema et al., 2018).

A pesar de los esfuerzos, debe investigarse la incorporación de diferentes cultivos biofortificados, su eficacia y su impacto como parte de un multi enfoque alimentario (Beintema et al., 2018). Debe ser accesible para personas quienes viven en lugares remotos con limitación de recursos. Hay programas de suplementación y fortificación, sin embargo, en Perú, la biofortificación no es aplicada aún fuera de ser objeto de estudio y propio de la investigación. Hoy se necesitan estudios que se centren en analizar cuantitativamente los nutrientes en la ingesta infantil y proyectos que evalúen la alimentación y la promoción complementaria para la salud, así como la necesidad de estos micronutrientes (Monroy-Valle et al., 2017; Demment et al., 2018; Mejia et al., 2019; De Haan et al., 2019; Maciel et al., 2021; Whitney et al., 2021).

Si bien a partir de la biofortificación se ha argumentado el potencial de impacto nutricional y su aceleración en los últimos años, dirigida principalmente a quienes sufren de menos recursos para acceder a una alimentación de calidad, aún se deben integrar esfuerzos específicos y sensibles a la nutrición para controlar y prevenir deficiencias micronutricionales, dada la persistencia de desafíos del sistema alimentario y la pobre medición del progreso en los programas nacionales (Osendarp et al., 2018). Un programa sostenible en biofortificación incluiría: Identificar el alimento adecuado (conocer la biodisponibilidad, aceptabilidad y costos), la población objetivo, asegurar la calidad del producto final, asegurar el consumo suficiente del alimento biofortificado (Bhutta et al., 2013). El hambre oculta sigue siendo uno de los mayores retos para la mayoría de los países en desarrollo. El zinc y hierro son considerados cruciales y la carencia de estos complica la salud humana.

2.6.1. Intervención agronómica

Una de las técnicas para direccionar y combatir el hambre oculta mejorando la concentración de micronutrientes es la biofortificación agronómica (Ramzan et al., 2020). De Valença et al. (2017) mencionan que la biofortificación agronómica requiere de la biodisponibilidad de micronutrientes en el suelo para la absorción de suelo a cultivo, traslocación de minerales en la planta, traslocación a la parte comestible desde el cultivo hacia el alimento, biodisponibilidad de nutrientes para los humanos y estado fisiológico del cuerpo humano para utilizar el nutriente y ser capaz de absorberlo. Otro punto importante es la degradación de la biodisponibilidad del mineral debido a los antioxidantes como el ácido fítico (Younas et al., 2022). Esta intervención es una de las mejores estrategias para mejorar los contenidos de Zn y Fe en los granos de manera significativa en la última etapa del crecimiento (Cakmak, 2010). No obstante, dentro de las limitaciones la biofortificación agronómica es discutida respecto a la sostenibilidad ambiental y económica comparada con la biofortificación genética (Singh et al., 2016). Aun así, resalta por su solución a corto plazo comparado con la intervención genética (Cakmak, 2008).

Se han sostenido varias investigaciones favorables a la biofortificación agronómica con zinc en el cultivo de papa, donde las estrategias son la fertilización edáfica (Gabriel et al, 2016), la aplicación foliar (White et al., 2012; Kromann et al., 2017) e impregnación de soluciones de Zn en la semilla (Vergara et al., 2019). En tanto, Cakmak (2008) sostiene que mejorar el

estado de micronutrientes del suelo utilizando fertilizantes reduciría las deficiencias del consumo de porciones comestibles en los seres humanos, a través de la fertilización. Además, la fertilización agronómica necesita ser cuidadosa y debe atender diversos factores que afectan la disponibilidad de los elementos, el momento de aplicación, las fuentes de Fe y Zn para incrementar el contenido nutricional, métodos de aplicación y la solubilidad en la aplicación (Raigond et al., 2020; Younas et al., 2022).

Cakmak (2008) menciona la aplicación de fertilizantes como sulfato ferroso, sulfato de zinc, los cuales pueden incrementar la concentración de Fe y Zn en el crecimiento de los granos. Entre los fertilizantes más usados se han identificado el sulfato de zinc heptahidratado $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$, comúnmente usado y reportado como el más efectivo comparado con otras formas de Zn (Cakmak, 2008; Velu, 2014; Natasha et al., 2022). Dentro de los métodos de aplicación, deben ser directamente al suelo (edáfica) o a las hojas de las plantas (foliar) (De Valença et al., 2017). Las ventajas de la aplicación foliar de Zn sobre la del suelo han sido reportadas, siendo más eficientes en aumentar la concentración de zinc en el grano de trigo comparado con las aplicaciones edáficas (Hussain et al., 2012; Velu et al., 2014; Zao et al., 2020).

La aplicación foliar es considerada la más efectiva y económica (Cakmak, 2010). Trinidad y Aguilar (1999) mencionan que el éxito de la fertilización foliar está dado por los factores de la planta, el ambiente, y la formulación foliar. Se indica que tejidos jóvenes son quienes son propensos a la absorción de nutrientes vía aspersión foliar dada su déficit en su desarrollo y su necesidad de adquirirlos. Vía foliar, el zinc recorre su camino desde los estomas al sistema vascular en la pulverización foliar y son utilizadas varias fuentes de Zn como sulfato: $ZnSO_4$, nitrato: $Zn(NO_3)_2$ y quelato: Zn-EDTA, donde $ZnSO_4$ ha demostrado ser una técnica eficaz para incrementar la deficiencia de Zn (Stomph, 2011). La aplicación foliar de Zn mantiene la fertilidad de los suelos, mejora el rendimiento de los cultivos y previene los tubérculos de papa de la podredumbre (Ierna et al., 2020).

Hussain et al. (2022) reportan que aplicaciones foliares de Zn de 10 g/L en papa en suelos alcalinos y calcáreos mostraron un impacto significativo entre los cultivares de papa. En un estudio realizado por Ierna et al. (2020) en el sur de Siracusa-Italia, cuyo suelo fue de $pH=7.5$, $C.E=1.07 \text{ mS cm}^{-1}$, P disponible (12.23 mg kg^{-1}), bajo nivel de $CaCO_3$ (3.3%) y Zn (2.7 mg kg^{-1}), se analizó la influencia de la fertilización foliar de micronutrientes que

contenía B (0.9%), Cu (0.6%), Fe (13.6%), Mn (0.2%) y Zn (2.2%), y fue aplicado en 3 oportunidades, en papas y a los 0 y 12 días de almacenamiento a $4 \pm 1^\circ\text{C}$ del cultivar holandés Bellini, se encontró luego del análisis de micronutrientes un incremento de más del 26% de Zn y en Fe en un 68%, respecto al tratamiento sin aplicación combinada de micronutrientes para las papas al término de la cosecha (Tabla 2). Jalal et al. (2020) encontraron que la aplicación conjunta de solo Zn y Fe a través de la pulverización foliar mejoró la calidad de los granos de trigo, lo cual fue beneficioso bajo condiciones de suelos calcáreos, con baja disponibilidad de los mismos elementos, donde además esta combinación mejoró los componentes de rendimiento del cereal.

Tabla 2: La composición mineral (mg kg^{-1}) de la papa a los 0 días después de cosecha mostró un efecto con la fertilización foliar con micronutrientes.

| Microfertilización | Fe | Zn | Mn | Cu | Mo |
|--------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|--------------------|
| Micro- | 12.8 ± 1.0 b | 5.2 ± 0.1 b | 2.2 ± 0.06 b | 2.0 ± 0.04 a | 0.15 ± 0.001 b |
| Micro+ | 21.6 ± 2.0 a | 6.6 ± 0.2 a | 2.6 ± 0.08 a | 1.0 ± 0.02 b | 0.20 ± 0.001 a |

Letras diferentes en el mismo parámetro expresan diferencias significativas.

Fuente: Ierna et al. (2020)

En otras investigaciones se reportan respuestas positivas para las aplicaciones tanto al suelo como foliar para incrementar el contenido del nutriente (Palmgren et al., 2008; Cakmak, 2010; Zhang et al., 2012; Velu et al., 2014; Zaman et al., 2017). La Figura 12 reporta una investigación en cereales con el mismo comportamiento. Zhang et al. (2012) mostraron resultados comparativamente superiores con aplicación foliar de Zn respecto al suelo en cuatro localidades en China para el cultivo de trigo, utilizando $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ al 0,4 %, el cual tuvo un mejor efecto sobre el contenido de Zn en el grano, aumentando hasta un 58% de incremento de Zn en el grano entero. Otros autores concuerdan que las aplicaciones foliares parecen ser más eficientes que la fertilización al suelo para la biofortificación agronómica (Cakmak, 2010; White et al., 2012; Cakmak y Kutman, 2018; Sun et al., 2018).

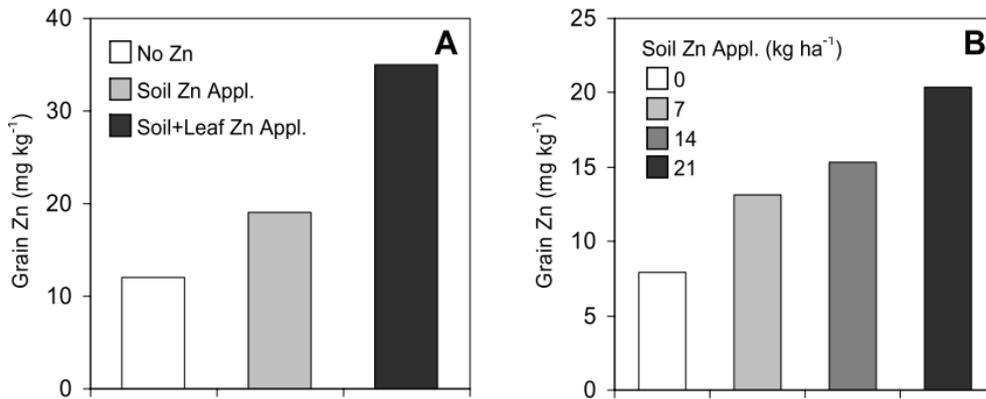


Figura 12: Plantas cultivadas en suelo calcáreo deficiente en Zn.

Fuente: Cakmak (2010). Nota: En (A) se describe las concentraciones de Zn en el grano sometido a la aplicación foliar y en (B) al suelo con la aplicación de ZnSO₄. Un aumento en la concentración de Zn en los granos fue encontrado con la aplicación combinada (foliar y al suelo).

Según Hagh et al. (2016) las aplicaciones foliares incrementan la tasa de absorción con mayor rapidez. Se reportan efectos positivos con fertilizantes foliares sobre el contenido de Fe y Zn y betacaroteno en raíces de camote y en la morfología y concentración de zinc en granos de frijol mungo (Haider et al., 2018; Sun et al., 2018). En trigo, Zou et al. (2019) probaron efectos de la aplicación foliar de I, Zn y solución coctel con I, Zn, Se y Fe, sobre el rendimiento de grano de trigo y concentración de micronutrientes, en 6 países diferentes. La concentración de Zn en el grano aumentó de 28.6 mg kg⁻¹ a 46 mg kg⁻¹ con aplicación foliar de Zn de 0.5% ZnSO₄·7H₂O peso/volumen y reportó un aumento a 47.1 mg kg⁻¹ con la solución coctel en la misma concentración para el caso del Zn.

En papa White et al. (2012), trabajaron en un experimento en campo con una colección de 23 genotipos tetraploides de papa (Grupo Tuberosum) en Dundee-UKel fertilizante foliar utilizado fue sulfato de zinc heptahidratado y óxido de Zn, se encontró que las concentraciones de Zn en el tubérculo también incrementaron con el incremento de fertilización de Zn, aunque fueron menores que las encontradas en los brotes, esto es explicado por la carga restringida de Zn al floema desde los brotes, que imposibilitan el incremento de Zn en los tubérculos. A pesar de lo mencionado, la concentración de Zn en tubérculos fue buena en quienes recibieron pequeñas aplicaciones múltiples que una sola aplicación alta. Sin embargo, el uso de diferentes formas de Zn, posibilitaron el límite en la traslocación de Zn en el floema de brotes a tubérculos. Por otro lado, una relación entre la concentración de Zn y la aplicación foliar de Zn siguió una curva de saturación que alcanzó

el máximo valor de 30 mg kg⁻¹ BS en el cultivar “Maris Piper” a una dosis de 1.08 g de Zn mientras que dos aplicaciones de 0.8 g Zn plot⁻¹ cada una, representarían un incremento de 64% respecto al control sin aplicación de fertilizante (Figura 13).

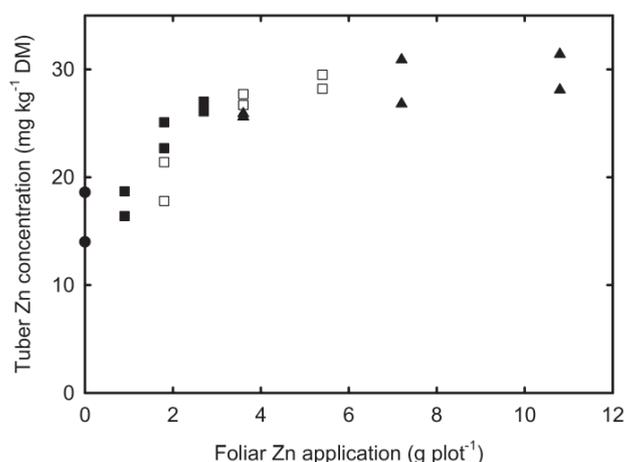


Figura 13: Efecto de la concentración de Zn en los tubérculos del cultivar “Maris Peper” sobre la fertilización foliar.

Fuente: White et al. (2012). Nota: El tratamiento sin aplicación foliar de Zn (círculos rellenos) y 9 tratamientos foliares de Zn basados en 1.8 g Zn parcela⁻¹ como DC los cuales fueron: 0.9 g Zn parcela⁻¹ (cuadrado relleno), 1.8 g Zn parcela⁻¹ (cuadrado vacío), 3.6 g Zn parcela⁻¹ (triángulo relleno), aplicadas hasta 3 veces en el crecimiento para 2 repeticiones por parcela, donde cada punto representa las 3 aplicaciones en el tiempo.

En el trabajo de Gutierrez (2018) en campo, en un suelo de pH = 7.82 y contenido moderado de CaCO₃ (3%), se examinaron tres niveles de Zn al suelo (0, 20 y 40 kg Zn ha⁻¹) y dos niveles de Zn foliar (0 y 5 kg Zn ha⁻¹) utilizando sulfato de zinc heptahidratado en el cultivo de papas de la variedad UNICA. Su estudio encontró que los tratamientos fertilizados vía foliar lograron un incremento en el contenido de Zn en pulpa (Rango: 17.6-26 mg kg⁻¹) y en cáscara (Rango: 41.1-51.4 mg kg⁻¹), lo cual indicó un incremento de 47.7% y 25.1% respectivamente en pulpa y cáscara en la dosis más alta (Tabla 3). Estos resultados sugieren el uso de la aplicación foliar como método de biofortificación agronómica para tubérculos de papa, dado que la fertilización edáfica no tuvo efectos significativos en la concentración de Zn en los tubérculos de papa.

Tabla 3: Concentración de Zn en hojas (foliar) y tubérculos (cáscara y pulpa).

| Tratamientos | | Hojas | Cáscara | Pulpa |
|-------------------|--------------------------------------|-------|---------|-------|
| Aplicación foliar | Dosis de zinc (kg ha ⁻¹) | | | |
| Sin | 0 | 71.7 | 41.2 | 19.4 |
| | 20 | 67.5 | 41.1 | 19.0 |
| | 40 | 69.8 | 41.8 | 17.6 |
| Con | 0 | 174.7 | 47.4 | 24.6 |
| | 20 | 164.4 | 51.4 | 25.0 |
| | 40 | 158.9 | 49.2 | 26.0 |
| | CV (%) | 9.3 | 11.9 | 9.7 |
| | AP | *** | ** | ** |
| | DZ | NS | NS | NS |
| | AP x DZ | NS | NS | NS |

AP: aplicación foliar, DZ: dosis de Zn

Fuente: Gutierrez (2018)

Aunque la biofortificación agronómica con fertilizantes edáficos y foliares aumenta las concentraciones de Zn en los tubérculos de papa, el rendimiento puede verse limitado (Gavilanes et al, 2015). Hussain et al. (2022) encontraron que la aplicación de Zn decreció el número de pequeños tubérculos e incrementó el número de tubérculos largos. Hafeez (2013) argumenta que el Zn mejora el crecimiento vegetativo de las papas, aumentando la tasa fotosintética y el tamaño de los tubérculos. Mientras que Amoros et al. (2020) y Mengist et al. (2021) reportaron que a medida que se aumentó el nivel de Zn disminuía el número de tubérculos pequeños.

White et al. (2017) demostraron en su experimento en campo en Invergowrie-UK que aumentar la concentración de Zn en tubérculos de papa utilizando fertilizantes foliares, tendría un efecto negativo en el rendimiento de tubérculos en cuatro de sus genotipos estudiados. Utilizar sulfato de Zn y óxido de Zn con aplicaciones con o sin urea, aplicados una, dos o cuatro veces, resultó en un aumento significativo en la concentración de Zn en los tubérculos (Figura 14). Los resultados indicarían incrementos porcentuales desde 1.7 a 2.9 de tubérculo biofortificado en relación con los tubérculos sin aplicación foliar, a una dosis de 3.6 g Zn plot⁻¹ y con 4 aplicaciones, lo cual resalta la importancia de considerar los genotipos y las dosis de aplicación para tubérculos de papa.

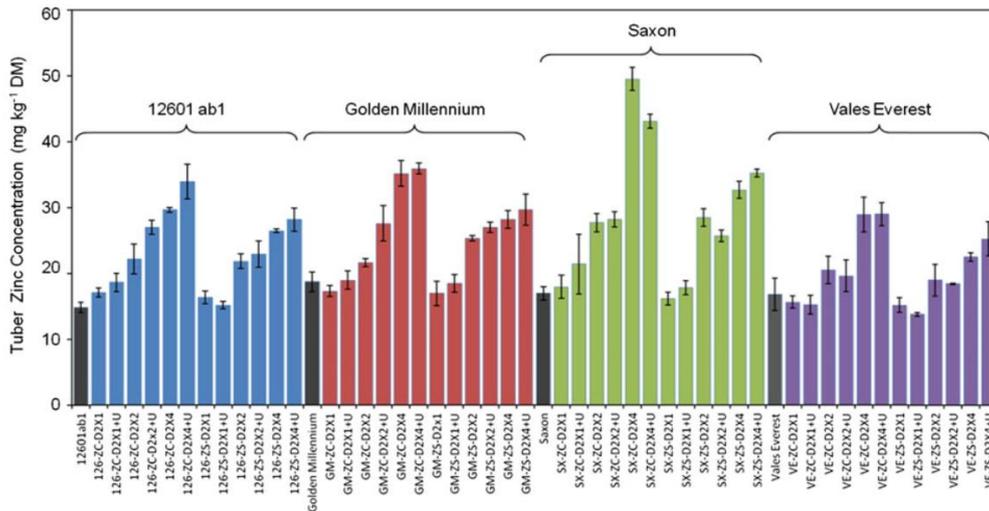


Figura 14: Efecto de las concentraciones de Zn en tubérculos al aplicar fertilizante foliar.

Fuente: White et al. (2017). Nota: Fertilizantes foliares como óxido de Zn (XC) y sulfato de Zn (ZS), aplicados una vez (x1), dos veces (x2) y cuatro veces (x4) con o sin urea (+U) en tubérculos de 60 a 75 mm de largo de plantas de los genotipos Vales Everest' (VE), '12601ab1' (126), 'Golden Millennium' (GM) o 'Saxon' (SX), a partir de los valores medios. Barras negras indican las concentraciones de Zn sin aplicación de fertilizante foliar.

La Figura 15 revela que el óxido de zinc o sulfato de zinc son fertilizantes foliares más efectivos en aumentar las concentraciones de Zn; sin embargo, el rendimiento en todos los genotipos disminuyó a medida que incrementaron las concentraciones de Zn en tubérculos.

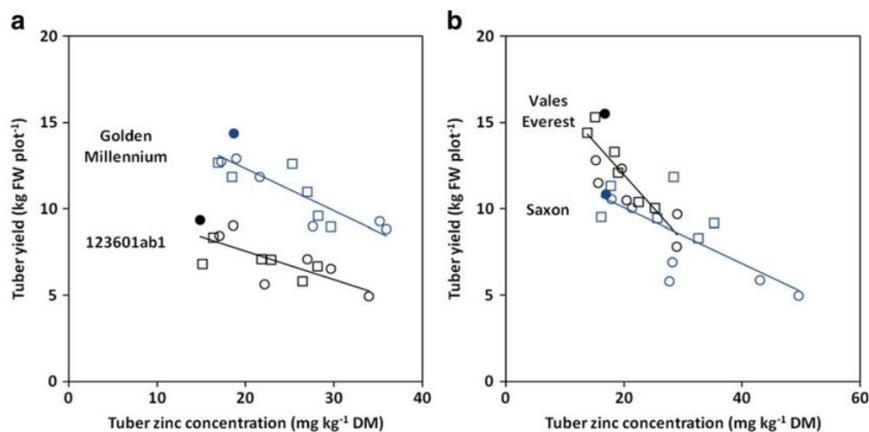


Figura 15: Respuesta de los tubérculos al rendimiento y la concentración de Zn en tubérculos de 60-75 mm de largo.

Fuente: White et al. (2017). Nota: En "A" '12601ab1' (círculo negro) y 'Golden Millennium' (círculo azul); en "B" 'Saxon' (círculo azul) y 'Vales Everest' (círculo negro). Se muestran quienes no reciben fertilizante (círculos rellenos), reciben fertilizante foliar óxido de Zn (círculo vacío) y sulfato de zinc (cuadrado vacío) con o sin aplicación de urea.

En el trabajo de Kromann et al. (2017), se realizaron experimentos tanto en condiciones de invernadero como campo para evaluar la biofortificación de papa con Zn administrado hacia el suelo y foliarmente. En el invernadero, cuyo suelo empleado fue de pH=6.29 se observó incrementos en la concentración de Zn en los tubérculos de los cultivares INIAP-Natividad (tetraploide) y Chaucha roja (diploide) con las aplicaciones foliares y al suelo (Figura 16). La aplicación combinada de Zn logró un incremento de hasta 2.69 veces de concentración de Zn y no encontró efectos significativos para el rendimiento.

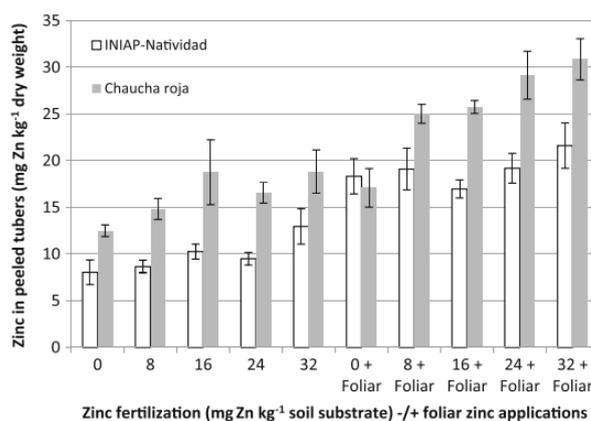


Figura 16: Concentración promedio de tubérculos pelados de papa del cultivar INIAP-NATIVIDAD y Chaucha roja en macetas de invernadero con respuesta a las aplicaciones de Zn al suelo y vía foliar.

Fuente: Kromann et al. (2017).

En campo, las aplicaciones foliares de Zn tuvieron un impacto aún más significativo, ya que logró un aumento de 2.51 veces en la concentración de Zn (mg kg^{-1} MS) en los tubérculos de INIAP-Natividad comparativamente con las aplicaciones dirigidas hacia el suelo, que respondieron a un incremento de 1.91 veces.

El hecho de que la papa pueda también biofortificarse con aplicaciones al suelo, posiblemente contradice investigaciones previas que demuestran que la aplicación foliar logra una mejor concentración debido a la baja movilidad del floema y su baja continuidad al xilema, sin embargo, en la Tabla 4 evidencia una mejor respuesta a la aplicación edáfica probablemente por factores químicos que el suelo experimenta como el bajo pH. Este incremento en la concentración de Zn con aplicaciones foliares fue superiores mayores que

los resultados encontrados en Escocia con la aplicación de sulfato y óxido de Zn en papa (White et al., 2012).

Tabla 4: Concentración media de Zn (mg kg^{-1} MS) en pulpa y cáscara en respuesta a 5 niveles de fertilización agronómica con Zn (edáfica y foliar) en 2 sitios de los Andes ecuatorianos en los años 2013 al 2014.

| Niveles de Zn | Lugar: Pusniag | | | | Lugar: Cortijo bajo | | | |
|---------------|-------------------|---------|--------------------|---------|---------------------|---------|--------------------|---------|
| | Aplicación foliar | | Aplicación edáfica | | Aplicación foliar | | Aplicación edáfica | |
| | Pulpa | Cáscara | Pulpa | Cáscara | Pulpa | Cáscara | Pulpa | Cáscara |
| 4 | 15.20 | 28.95 | 17.60 | 38.60 | 9.28 | 16.90 | 7.53 | 16.90 |
| 3 | 11.40 | 25.65 | 16.45 | 29.92 | 7.78 | 15.68 | 6.68 | 14.20 |
| 2 | 11.10 | 22.70 | 15.13 | 26.70 | 7.27 | 13.10 | 6.10 | 13.20 |
| 1 | 9.18 | 20.40 | 12.90 | 25.25 | 6.82 | 12.15 | 5.50 | 11.60 |
| 0 | 6.05 | 15.85 | 9.20 | 19.82 | 4.43 | 9.60 | 4.45 | 10.70 |

Fuente: Kromann et al. (2017)

Para todas las tasas de Zn aplicados en invernadero y campo, resultó un constante incremento de Zn en el tubérculo con un incremento de la fertilización de Zn sin afectar el rendimiento negativamente, lo que sugiere que esta práctica puede ser rentable y sostenible en la agricultura, dado que el rendimiento debe ser considerado como un factor decisivo, sumado a ello la calidad en la nutrición de los cultivos cosechados (Alshaal y El-Ramady, 2017; Sun et al., 2018).

2.6.2. Intervención genética

El mejoramiento convencional y la tecnología de ADN recombinante mediante ingeniería genética son aplicados para incrementar la biodisponibilidad, concentración de nutrientes y absorción de nutrientes en alimentos básicos conocido como biofortificación genética, la cual puede mejorar los valores nutricionales (Sharma et al., 2020). En tanto, el mejoramiento convencional todavía es comúnmente usado en algunas partes de mundo, es a largo plazo, tiene un potencial de costo efectivo, y es una de las rutas viables políticamente en diversas partes del mundo (Sharma et al., 2020; Kumari et al., 2022). Esta alternativa viable permite cruzar líneas parentales, ricas en nutrientes con características agrícolas promisorias, utilizando la variabilidad genética que se ha observado y está disponible, con variedades capaces de cruzarse con parientes silvestres (Younas et al., 2022; Sharma et al., 2020).

Esto significa que técnicas de mejoramiento convencional reducirían los niveles de antinutrientes y promoverían niveles de sustancias que promuevan la absorción de nutrientes esenciales (Velu et al., 2014). Akhtar et al. (2019) sostienen el bajo potencial de los genotipos de cereales para la absorción de Zn y el transporte limitado de Zn en la planta debido a la interacción con el fitato. Algunos de los esfuerzos se han reportado por Guttieri et al. (2006) para limitar la concentración de fitato al mínimo ($0.52-4.56 \text{ mg g}^{-1}$) en cultivos básicos (maíz, arroz y trigo).

Un principio importante aplicado es evitar comprometer el rendimiento de las variedades biofortificadas (Kumari et al., 2022). Si bien ha sido sostenible a largo plazo, hay limitaciones en la variación genética y el tiempo para generar un cultivo con el fenotipo deseado, así como su adaptación en la población objetivo (Zaman et al., 2017; Younas et al., 2022). Es un proceso donde debe evaluarse la biodisponibilidad, retención de micronutrientes en el almacenamiento, procesamiento y cocción, así como la cantidad que necesita ingerir la población (Cakmak, 2010). Sadeghzadeh (2013) manifiesta que la búsqueda por solucionar las deficiencias de zinc requiere explorar recursos genéticos y conocer mecanismos de acumulación de micronutrientes.

Por tanto, el reto significa explorar la diversidad genética disponible, e involucrar genes disponibles direccionando el contenido de minerales propicios (Grusak, 2002). Milner et al. (2013) argumentan el rol de la familia ZIP para el Fe y Zn, estudiada en cereales, para la traslocación de cationes que codifican proteínas transportadoras para el Fe y Zn. Justamente, las deficiencias de Zn pueden desencadenar la expresión de genes que codifican tales proteínas. En el caso del Zn, la ferritina es la mayor proteína presente en organismos vivos, la cual puede ser estudiada (Zaman et al., 2017).

En trigo, la biofortificación genética, mejoró la absorción de nutrientes por las plantas, aumentó la traslocación de nutrientes, mejoró el almacén de nutrientes en el endospermo y disminuyó los compuestos de antinutrientes (Muluaem, 2015). Además, se han identificado el enfoque genómico a través de la selección asistida por marcadores (MAS) y el mapeo de loci de rasgos cualitativos (QTL) (Sharma et al., 2020). En la Figura 17, se reporta que los genotipos biofortificados, no solo acumulan Zn, sino otros metales pesados y tóxicos (Pb y Cd) no esenciales con similares propiedades, por tanto, la fertilización con Zn agronómica y genética puede ayudar a superar las deficiencias mediante

el enfoque selectivo de las acumulaciones de Zn (Qaswar et al., 2017; Hussain et al., 2019).

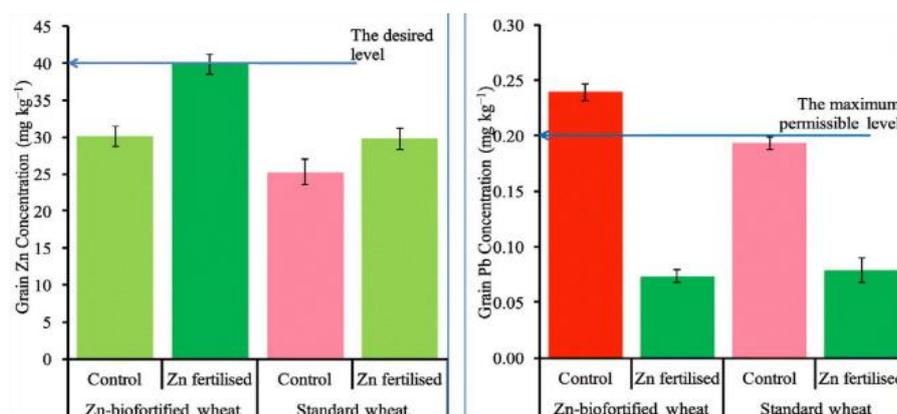


Figura 17: Respuesta de los cultivares de trigo biofortificados y estándar (sin biofortificación) en un suelo contaminado y calcáreo, con y sin fertilización de 8 mg kg⁻¹ Zn .

Fuente: Qaswar et al. (2017).

Por otro lado, en papa, Sun et al. (2018) y Ierna et al. (2020) refieren que la variación genética afecta el contenido nutricional, esto sugiere un análisis, dado que los genotipos tetraploides de la papa cultivada son más complejos. Kumari et al. (2022) argumentan que se debe estudiar la correlación de características nutricionales y evaluar la heredabilidad, para la mejora de rasgos deseados. Por esta razón, desarrollar germoplasma que combine niveles altos de uno o más micronutrientes, comprender la interacción genotipo ambiente (GxE) en diversas localidades y lanzar materiales avanzados nutricionalmente, es el objetivo de la biofortificación genética (Bouis y Saltzman, 2017).

Se reporta que existen diferencias genotípicas en la eficiencia y respuesta de zinc, por ello es indispensable el desarrollo de genotipos que contengan zinc y maximicen su biodisponibilidad (Kim et al., 2002; Zaman et al., 2017; Haider et al., 2018). Con ello, la biofortificación de cultivos mediante el mejoramiento es útil y necesario de complementar junto al enfoque agronómicos (Siwela et al., 2020). Esto porque la biofortificación genética selecciona cultivares promisorios en la acumulación de nutrientes en las partes comestibles, mientras que la biofortificación agronómica mejora tales concentraciones mediante enmiendas agrícolas (Kromann et al., 2017).

A pesar de los avances en el mejoramiento, las condiciones ambientales como la composición del suelo complican el mejoramiento para tener una alta concentración de Zn,

así a pesar de los esfuerzos sobre la eficiencia de absorción o movilización de Zn a los granos está limitada por la disponibilidad de Zn en el suelo (Velu et al., 2014). En líneas de trigo biofortificadas, se reveló una alta heredabilidad y correlación genética entre las localidades del Sur de Asia para la concentración de Zn en los granos, lo que sugiere que la interacción genotipo por ambiente no sería un problema grave en el mejoramiento de genotipos que expresan un alto contenido de Zn (Velu et al., 2012). Un factor ambiental significativo es la disponibilidad de los elementos en el suelo. Kromann et al. (2017) mencionan que factores ambientales y genéticos afectan el tamaño del tubérculo en cualquier esfuerzo por biofortificar la papa.

No obstante, White et al. (2009) coinciden en la posibilidad de incrementar la concentración de minerales mediante la combinación de genotipos aliados con estrategias de fertilización para aportar minerales sin comprometer el rendimiento. Esto sugiere que la diversidad de la papa permite ampliar la selección de características con valor nutricional para conocer la suficiencia de micronutrientes y contribuir a la seguridad alimentaria, dada las contribuciones que sostienen que el contenido de micronutrientes puede incrementarse en los tubérculos de papa mediante el fitomejoramiento (Mengist, 2018; Ierna et al., 2020; Raigond et al., 2020).

El Zn en los tubérculos parece estar afectado por factores además del rendimiento que afecta negativamente la concentración de minerales en los tubérculos. Por otro lado, el ácido fítico tiene una alta afinidad por Zn y Fe. Los fitatos se acumulan en órganos de la planta como raíces, tubérculos, tallos y hojas. Se presume que está involucrado en la regulación del llenado y crecimiento del tubérculo. En los tubérculos de papa, se incorporan al almidón hasta en un 40% de P total (Hawkesford et al., 2011). En tanto, conocer las proporciones molares de fitato/Zn y fitato/Fe es útil para estimar la biodisponibilidad de Fe y Zn e identificar requerimientos dietéticos (Gibson et al., 2018).

En el trabajo de White et al. (2017), las plantas “Saxon” tuvieron concentraciones altas de fitato en el tubérculo, por lo que reduciría la disponibilidad de Zn en los alimentos. Asumiendo una concentración de Zn en tubérculo biofortificado de 49.5 mg kg^{-1} Zn materia seca y no biofortificado de $17.0 \text{ mg Zn kg}^{-1}$, una comida de 200 gramos de papa en peso fresco de plantas “Saxon” biofortificadas, podría aumentar la ingesta de Zn de 1.04 mg de Zn a 1.58 mg de Zn por comida. Sin embargo, también el fitato aumenta de $15.0 \text{ } \mu\text{mol harina}^{-1}$

¹ a 21.6 μmol harina⁻¹, disminuyendo la biodisponibilidad de Zn alrededor de 24.2 % a 22.27 %. Aun así, un consumo de papas “Saxon” biofortificadas con Zn aumentarían el Zn biodisponible en un 11.4% a pesar de la mayor concentración de fitato, esto indicaría que la adopción de estas papas biofortificadas reduciría hasta en un 12% el porcentaje de adultos con ingestas bajas en el Reino Unido (White et al., 2017).

En el Perú, un estudio reciente a partir de comidas a base de papa (regular: 0.33 mg Fe/100 g; biofortificadas: 0.69 mg Fe/100 g) y para camote (regular: 0.55 mg Fe/100 g; biofortificadas: 0.97 mg Fe/100 g) en mujeres de Malawi y peruanas, mostró niveles significativos que indican que para el 86% de mujeres evaluadas en edad reproductiva con bajas reservas de micronutrientes ≤ 25 $\mu\text{g/L}$, requerían de 500 gramos de papas biofortificadas para generar una contribución sustancial, proporcionando el 33% del requerimiento diario de hierro, mientras que para las pruebas de camote de pulpa anaranjada biofortificada solo cubrió el 18% (Jongstra et al., 2020). Esta inhibición de la absorción del hierro debe discutirse de acuerdo con la concentración de polifenoles, como principales inhibidores. Para el Zn, en un estudio donde 37 mujeres consumieron 500 g de papas regulares y biofortificadas utilizando isotopos estables, se midió la absorción fraccional y total de zinc en una comida a prueba de papas biofortificadas comparadas con papas regulares, con un contenido de $0,48 \pm 0,02$ y $0,32 \pm 0,03$ mg Zn /100 g de peso fresco respectivamente, sus resultados señalaron que las papas biofortificadas proporcionan más zinc absorbible que las papas normales donde el zinc total absorbido fue significativamente mayor con 0.49 ± 0.13 mg/ 500 g de papa biofortificada (Liria-Domínguez et al., 2023).

La adopción del mejoramiento genético debe entonces evaluar la capacidad de los genotipos con alta concentración de zinc y bajo contenido de inhibidores, así como, buen rendimiento que asegure su respuesta al requerimiento humano en poblaciones vulnerables; un enfoque complementario a la biofortificación genética con Zn es la aplicación de fertilizantes (Cakmak, 2008). Autores coinciden que genotipos de papa con concentraciones altas de Zn pueden tener concentraciones aún más altas después de la fertilización foliar con Zn (White et al., 2012). Usar estrategias mediante programas de mejoramiento con micronutrientes específicos como Fe y Zn en cultivos de alimentación básica es el enfoque clave en el Grupo Consultivo Internacional en Investigación Agrícola (CGIAR) mediante su programa Harvest Plus (Zaman et al., 2017).

III. MATERIALES Y METODOS

3.1. Características geográficas, climáticas y edáficas del experimento.

3.1.1. Ubicación del experimento

El trabajo experimental se ejecutó entre julio a noviembre del año 2021, en el invernadero, patio de experimentación y laboratorio de Fertilidad del Suelo “Sven Villagarcía Hermoza” de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) ubicada a una altitud de 243 m.s.n.m. y coordenadas 12° 05° LS y -76° 56 ° LO en Lima, Perú.

3.1.2. Características climáticas

La información meteorológica fue obtenida a través del uso de sensores portátiles. Al momento del trasplante se instalaron los equipos HOBO U23 Pro v2 para el registro diario de la temperatura ambiental y humedad relativa, HOBO colgante/ luz 64K para medir la intensidad de luz, escudo de radiación solar (ensamblado) para la precisión en lugares expuestos a luz solar directa y sensor inteligente de luz fotosintética (PAR), y HOBO 2x, el cual monitorea la temperatura del suelo con dos sondas externas. Se registraron los datos desde el 16 de julio al 25 de noviembre del 2021. Estos datos se observan en la Tabla 5.

a) Temperatura. Durante los meses de estudio, la temperatura ambiental promedio vario de 16.19°C a 18.70°C. La temperatura registra sus valores más bajos en promedio durante el mes de setiembre con 14.73°C y los más altos durante el mes de noviembre con 21.13°C. La temperatura de suelo promedio fue mínima durante el mes de setiembre con 15.62 °C mientras que su registro fue máximo en el mes de noviembre con 22.25 °C. La media para esta variable varió de 17.48°C a 20.93°C.

b) Humedad relativa. El valor de la humedad relativa promedio alcanzó su punto más alto con un 93.78%, mientras que su valor más bajo fue de 71.62%, ambos valores durante el mes de agosto. La humedad relativa promedio varió de 82.59% a 87.09 %.

- c) Precipitación. La precipitación promedio durante los meses de estudio fue nula.
- d) Radiación. La radiación solar promedio fue más intensa durante el mes de octubre (298.11 $\mu\text{mol/s/m}^2$) y menor durante el mes de Julio (145.71 $\mu\text{mol/s/m}^2$).

Tabla 5: Data de variables climáticas promedios registrados durante el experimento.

| Mes | N° días | T° ambiental (°C) | | | Humedad relativa (%) | | | T° suelo (°C) | | | PP (mm) | PAR ($\mu\text{mol/s/m}^2$) |
|-----------|---------|-------------------|--------|------|----------------------|-------|------|---------------|--------|------|---------|-------------------------------|
| | | Min. | Media. | Max. | Min. | Media | Máx. | Min. | Media. | Máx | | |
| Julio | 15 | 16.9 | 18 | 19.5 | 78.9 | 82.8 | 87.9 | 16.5 | 17.6 | 19.0 | 0.0 | 145.7 |
| Agosto | 31 | 14.9 | 16.5 | 20.7 | 71.6 | 86.7 | 93.8 | 15.8 | 17.5 | 19.7 | 0.0 | 183.2 |
| Setiembre | 30 | 14.7 | 16.2 | 18.7 | 80.7 | 87.1 | 91.9 | 15.6 | 17.8 | 21.2 | 0.0 | 249.7 |
| Octubre | 31 | 15.7 | 17.4 | 18.9 | 77.9 | 83.5 | 89.4 | 16.9 | 19.5 | 21.9 | 0.0 | 298.1 |
| Noviembre | 25 | 17.6 | 18.7 | 21.1 | 78.5 | 82.5 | 88.7 | 18.7 | 20.9 | 22.3 | 0.0 | 184.5 |

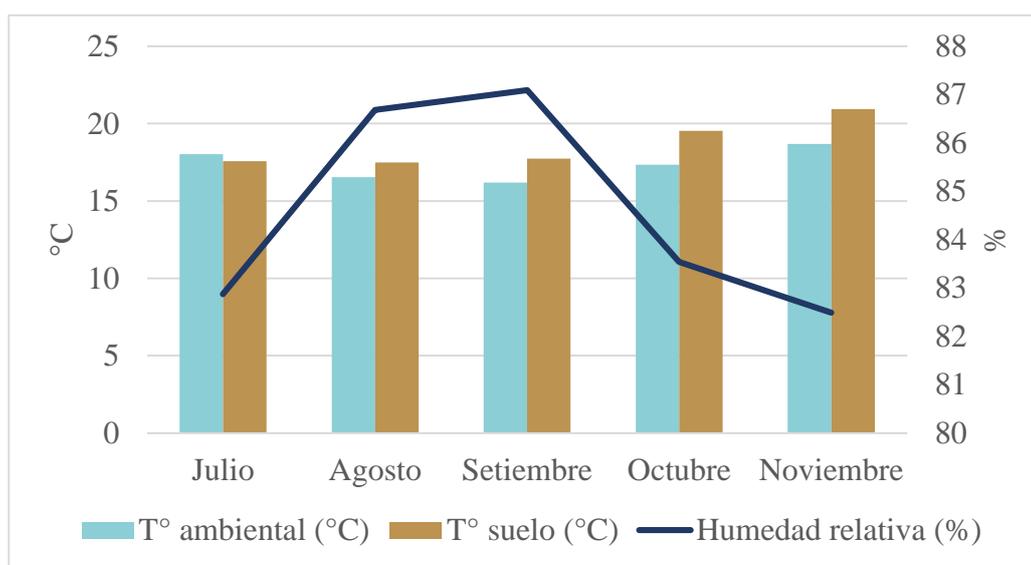


Figura 18: Características climáticas promedios: Temperatura ambiental (°C), temperatura del suelo(°C) y humedad relativa (%) durante los meses de estudio.

3.1.3. Características del suelo

Las características del suelo en estudio son descritas en la Tabla 6.

La investigación se realizó solo con una porción del suelo extraída para condiciones de maceta. Este suelo es clasificado según el sistema Soil Taxonomy (USDA-NCRS 2022) como un Typic Torrfluvents que presenta los siguientes horizontes genéticos: Ap – A – C.

El suelo empleado fue previamente analizado en el Laboratorio del Instituto Valle Grande en Cañete. Los resultados del análisis indican que el suelo se caracteriza por tener una textura franco arcillo arenosa, moderadamente fina (51.97% arena, 25.02% limo, 23.01% arcilla), reacción moderadamente alcalina ($\text{pH} = 7.88$), contenido medio de CaCO_3 (1.86%) y ligeramente salino ($\text{C.E.} = 4.58 \text{ dS m}^{-1}$) (USDA, 2017). El contenido de materia orgánica (MO) es bajo (1.48 %) lo que indica una baja fertilidad. El suelo es no sódico con P.S.I. (Porcentaje de sodio intercambiable) 1.81%. La capacidad de intercambio catiónico efectiva (C.I.C.E.) es $15.21 \text{ meq } 100\text{g}^{-1}$. Presenta fósforo disponible en 39.00 mg kg^{-1} y potasio disponible en $343.60 \text{ mg kg}^{-1}$. Las relaciones catiónicas ($\text{Ca/Mg} = 10.39$, $\text{Mg/K} = 1.55$, $\text{Ca/K} = 16.11$ y $\text{K/Na} = 2.86$) indican deficiencia de K y Mg cambiabile. La cantidad de K cambiabile es baja, a pesar de que K disponible es alto, lo cual indica que la relación catiónica es baja. El calcio cambiabile es alto. La presencia de zinc disponible en el suelo es alta (15.75 mg kg^{-1}), sin embargo, deficiente debido al pH elevado que oscila entre 7 y 8.6 y presencia de carbonatos, en este rango el Zn se une al ion bicarbonato y forma un compuesto insoluble (ZnCO_3), que disminuyen la disponibilidad de zinc (Thomson y Troeh, 1988; Escudero-Almanza et al., 2012).

Tabla 6: Características fisicoquímicas del suelo en estudio.

| Componentes del suelo | Resultado | |
|---|-----------|---------|
| Textura | | |
| Clase Textural | Franco | Arcillo |
| | Arenosa | |
| Arena (%) | 51.97 | |
| Limo (%) | 25.02 | |
| Arcilla (%) | 23.01 | |
| MO (%) | 1.48 | |
| Fósforo Disponible (mg kg ⁻¹) | 39.00 | |
| Potasio Disponible (mg kg ⁻¹) | 343.60 | |
| CaCO ₃ (%) | 1.86 | |
| Conductividad eléctrica (E.S) (dS m ⁻¹) | 4.58 | |
| pH (1:1) | 7.88 | |
| Cationes cambiabiles (meq/100 g) | | |
| Ca ²⁺ | 12.89 | |
| Mg ²⁺ | 1.24 | |
| K ⁺ | 0.80 | |
| Na ⁺ | 0.28 | |
| P.S.I (%) | 1.81 | |
| C.I.C. E | 15.21 | |
| Micronutrientes disponibles (mg kg⁻¹) | | |
| Zinc disponible (Zn) | 15.75 | |
| Hierro disponible (Fe) | 8.87 | |

Fuente: Laboratorio de Química Agrícola “Valle Grande”, 2021

La textura del suelo, el % de materia orgánica, el fósforo y potasio disponible y el CaCO₃ (%) se determinaron mediante los métodos Bouyoucos, Walkley y Black, Olsen modificado, acetato de amonio 1N; pH=7.0 y métodos volumétricos, respectivamente. La conductividad eléctrica y el pH se midieron utilizando un medidor de conductividad y un potenciómetro, respectivamente. Los cationes cambiabiles y micronutrientes disponibles se cuantificaron mediante espectrometría de absorción atómica por llama. Para el Zn y Fe, la técnica utilizó el Pentaacetato de Dietilentriamina (DTPA) como extractante.

3.1.4. Características del agua de riego

El agua utilizada en el experimento para fines de riego fue proveniente del canal de Huachipa. El análisis de agua muestra un pH adecuado, una conductividad eléctrica ideal

para la mayoría de los cultivos y un RAS (relación de adsorción de sodio) sin restricción. Las características del agua en estudio se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Características químicas del agua en estudio.

| Características | Resultado |
|--|------------------|
| pH | 8.16 |
| C.E (dS m ⁻¹) | 0.77 |
| Calcio (meq L ⁻¹) | 5.15 |
| Magnesio (meq L ⁻¹) | 1.3 |
| Potasio (meq L ⁻¹) | 0.12 |
| Sodio (meq L ⁻¹) | 1.97 |
| SUMA DE CATIONES (meq L⁻¹) | |
| Nitrato | 0.62 |
| Carbonato | 0.12 |
| Bicarbonato | 2.73 |
| Sulfato | 3.1 |
| Cloruro | 2.03 |
| SUMA DE ANIONES (mg L⁻¹) | |
| Boro | 0.33 |
| Hierro | 0.04 |
| Cobre | <0.01 |
| Zinc | 0.04 |
| Manganeso | <0.01 |
| Sodio (%) | 23.07 |
| RAS | 1.10 |

3.2. Materiales

3.2.1. Material vegetal

Se emplearon 40 plántulas in-vitro de cada genotipo de papa producidas por el banco de germoplasma del Centro Internacional de la Papa (CIP) las cuales fueron acondicionadas en invernadero. Cuatro clones biofortificados con diferentes niveles de Zn (alto, medio y bajo en Zn y uno alto en Fe y Zn) y una variedad comercial (Yungay). El material vegetal del estudio se encuentra en la Tabla 8.

a. Origen y características de clones biofortificados de papa.

En el Centro Internacional de la Papa desde hace más de 15 años se viene trabajando en la biofortificación de la papa, para incrementar sus niveles de micronutrientes (Hierro y Zinc). En los primeros años, mediante el pre-mejoramiento a nivel diploide y evaluaciones a través de tres ciclos de selección recurrente, altos coeficientes de variación fenotípicos y genotípicos junto a una alta heredabilidad ($0.80+0.19$ tanto para hierro como para zinc) sugieren que estos parámetros están bajo el control de efectos genéticos aditivos y que pueden ser manipulados eficazmente mediante selección recurrente. Se demostraron unas ganancias genéticas grandes y rápidas de más de 29% de hierro y 26% para zinc después de tres ciclos de selección. Sin embargo, el aumento de la concentración de zinc en esta población diploide habría afectado positivamente (incrementado) el número total de tubérculos / planta, pero afectado negativamente (disminuido) el peso promedio del tubérculo que representa el tamaño, con la consiguiente disminución en la categoría de número de tubérculos comercializables (Amoros et al., 2020a).

Para introducir el contenido de hierro y zinc del nivel diploide a las poblaciones tetraploides avanzadas y resistentes a enfermedades. Se inicio una estrategia de mejoramiento de interploidías basada en la tetraploidización unilateral, combinando diversidad genética y rasgos valiosos disponibles en el híbrido diploide biofortificado con los clones tetraploides avanzados resistentes a enfermedades y altos rendimientos provenientes de combinaciones de diferentes germoplasmas. Esto brindó la oportunidad de acercarse a la máxima heterocigosidad en el desarrollo de nuevos cultivares tetraploides (Amoros et al., 2016).

Es así como 30 clones biofortificados tetraploides elites fueron identificados y evaluados en 11 localidades del Perú, con el objetivo de cuantificar e interpretar la interacción genotipo por ambiente (GxA) de las variables rendimiento total de tubérculo (Mg ha^{-1}), contenido de hierro (mg kg^{-1}) base seca (BS) y zinc (mg kg^{-1}) BS. Los componentes de varianza de estas tres características mostraron efectos altamente significativos para genotipos, ambientes e interacción genotipo x ambiente. Para el caso del zinc, el efecto del ambiente fue la mayor fuente de variación con un 56% de la variación total observada, mientras que la varianza determinada por el genotipo y la interacción GxA mostraron un 13.57 % y 15.38 % de la variación total observada respectivamente. Sin embargo, se encontró que los clones

biofortificados tetraploides contenían un 24 % más zinc con respecto a la variedad testigo Yungay con un rango de entre 5% a 54% (Salas et al., 2021).

b. Característica de variedad de estudio: Yungay

Esta variedad fue liberada por el programa de mejoramiento de papa de la UNALM en 1970. Esta variedad es de amplia adaptación y muy difundida hasta la fecha en la sierra alta del Perú (Pradel et al., 2017). Según Egúsquiza (2000) posee un periodo vegetativo tardío (entre 150-180 días), presenta plantas muy uniformes y robustas, habito de crecimiento erecto, hojas grandes, flores con corola de color rojizo, de regular floración y fructificación. Susceptible a Rancho y tolerante a rizoctoniasis; susceptible al virus Y de la papa (PVY). Tiene tendencia a formar estolones muy largos que “escapan” y se convierten en tallos aéreos, pero no reducen la producción. Los tubérculos se caracterizan por su forma ovalada, piel amarillenta con pigmentación rojiza caracteriza.

La variedad comercial Yungay muestra altos rendimientos con un promedio de 56.85 Mg ha⁻¹ (Rango: 30.91-80.20). En promedio un bajo contenido de materia seca de 19.31% (Rango: 17.03-22.50). A nivel nutricional Yungay muestra bajos valores de contenido de hierro, zinc y vitamina C con 13.28 (Rango: 11.33-16.99) mg kg⁻¹ BS; 8.41 (Rango: 6.30-10.33) mg kg⁻¹ BS y 12.25 mg 100g⁻¹ en base fresca (BF) (Rango:7.05-17.07) respectivamente. Los análisis organolépticos para sabor fueron considerados de sabor agradable a muy agradable, lo cual es corroborado por los bajos contenidos de glicoalcaloides que se presenta con un promedio de 0.56 mg kg⁻¹ (Rango: 0.46-0.72) y en promedio un alto contenido de azúcares con 517.34 mg dl⁻¹ (Rango: 193.80-650.00) (Salas et al., 2021).

Tabla 8: Lista de material vegetal en estudio.

| N° | Número de accesión | Código del mejorador | Parental hembra | Parental macho | Población |
|----|--------------------|----------------------|---------------------|--|--------------------|
| 1 | CIP312621.097 | BIOT-621.097 | CIP393382.44 | CIP306416.68 | Biofortificados |
| 2 | CIP312682.042 | BIOT-682.042 | CIP394600.52 | CIP306416.68 | Biofortificados |
| 3 | CIP312764.006 | BIOT-764.006 | CIP395443.103 | CIP306418.1 | Biofortificados |
| 4 | CIP312721.074 | BIOT-721.074 | CIP395017.229 | CIP306416.68 | Biofortificados |
| 5 | CIP720201 | Yungay | (Sequoia x Earline) | ([Huagalinax Renacimiento (Jiruco x Suito)]) | Variedad comercial |

Los genotipos biofortificados seleccionados corresponden a las potenciales nuevas variedades de papa biofortificada con altos contenidos de hierro y zinc, presentados en el reporte final STC por Salas et al. (2021). Amoros et al. (2018) describen a detalle los clones tetraploides biofortificados utilizados en el experimento.

3.2.2. Fertilizantes

Los fertilizantes usados fueron: nitrato de amonio (NH_4NO_3) 33% de N, superfosfato triple (SFT) 20.09% de P, sulfato de potasio (K_2SO_4) 41.67% de K para las aplicaciones base en el cultivo de papa. Para la fertilización foliar se utilizó sulfato de zinc heptahidratado ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 21% Zn.

3.3. Tratamientos

El trabajo experimental evaluó la combinación de dos factores principales diseñados bajo una combinación de:

- a) 5 niveles de genotipo (A): Cuatro clones biofortificados del Centro Internacional de la Papa (CIP) con diferentes niveles de Zn (Alto, medio y bajo en Zn y uno alto en Fe y Zn) y una variedad comercial (Yungay)
- b) 2 niveles de aplicación foliar (B): Dos dosis de aplicación foliar 0% y 0.1% p/v de $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

La combinación de los dos factores da en total 10 tratamientos a evaluar.

Tabla 9: Cuadro de tratamientos en el experimento.

| Tratamientos | Factor A | Factor B |
|--------------|---------------------------------|----------------------------|
| | Genotipos | Dosis de aplicación (%p/v) |
| T1 | Yungay (Bajo en Zn) | 0 |
| T2 | Yungay | 0.10 |
| T3 | BIOT-682.042 (Alto Zn; Alto Fe) | 0 |
| T4 | BIOT-682.042 | 0.10 |
| T5 | BIOT-764.006 (Alto Zn) | 0 |
| T6 | BIOT-764.006 | 0.10 |
| T7 | BIOT-621.097 (Medio Zn) | 0 |
| T8 | BIOT-621.097 | 0.10 |
| T9 | BIOT-721.074 (Bajo en Zn) | 0 |
| T10 | BIOT-721.074 | 0.10 |

3.4. Diseño experimental

Se estableció un diseño con parcelas divididas (Split-plot) de arreglo factorial 5A x 2B (Niveles de genotipo x Niveles de aplicación foliar), 4 repeticiones por tratamiento y 5 plantas por cada repetición y tratamiento.

3.4.1. Modelo estadístico

Un modelo mixto con genotipo, tratamiento, repeticiones, y la interacción tratamiento por genotipo como efectos fijos, y el factor de error de parcela como efecto aleatorio fueron ajustados para determinar si existen diferencias significativas entre genotipos (G), tratamientos (T) e interacción genotipo por tratamiento (GxT).

El modelo aditivo lineal ajustado para el diseño estadístico fue el siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + \rho_k + \alpha_i + \gamma_{ik} + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijkl}$$

$$i = 1, 2, 3, 4, 5; j = 1, 2; k = 1, 2, 3, 4$$

Donde:

Y_{ijk} = Variable respuesta en el k-ésimo bloque, al usar la i-ésimo nivel de genotipo y la j-ésima dosis de aplicación foliar de Zn.

μ = Efecto de la media

ρ_k = Efecto del k-ésima repetición.

α_i = Efecto de la i-ésimo nivel de genotipo que se estudia en las parcelas.

γ_{ik} = Efecto de la interacción.

β_j = Efecto de la j-ésima dosis de aplicación foliar de Zn que se estudia en las subparcelas.

$(\alpha\beta)_{ij}$ = Efecto de la interacción de la i-ésimo nivel de genotipo con la j-ésima

dosis de aplicación foliar de Zn.

e_{ijkl} = Error experimental

Y_{ijk} , e_{ijkl} se distribuyen normal e independientemente con media cero y varianzas σ^2_a (Ea), σ^2_b (Eb)

3.4.2. Análisis estadístico

Los resultados de las variables en estudio fueron sometidos a un análisis de varianza (ANVA) en R (R *Core team*) (Viena, Austria) y SAS/STAT (version8.2). Los modelos mixtos lineales se trabajaron con el paquete R *asreml*. Las variables con respuesta de interacción significativa fueron sometidos a un análisis de efectos simples.

3.5. Distribución del área experimental

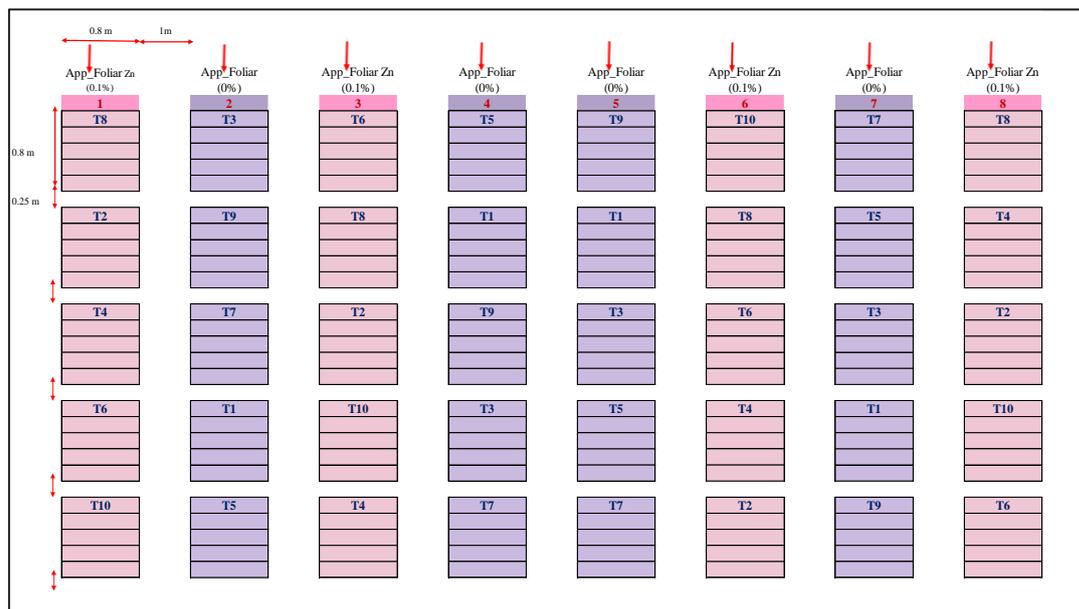


Figura 19: Croquis del experimento.

El ensayo experimental presento las siguientes características.

Tabla 10: Características del ensayo experimental.

| Características | Unidades |
|---|----------|
| Tratamientos | 10 |
| Repeticiones por tratamiento | 4 |
| Número de parcelas experimentales (plots) | 40 |
| Plantas por repetición y tratamiento | 5 |
| Unidades experimentales (macetas) | 200 |

3.6. Variables evaluadas

Las variables por analizar fueron durante la fase vegetativa, la cosecha y poscosecha. Se realizó la evaluación de las variables de acuerdo con el protocolo descrito por De Haan et al. (2014).

a) Características evaluadas durante la fase vegetativa: Se evaluó la altura de planta (PLAHE: CO_330:0000720) a los 48 días después del trasplante (ddt), número de tallos por planta (SNPP_CO_330:0000849) a los 62 ddt, Vigor (Vigor_plant: CO_330:0000275) a los 50 ddt, senescencia (SE:CO_330:0000279) a los 90 ddt.

Para la evaluación de las variables vigor de planta (Plant_Vigor) y Senescencia (SE), se adaptó el protocolo reportado por Salas et al. (2004) y Amoros et al. (2011) para las evaluaciones en condiciones de invernadero.

Tabla 11: Escalas ajustadas para el vigor de planta.

| Escala | Estado | Descripción |
|--------|--------------|---|
| 1 | Muy débil | Todas las plantas son pequeñas (< 20 cm), pocas hojas, plantas débiles, tallos muy delgados y débiles y/o color verde claro. |
| 3 | Débil | 75% de las plantas son pequeñas (< 30 cm) o todas las plantas son entre 20 y 30 cm, las plantas tienen pocas hojas, tallos muy delgados y/o color verde claro. |
| 5 | Intermedio | Intermedio o normal. |
| 7 | Vigoroso | 75% de las plantas tienen más de 30 cm, robustas con follaje o color verde oscuro, tallos gruesos y hojas muy bien desarrolladas. |
| 9 | Muy vigoroso | Todas las plantas son de más de 40 cm y la cobertura del suelo es completa. Las plantas son robustas, con tallos gruesos y abundante follaje de color verde oscuro. |

Tabla 12: Escalas ajustadas para la senescencia.

| Escala | Estado | Descripción |
|--------|------------|--|
| 1 | Muy tardío | Todas las plantas aún muestran el follaje verde y flores. |
| 3 | Tardío | La mayoría de las plantas están aún verdes. |
| 5 | Intermedio | Las plantas aún podrían estar verdes o iniciarse la senescencia, podría haber un pequeño amarillamiento. El ángulo de inserción sobre los tallos podría ser más obtusos que en las plantas más jóvenes del mismo clon. |
| 7 | Precoz | Las plantas tienen follaje senescente, el amarillamiento es más avanzado pero los tallos podrían estar aún erectos. |
| 9 | Muy precoz | Las plantas son completamente senescentes, el amarillamiento es completo y uniforme, y los tallos son decumbentes. |

a) Características evaluadas durante la cosecha: Se evaluó el Número total de tubérculos por planta (TNTP: CO_330:0000305), peso total de los tubérculos por planta (TTWP: CO_330:0000321), peso promedio de los tubérculos (ATW: CO_330:0000333). Estos datos fueron colectados a los 134 ddt.

Tabla 13: Fórmulas de características evaluadas a la cosecha.

| Variables | Abreviaciones | Unidades | Fórmula |
|-----------------------------------|---------------|----------|---|
| Número total de tubérculos/planta | TNTP | Conteo | $TNTPL = \frac{\text{Número total de tubérculos por plot (TNTP)}}{\text{Número de plantas cosechadas (NPH)}}$ |
| Peso total de tubérculos/planta | TTWP | g/planta | $TTWPL = \frac{\text{Peso total de tubérculos por plot (TTWP)}}{\text{Número de plantas cosechadas (NPH)}}$ |
| Peso promedio de los tubérculos | ATW | g | $(TTWPL / TNTPL) * 1000$ |

b) Características evaluadas durante la poscosecha:

Materia seca (Tdm_Cp: CO_330:0000390 o MS): Se evaluó el contenido de materia seca (%) expresado en mg kg^{-1} de peso seco, a los 15 días después de la cosecha de acuerdo con el protocolo de Porras et al. (2014).

Concentración de Zinc en tubérculo en base de peso seco (Zndw_Ms_mgkg_DW: CO_330:0000408 o mg Zn kg^{-1} BS): Se determinó el contenido de micronutrientes (Zn y Fe en tubérculos), siguiendo la metodología de Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP) (Burgos et al., 2021).

Concentración de Fe en tubérculo en base de peso seco (Fedw_Ms_mgkg_DW: CO_330:0000408_o mg Fe kg^{-1} BS): Se determinó el contenido de micronutrientes (Zn y Fe en tubérculos), siguiendo la metodología de Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP) (Burgos et al., 2021).

Tabla 14: Fórmulas de características evaluadas a la poscosecha.

| Variables | Abreviaciones | Unidades | Fórmula |
|---|---------------------------|---------------------|---|
| Porcentaje de materia seca | MS | % | $\% \text{ materia seca}$ $= pms \times 100 / pmf$ |
| Concentración de Fe en tubérculo en base de peso seco | mg Fe kg ⁻¹ BS | mg kg ⁻¹ | |
| Concentración de Zinc en tubérculo en base de peso seco | mg Zn kg ⁻¹ BS | mg kg ⁻¹ | |

Donde:

% materia seca = porcentaje de materia seca

pms = peso de la muestra seca

pmf= peso de la muestra fresca

BS= base seca

3.7. Metodología del experimento.

3.7.1. Muestreo, colecta y tamizado del suelo.

Durante la fase preliminar del análisis de suelo, se realizó un muestreo al azar para conocer las propiedades fisicoquímicas y el análisis de minerales del área en estudio, de las cuales se tomaron 10 submuestras de suelo a una profundidad de 25 cm, de esta muestra compuesta se tomó una submuestra de 1kg, la cual se tamizó a 2 mm de diámetro y se dejó secar al aire (Bazán, 2017). Posterior al resultado de análisis se trabajó con el suelo seleccionado y se realizó el mismo procedimiento para la colecta de suelo en uso para el experimento. Finalmente se utilizaron 800 kg de suelo distribuidos a la siembra y el aporque para un total de 200 macetas.

3.7.2. Acondicionamiento del área experimental

El invernadero tenía un área de 54 m². Se realizó la desinfección y limpieza de invernadero una semana antes a la fecha de trasplante. Los productos utilizados fueron Applaud (Ingrediente activo: buprofezin) y Evisect (Ingrediente activo: thiocyclam-hydrogenoxalato) tuvieron como ingrediente activo buprofezin. Para la aplicación, se utilizaron dos mochilas de aspersión con 1 ml/L y 1.25 g/L respectivamente. Posterior a un mes del acondicionamiento en invernadero, se trasladaron los materiales hacia el patio experimental (58.85 m²) a fin de evitar la elongación de los plantines y permitir una mejor llegada de luz.

Esta última área también tuvo los procesos de desinfección y limpieza con los productos mencionados anteriormente.

3.7.3. Manejo agronómico del experimento

El manejo del cultivo se dio homogéneamente, es decir todos los procesos que se describen a continuación fueron los mismos para todos los tratamientos con excepción de la fertilización foliar.

Plántulas in vitro. Las plántulas in vitro fueron propagadas por el Banco de Germoplasma del CIP con la finalidad de garantizar plantas libres de virus y enfermedades. Estas plantas fueron entregadas en 10 magentas con 20 plántulas cada una. Las plántulas se adaptaron a temperatura ambiente durante 5 días, bajo las mismas condiciones de invernadero (temperatura entre 17 a 24°C) y sombra, sin incidencia directa de luz solar y con ventilación adecuada para evitar la elongación.

a. Trasplante a Jiffy Pellets. Previamente al trasplante se dejan remojando los Jiffy Pellets por una hora antes del trasvase, estos contienen una mezcla de turba y sustrato de coco las cuales permiten un medio expuesto a un secado rápido para crear un sustrato estéril. Los jiffy pellets son humedecidos con una solución con fungicida sistémico Pharmate (Ingrediente activo: Benomyl) con una dosis de aplicación de 1g/L como preventivo a problemas fúngicos como chupadera y otros, que ocasionen la muerte de plantas. Estos dispuestos en 10 bandejas de plástico de 30 cm x 39 cm x 5 cm donde se añade la solución preparada con la finalidad que los pellets se hinchen. Durante el trasplante de magentas a jiffys, se utilizó una espátula pequeña para trasplantar una plántula por cada una, cortando y separando el medio de cultivo de cada plántula. Las bandejas contuvieron 20 plántulas por cada genotipo, previamente identificado y rotulado. Finalmente, por alrededor de una semana, cada bandeja fue cubierta con plástico para generar un microclima y mantener una cámara húmeda, esto permitió el enraizamiento adecuado y protegió el secado de las hojas debido a las bajas temperaturas. La frecuencia de riego fue cada 4 días. Además, se aplicó abono foliar Peter (20 N - 20 K - 20 P) en una oportunidad para optimizar la vigorosidad y conformación de plantas, la dosis de aplicación foliar fue de 0.5 g/L. En este trasplante solo 180 plántulas sobrevivieron. Las plántulas estuvieron en las bandejas durante 37 días.

b. Trasplante definitivo a macetas. Se acondicionan las macetas #8 (diámetro: 23 cm; alto: 18 cm; capacidad: 4.5 kg) en el invernadero previamente desinfectado y fumigado. Se colocan inicialmente 2.5 kg de suelo por maceta. Se preparó una solución de Pharmate (Ingrediente activo: Benomyl) 1 g L^{-1} donde los jiffys fueron sumergidos. Después de 42 días de su entrega en magentas, se realiza el trasplante definitivo en suelo seco de las plántulas aclimatadas con buena estructura de enraizamiento y conformadas con tres a más hojas verdaderas. Las plántulas son trasplantadas una a una en cada maceta previamente identificada con el código CIP de cada accesión, código de mejorador, código de tratamiento y un código QR (código de barras bidimensional cuadrada) para su posterior lectura. Al finalizar la labor se realizó el riego uniforme en todas las macetas. Al trasplante definitivo solo 179 plántulas sobrevivieron.

Riego. - El agua de riego fue manejada tratando de tener el suelo a capacidad de campo y de acuerdo con el crecimiento del cultivo. La frecuencia de riego fue cada 2 días. El volumen de agua de riego fue de 200 ml por maceta hasta los 84 ddt, posterior a ello, la frecuencia fue de 400 ml hasta el término de la campaña es decir hasta los 134 ddt.

Desmalezado. - Se realizó de manera manual y durante 3 oportunidades, de acuerdo con la aparición de malezas: a los 9,14, 64 ddt.

Aporque. - Se realizaron dos aporques: a los 11 y 58 ddt; utilizándose 0.75 kg del suelo tamizado en cada una de las macetas. Esta práctica agrícola consistió principalmente en agregar suelo hacia los lados de la planta para cubrir los estolones y asegurar la tuberización. Además de evitar el verdeamiento en los tubérculos expuestos a la superficie (Egúsquiza, 2014).

Tutorado. - En el primer aporque también se realizó el tutorado de plantas. Se utilizaron tutores de bambú. Esta actividad se realizó con la finalidad de proporcionar soporte mecánico a las plantas y asegurar la eficiencia en el manejo agronómico, ya que al venir de plántulas in-vitro se forma un único tallo. Además, el tutorado permite una mejor entrada de luz para asegurar una adecuada tasa fotosintética.

Fertilización. - Los fertilizantes y la fórmula de aplicación fueron adaptados de los experimentos de campo en papa del CIP. Para todas las ocasiones de fertilización se

realizaron pruebas de conductividad eléctrica a fin de controlar la concentración de sales y evitar daños en la planta. Estas pruebas decidieron el fraccionamiento a fin de controlar que la conductividad eléctrica sea menor a 2.5 dSm^{-1} . Las aplicaciones en ambas formas de fertilización están dadas en gramos por litros.

a. Fertilización edáfica. La fertilización edáfica fue a base de nitrógeno, fósforo y potasio, se trabajó con una dosis en relación 180, 180, 160 mg kg^{-1} de suelo; todos ellos en la forma de N, P y K respectivamente. El fraccionamiento de la fertilización edáfica se describe en la Tabla 15. Las aplicaciones edáficas fueron en medio soluble aplicados directamente al suelo en un volumen de 200 ml por planta. El nitrógeno fue fraccionado en cinco oportunidades con un intervalo de 7 días: a los 30, 37, 44, 51 y 57 ddt. En caso del fósforo y potasio, para el primero, este se aplicó junto al N, en una sola aplicación, mientras que, para el K, en 2 oportunidades: a los 55 y 80 ddt.

b. Fertilización foliar. Para la fertilización foliar no se utilizó el agua de riego común. Se utilizó agua desionizada para estandarizar los parámetros de $\text{pH}=7.12$ y $\text{C. E}= 0.038 \text{ dSm}^{-1}$, y controlar la concentración de sales solubles. Para la aplicación foliar se usó un aspersor a presión manual a un volumen de 200 ml por planta. Para los tratamientos con aplicación foliar de zinc, se disolvió el sulfato de zinc heptahidratado (21% Zn) el cual fue aplicado en dos oportunidades a los 60 y 74 ddt. Los tratamientos sin aplicación foliar recibieron solo agua desionizada.

Tabla 15: Fertilización, fraccionamiento base del experimento.

| Fertilización | Fertilizante | Ley (%) | Nutriente | Fraccionamiento | mg de nutriente |
|---------------|---|---------|-----------|-----------------|-----------------|
| Edáfica | Nitrato de amonio (NH_4NO_3) | 33 | N | 5 | 108 |
| | Superfosfato triple (SFT) | 20.09 | P | 1 | 540 |
| | Sulfato de potasio (K_2SO_4) | 41.67 | K | 2 | 240 |
| Foliar | Sulfato de zinc heptahidratado ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) | 21 | Zn | 2 | 210 |

Control fitosanitario. - Se realizaron evaluaciones semanales para controlar la aparición de plagas. Se estableció el manejo cultural mediante cortes con agua jabonosa de las hojas dañadas y eliminación de estas. Además, se realizaron aplicaciones preventivas para controlar “mosca blanca”. La frecuencia de aplicación fue durante tres ocasiones: a los 35 ddt, 40 ddt y 79 ddt. Se utilizó Evisect (Ingrediente activo: Hidrogenooxalato de tiociclam) y Confidor (Ingrediente activo: Imidacloprid) cuya dosis de aplicación fue de 1.25 mg/l y 1 ml/l respectivamente. Para el control la “rancharia” y enfermedades fúngicas como “alternaria” se utilizó Pharmate (Ingrediente activo: Benomyl) con una dosis de aplicación de 1000 mg/l. La aplicación fue dirigida al cuello de planta y se realizó en dos ocasiones, la primera al momento del trasplante y la segunda a los 82 ddt.

Cosecha. - La cosecha se realizó a los 134 ddt. Se espera que las plantas sean senescentes y se observen hojas amarillentas para realizar el corte de follaje 16 días antes de la cosecha, para la tuberización de los tubérculos. La cosecha fue realizada por unidad experimental, es decir por cada maceta. Se separó el suelo de los tubérculos y fueron dispuestos en una bandeja para la evaluación de las variables: Número total de tubérculos por planta (TNTPL) y Peso total de tubérculos por planta (TTWPL). Finalmente, los tubérculos de cada tratamiento y repetición fueron colocados en bolsas de papel Kraft #5 y guardados en mayas negras para evitar la exposición a la luz, etiquetadas con código de barras y almacenados en una cámara fría (4°C) para posteriormente ser enviados al laboratorio de calidad y nutrición (QNLAB) del CIP.

3.7.4. Procesamiento de muestras: Determinación de materia seca y análisis de minerales (zinc y hierro)

Se realizó la selección de tubérculos sanos, libres de enfermedades y con suficiente tamaño para realizar el pelado de las muestras siguiendo el protocolo de Porras et al. (2014). De la selección, 2 a 20 tubérculos de cada tratamiento y repetición fueron seleccionados, la cantidad de tubérculos varió de acuerdo con el tamaño y cantidad para el procesamiento.

En el laboratorio de calidad, luego de 5 días después de la cosecha (ddc), los tubérculos fueron lavados con abundante agua para remover residuos del suelo y secados con papel toalla para su posterior almacenamiento a 5°C hasta la preparación de muestras para la determinación de materia seca y análisis para determinación de minerales. Durante el

procesamiento a los 14 ddc, los tubérculos selectos fueron nuevamente lavados y enjuagados con agua destilada, tratando de evitar algún índice de contaminación. Durante el pelado, se utilizó un pelador de cerámica de alta calidad. En este proceso se cuidó que la eliminación de pulpa sea la mínima posible. Los tubérculos fueron cortados en forma longitudinal en 4 secciones con un cuchillo de cerámica, de las 2 secciones opuestas se tomaron 2 a 3 rodajas hasta obtener una muestra disponible entre 11 y 50 g de cada tratamiento, para esto se utilizó una cortadora de acero inoxidable de calidad (Porras et al., 2014).

Pumisacho y Sherwood (2002) mencionan que el contenido de materia seca es importante para su consumo en fresco e industrial, para eso se busca que la papa contenga un mínimo de 21% de materia seca. Este componente se evaluó en los laboratorios de calidad del CIP. En el procesamiento, se toma el peso de la bolsa de polietileno y el peso fresco de las rodajas de papa (pmf), inmediatamente a su cálculo, se almacenan en un congelador a -20°C . Las muestras fueron liofilizadas por 72 horas hasta que la humedad fuese inferior al 3% en un liofilizador industrial (Porras et al., 2014). Al término del secado, se toma el peso exacto de las muestras secas (pms). El peso seco y peso fresco fueron utilizados para calcular el contenido de materia seca.

Al finalizar el proceso de liofilización, las muestras de papa fueron molidas utilizando una malla #40 y almacenadas a -20°C en bolsas de plástico Whirl-Pak. Posteriormente, las muestras de papa liofilizadas y molidas fueron enviadas a la Universidad de Nottingham, Reino Unido para la determinación de minerales mediante la técnica química de Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS) considerándose como indicadores de contaminación al aluminio ($\text{Al} > 3.0 \text{ mg kg}^{-1}$), titanio ($\text{Ti} > 0.25 \text{ mg kg}^{-1}$) y cromo ($\text{Cr} > 0.2 \text{ mg kg}^{-1}$). Las concentraciones de aluminio y titanio permiten garantizar que no haya contaminación a través suelo y por consiguiente no hubiera sobreestimaciones de minerales en el análisis de las muestras de plantas (Burgos et al., 2021). Por su parte, las concentraciones de cromo indicaron que no hubiera índices de contaminación debido al desgaste o deterioro de materiales y equipos durante el procesamiento de las muestras. Mwesigye et al. (2019) reportan el método de análisis ICP-MS para las muestras de papa, en el cual se pesa 0.3 a 0.45 g de muestra, los materiales de referencia certificados y blancos fueron digeridos mediante reflujo en 8 ml de HNO_3 de grado primario (Fisher Scientific, Reino Unido) en una placa caliente durante 2 horas. Cada muestra se llevó a 50 ml antes de la dilución adicional (1ml en 6 ml de agua MiliQ). El análisis multielemento de las

soluciones diluidas se realizó mediante ICP-MS (Thermo Fisher Scientific, Bremen, Alemania). Las concentraciones de hierro y zinc se expresaron en mg kg^{-1} , peso seco.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Variables analizadas durante la fase vegetativa.

La Tabla 16 muestra el análisis de varianza para las variables: Altura de planta (PLAHE), números de tallos por planta (SNPP), vigor de planta (Plant_vigor) y senescencia (SE). Estas variables fueron evaluadas en la fase vegetativa bajo condiciones experimentales de invernadero.

Tabla 16: Análisis de varianza para las variables PLAHE, SNPP, Plant_Vigor y SE evaluadas a la fase vegetativa.

| Fuentes de Variación | GL. | Cuadrados medios | | | |
|-------------------------|-----|------------------|--------|-------------|------|
| | | PLAHE (cm) | SNPP | Plant_vigor | SE |
| Repeticiones (rep) | 3 | 2.08 | 0.11 | 0.29 | 1.15 |
| Dosis de aplicación (D) | 1 | 10.32 | 0.01 | 0.09 | 0.47 |
| Genotipos (G) | 4 | 460.03** | 3.03** | 9.72*** | 0.98 |
| D*G | 4 | 24.58 | 0.60 | 0.52 | 0.56 |

Niveles de significancia : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

4.1.1. Altura de planta (PLAHE)

Según Schwarz y Kläring (2001) entender el comportamiento de un cultivo, implica realizar mediciones en cuanto a su crecimiento bajo determinadas condiciones ambientales en relación con el tiempo de crecimiento, esto puede ser posible expresarlo como altura de planta.

En este estudio no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos ni en la interacción genotipos por tratamientos para la altura de planta, es decir no se observó un efecto ante la aplicación foliar en los genotipos estudiados. Sin embargo, en los genotipos se observaron diferencias altamente significativas (Tabla 16). Las diferencias estadísticas

altamente significativas para los genotipos ($P < 0.05$), pueden ser explicadas debido al factor genético de cada uno de los clones y la variedad comercial Yungay, lo que las distingue en respuesta a la altura de planta (Deshi et al., 2021).

En la Figura 20, se observan los promedios de menor a mayor de los genotipos estudiados. La prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$) mostró que BIOT-721.074 (bajo Zn) fue el genotipo biofortificado más alto seguido del clon BIOT- 682.042 (alto Zn; alto Fe), los cuales presentaron diferencias significativas respecto al resto del material ($p < 0.05$). Por otro lado, no hubo diferencias significativas entre Yungay (Var. Comercial no biofortificada) y los clones biofortificados BIOT-621.097 (Medio Zn) y BIOT-764.006 (Alto Zn). Esta medición fue realizada a los 48 ddt, en este periodo la temperatura media fue de 16.54°C lo cual significó un rango de crecimiento óptimo para el cultivo de papa, situado entre 15°C a 18°C (Rodríguez, 2010).

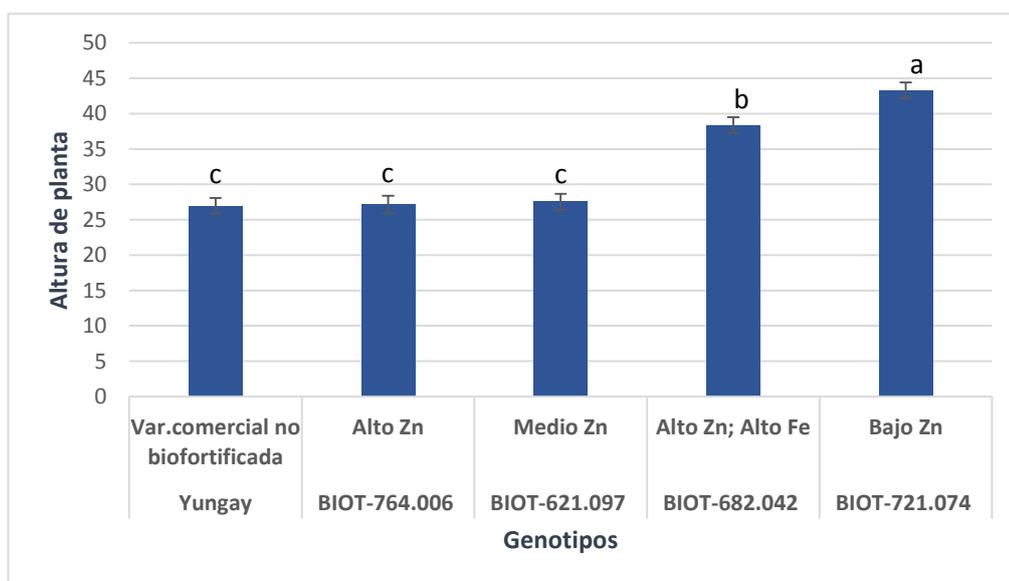


Figura 20: Efecto de los genotipos en la altura de planta a los 48 días después del trasplante.

Letras diferentes corresponden a diferencias significativas.

En este trabajo, si bien diferencias estadísticas no fueron observadas para la aplicación foliar en el crecimiento de las plantas (Tabla 16), Gavilanes et al. (2015) encontraron que la aplicación foliar de Zn sí mostró diferencias altamente significativas en la altura de planta a lo largo de su fenología en condiciones de campo. Otros autores resaltan la importancia del

zinc en la regulación y distribución del elemento hacia los diferentes órganos de la planta, donde el zinc mejoraría el crecimiento vegetativo del cultivo (Gupta et al., 2016).

4.1.2. Número de tallos por planta (SNPP)

El número de tallos por planta es una característica importante que se relaciona con una mayor producción de tubérculos, a partir de la conformación de macollos y una mayor fotosíntesis (Leiva, 2021). Tirado (2014) argumenta que el número de tallos por planta está en función al número de yemas (ojos del tubérculo). Un tallo produce sus propias raíces, tubérculos, estolones y follaje, comportándose como una unidad de producción por lo cual se obtendría un mejor rendimiento. Por otro lado, a mayor número de tallos, los tubérculos serán cada vez más pequeños (Shayanowako et al., 2015). Esta variable fue evaluada a los 62 ddt, durante este periodo se mantuvieron temperaturas que se consideraron óptimas para el crecimiento del cultivo de papa (Rodríguez, 2010).

No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos ni en la interacción genotipos por tratamientos para el número de tallos por planta, además no reflejó un efecto ante la aplicación foliar en los genotipos estudiados. Sin embargo, los genotipos muestran diferencias altamente significativas (Tabla 16). El factor genético de los genotipos se refleja en la Figura 21, donde se presentan las diferencias significativas en el número de tallos por planta ordenadas de menor a mayor.

La prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha=0.05$) reveló que el genotipo BIOT-721.074 (Bajo Zn) produjo la mayor cantidad de tallos, aunque no hubo diferencias significativas con el genotipo BIOT-764.006 (Alto Zn) como se puede observar en la Figura 21. Yungay (Var. Comercial no biofortificada) mostró el menor valor de tallos en comparación con los clones biofortificados, pero respondió igual que el clon BIOT-682.042 (Alto Zn; Alto Fe) y BIOT-621.097 (Medio Zn). En condiciones de campo, Leiva (2021) encontró valores superiores que oscilan entre 3 a 5 tallos por planta para los mismos clones, mientras que valores menores reportados en este trabajo (Rango: 1 a 3) son explicados debido las limitaciones del desarrollo de los clones en macetas. Tirado-Lara y Tirado-Malaver (2018) encontraron rangos desde 1.13 a 3.43 en otros clones de estudio, y para Yungay, encontró un valor promedio de 2.80 en condiciones de campo experimental.

Valores entre 2.5 a 3.3 número de tallos por planta son considerados óptimos en la producción de papa (Arana, 2021). Esta diferencia en número puede variar según la procedencia, ya que tallos que provienen de semilla vegetativa tienden a generar un mayor número (Egúsquiza, 2014); sin embargo, es importante tener en cuenta que los materiales utilizados en este experimento procedían de cultivo de in-vitro.

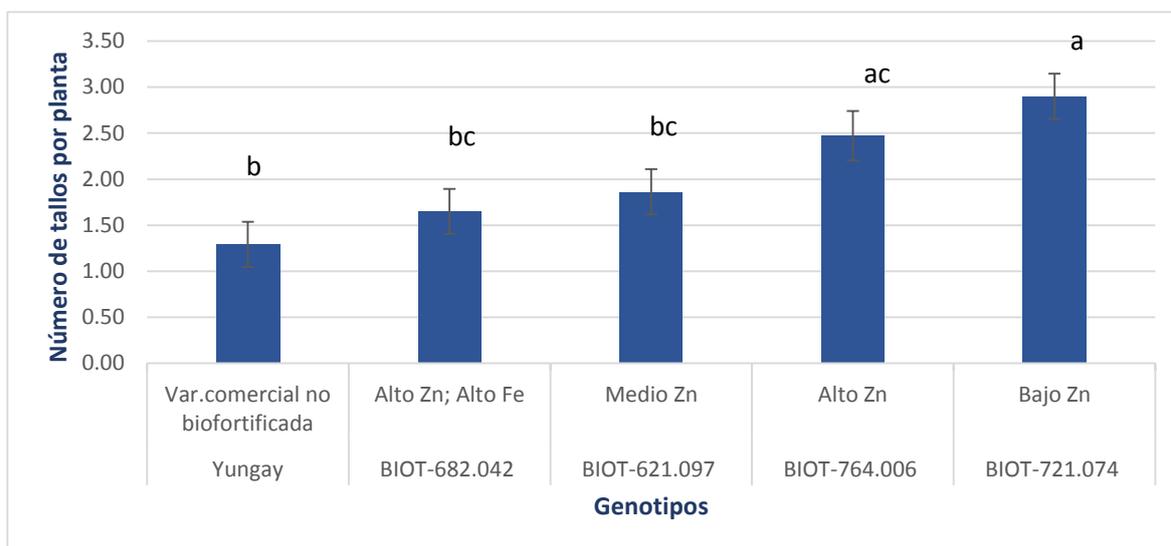


Figura 21: Efecto de los genotipos en el número de tallos por planta.

Letras diferentes corresponden a diferencias significativas.

En este experimento las aplicaciones foliares no afectaron el número de tallos por planta (Tabla 16). De manera similar a Ramírez (2019), quien trabaja en condiciones de campo en La Molina (pH=7.82), no encuentra efectos en la aplicación foliar de zinc para esta variable en la variedad UNICA; sin embargo, cuando se aplicó el zinc vía edáfica si encontró un efecto positivo en la dosis más alta de 40 kg ha⁻¹. Diferente a Quispe (2020) que encontró alta significación en la aplicación foliar, donde tratamientos sin y con fertilización foliar (5kg ha⁻¹ de Zn) resultaron entre 2 y 3 tallos planta⁻¹, respectivamente, en condiciones de campo experimental para la variedad UNICA.

4.1.3. Vigor de planta (Vigor_plant)

El vigor en la planta de papa es un rasgo importante para el desarrollo de nuevos cultivares, clones con mayor vigorosidad suelen tener una madurez tardía ($r=0.80^*$), además, estas plantas con mayor vigor presentan mayor rendimiento de tubérculo (Da Silva et al., 2019).

Por otro lado, el número de brotes de cada tubérculo dependerá de la variedad y las condiciones climáticas en las que se desarrolle, lo cual influirá en el vigor general de la planta (Egúsquiza, 2014). En condiciones de campo, la reducción del vigor se observa en semillas fisiológicamente más viejas, lo que afecta el crecimiento del dosel de la papa, además la variedad influye sobre el follaje y la vigorosidad (Schwarz y Kläring, 2001).

No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos ni en la interacción genotipos por tratamientos para el vigor de planta, además no reflejó un efecto ante la aplicación foliar en los genotipos estudiados. Sin embargo, los genotipos muestran diferencias altamente significativas (Tabla 16). Los promedios de los genotipos para el vigor de planta se muestran en la Figura 22. La prueba de comparación de medias Tukey ($\alpha=0.05$) mostró que BIOT-764.006 (Alto Zn) produjo plantas más vigorosas en comparación con el resto, pero fue estadísticamente igual que Yungay (Var. Comercial no biofortificada) y BIOT-721.074 (Bajo Zn). Estos dos genotipos fueron estadísticamente iguales que BIOT-682.042 (Alto Zn; Alto Fe). El genotipo con menor vigor fue BIOT-621.097 (Medio Zn). (Pereira et al., 2017), encontraron diferencias significativas entre grupos de clones avanzados de papa, en su estudio resultaron de alto vigor ‘Asterix’ en comparación con el grupo ‘Agata’ de bajo vigor bajo su propia escala de vigorosidad. Esto indicaría que la vigorosidad de cada genotipo varía de acuerdo con su potencial genético.

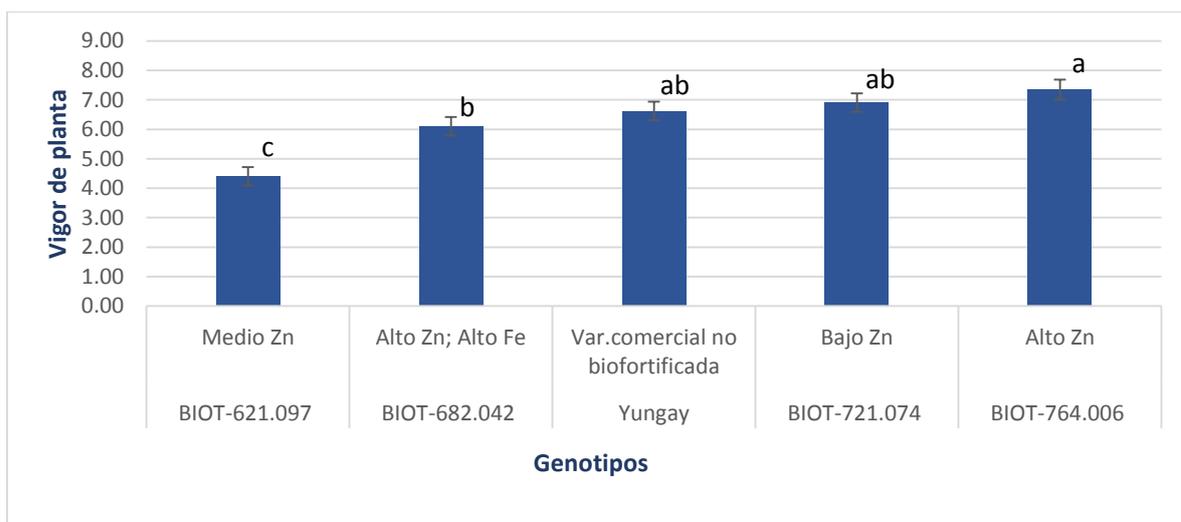


Figura 22: Efecto de los genotipos en el vigor de planta.

Letras diferentes corresponden a diferencias significativas.

De acuerdo con Jasim et al. (2013) la aplicación de K se relaciona con un incremento del vigor del cultivo tanto a nivel foliarmente como en el desarrollo de los tubérculos, ya que su aplicación facilita la translocación de carbohidratos. Sin embargo, es importante señalar que la evaluación de esta variable quedo pendiente a la mitad de aplicación de K. Por otra parte, Alloway (2008) y Dhaliwal et al. (2019) respaldan la idea de que los fertilizantes nitrogenados tienen un efecto beneficioso en la nutrición del cultivo y contribuyen al aumento de la vigorosidad de la planta. En este trabajo, la evaluación de vigor se realizó en el cuarto fraccionamiento de un total de cinco para la aplicación de nitrógeno.

Por otro lado, probablemente se encontrarían diferencias significativas en la aplicación foliar de zinc, si la evaluación del vigor de planta se realiza en la fase final de la fenología del cultivo de papa, según lo expuesto por Ramírez (2019) quien encontró diferencias significativas en las aplicaciones foliares de Zn cuando esta variable se evaluó en la cuarta medición a los 98 días, mostrando el mejor promedio con un 62.10% de vigor a una dosis de 5 kg Zn ha⁻¹ en comparación con los demás tratamientos. Esto sugiere considerar mayores evaluaciones respecto a la vigorosidad en contraste con la única evaluación presentada en este estudio. Por otro lado, considerar el momento de evaluación resulta importante, ya que la vigorosidad se reduce debido a la senescencia de planta ($r=-0.02$).

4.1.4. Senescencia (SE)

La senescencia foliar es la última etapa del desarrollo de la hoja, donde coexisten cambios fisiológicos, bioquímicos y estructurales, en esta etapa las hojas pierden clorofila gradualmente y se reciclan las reservas hacia partes del crecimiento u órganos de almacenamiento como en el cultivo de papa, donde las macromoléculas se transportan hacia las zonas de demanda, los tubérculos. Se caracteriza por el amarillamiento de la lámina como pérdida de la clorofila y posterior detención del crecimiento cuando se alcanza la madurez en las hojas (Zarate, 2010).

No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos ni en la interacción genotipos por tratamientos para la senescencia, además no reflejó un efecto ante la aplicación foliar en los genotipos estudiados. Además, no se muestran diferencias altamente significativas para los genotipos (Tabla 16). La igualdad estadística para todos los genotipos indicaría que no hay diferencias significativas entre clones avanzados y la variedad Yungay

($p > 0.05$), sobre la madurez, lo cual significa que podría tomarse el mismo tiempo de cosecha para todos los genotipos.

Se registró la senescencia observada en hojas y tallos en una sola ocasión, a los 90 ddt. Es importante destacar que, durante el crecimiento, se observaron cambios visibles en la planta, como la inhibición en el desarrollo de las flores y ramas laterales. Según Aguilar et al. (2006) el momento de medición de senescencia coincidió con el proceso de tuberización, esto significa que la planta redirigió sus recursos fotosintéticos hacia el crecimiento de estructuras de alta demanda como los tubérculos (Aguilar et al., 2006). Mora-Aguilar (2006) considera que la papa se comporta distinto a otras especies al acumular reservas en los tubérculos y este comportamiento se asocia con la senescencia, donde la eficiencia de esta acumulación se manifestaría al final de la etapa de crecimiento.

Fernández et al. (2015) mostraron que la aplicación foliar de Zn en hojas senescentes favorece el transporte eficiente del micronutriente hacia los granos de trigo. Esto porque la tasa de absorción disminuye con la edad de las hojas y aumenta nuevamente durante la senescencia. Esta movilidad en los micronutrientes es limitada hasta que la integridad de las hojas disminuye por la senescencia. Aunque este estudio no mostró un incremento significativo con las aplicaciones foliares de Zn (Tabla 16) para esta variable, se resalta la importancia de su evaluación, y se sugiere llevar a cabo más evaluaciones y aplicaciones en esta fase de crecimiento, dada su relación entre la intensidad de movilización del Zn y el grado de senescencia foliar como señalan Eichert (2011) y Fernández et al. (2015).

4.2. Variables analizadas durante la cosecha.

La Tabla 17 presenta el análisis de varianza para las variables: Número total de tubérculos por planta (TNTP), peso total de los tubérculos por planta (TTWP) y peso promedio de los tubérculos (ATW). Estas variables fueron evaluadas en la cosecha bajo las condiciones del clima y el manejo del presente trabajo de investigación.

Tabla 17: Análisis de varianza para las variables TNTP, TTWP y ATW evaluadas a la cosecha.

| Cuadrados medios | | | | |
|-------------------------|-----|----------|------------|-----------|
| Fuentes de Variación | GL. | TNTP | TTWP (g) | ATW |
| Repeticiones (rep) | 3 | 417 | 203.7 | 1.89 |
| Dosis de aplicación (D) | 1 | 3397 | 275.1 | 4.13 |
| Genotipo (G) | 4 | 94388*** | 11491.2*** | 100.46*** |
| D*G | 4 | 5894 | 113.1 | 0.98 |

Niveles de significancia : 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

4.2.1. Número total de tubérculos por planta (TNTPL)

El número de tubérculos resulta importante para obtener una buena rentabilidad en el cultivo de papa a partir de tubérculos comerciales para el mercado (>50g) según Mora-Aguilar (2006). Sin embargo, en este estudio, no se distinguieron tubérculos comerciales y no comerciales, debido a que el único criterio de evaluación del número total de tubérculos por planta fue calculado mediante la suma de tubérculos sanos y libres de enfermedades.

No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos y en la interacción genotipos por tratamientos para el número de tubérculos por planta, además estas variables solo reflejaron un efecto significativo entre genotipos (Tabla 17). Se observaron diferencias estadísticas entre los genotipos, indicando que el número total de tubérculos varía de acuerdo con el material genético utilizado. La prueba de Tukey al 0.5% de probabilidad indicó que el genotipo BIOT-764.006 (Alto Zn) tuvo mayor número de tubérculos por planta en comparación a los demás, seguido de BIOT-682.042 (Alto Zn; Alto Fe) mientras que el genotipo BIOT-621.097 (Medio Zn), Yungay (Var. comercial no biofortificada) y BIOT-721.074 (Bajo Zn) fueron estadísticamente iguales ($p > 0.05$), como se observa en la Figura 23. Özkaynak y Samanci (2005) encontraron en condiciones de invernadero 3 a 8 tubérculos por planta, Lommen y Struik (1992) reportaron entre 8.0 a 8.8 tubérculos por planta en dos cultivares de papa en invernadero y Grigoriadou y Leventakis (1999) encontraron de 1.85 a 2.52 número de tubérculos por planta. Estos resultados parecen ser inferiores con lo encontrando en los hallazgos de este estudio (Figura 23).

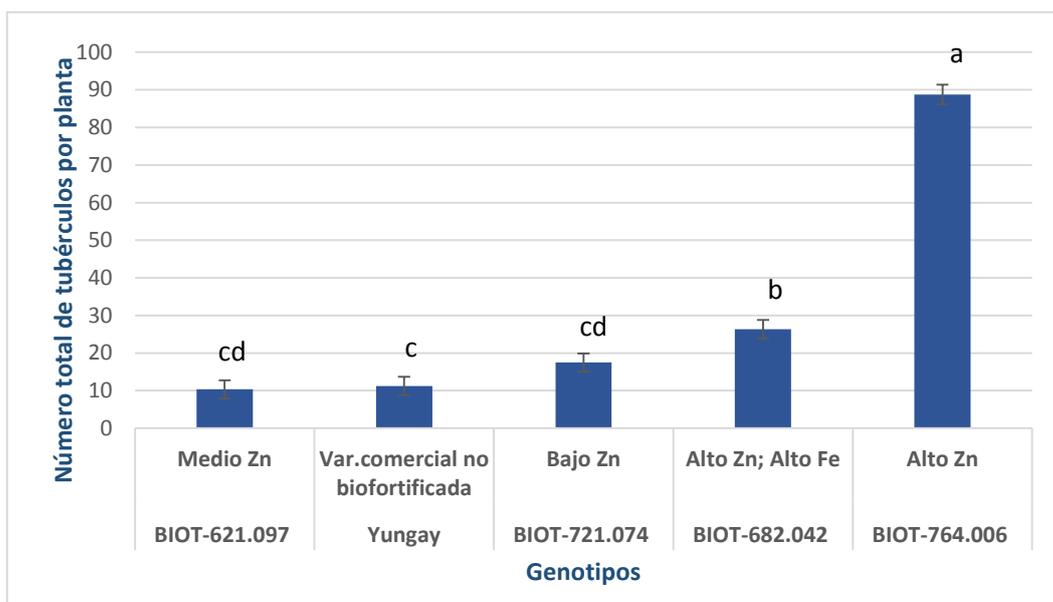


Figura 23: Efecto de los genotipos en el número total de tubérculos por planta.

Letras diferentes corresponden a diferencias significativas.

En contraste con los resultados obtenidos en este estudio entre los clones biofortificados y Yungay, el estudio de campo de Leiva (2021) presentó datos promedios para las variedades comerciales Yungay y Canchan, además de 16 clones biofortificados. En su análisis, el clon BIOT-764.006 destacó al registrar 32.74 como el mayor número de tubérculos por planta, mientras que Yungay promedió 16.03. En condiciones de invernadero, esta variable para el clon biofortificado representó un aumento significativo con una respuesta 2.58 veces mayor. Por tanto, este clon demostró ser superior en ambas condiciones. Mientras que, para Yungay, su respuesta fue menor, siendo 1.45 veces inferior en comparación con los datos reportados por Leiva (2021).

Shayanowako et al. (2015) y Tirado-Lara y Tirado-Malaver (2018) indican que el número de tubérculos afectaría el tamaño final de los tubérculos. Asimismo, para las condiciones de este experimento, los tubérculos al desarrollarse a partir de material vegetal in-vitro, produjeron un mayor número de tubérculos pequeños. Amoros et al. (2020) en su experimento llevado en campo en Paucartambo y Huancayo, demuestran que a medida que se elevan las concentraciones de Zn en los clones biofortificados afectarían (aumentarían) el número total de tubérculos por planta y a su vez disminuyen el tamaño de los tubérculos.

Los resultados muestran que, la aplicación de Zn no incrementa el número de tubérculos por planta (Tabla 17). En condiciones de invernadero se muestran resultados similares no

significativos para el número de tubérculos en el efecto de la fertilización foliar y edáfica con hierro y zinc para el cultivo de papa (Velez, 2013). De manera similar con lo encontrado por Gavilanes (2015) en condiciones de campo, donde los tipos de fertilización edáfica y foliar para Zn y Fe fueron no significativos para el número de tubérculos (Rango: 32.04-16.21) en las variedades Coneja Negra Puca Shungo, INIAP-Natividad, Chaucha Roja y Chaucha Amarilla. Kromann et al. (2017) en su estudio experimental en campo, también no encuentra efectos significativos en la fertilización con Zn para el rendimiento de tubérculos (en número y peso de tubérculos).

4.2.2. Peso total de los tubérculos por planta (TTWP)

Garzón (2014) menciona que el peso total de los tubérculos por planta depende de la tuberización y el crecimiento del tubérculo, siendo importante la longitud del día y la temperatura. Algunas prácticas agronómicas pueden retardar la tuberización adecuada como el número de aporques y la fertilización, y bajo condiciones óptimas de humedad (Garzón, 2014). Esta etapa puede durar de 60 a 90 días, por lo que bajo condiciones de estrés puede no ser uniforme y retardar su crecimiento (Sifuentes et al., 2009).

En nuestro estudio no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos y en la interacción genotipos por tratamientos para el peso de tubérculos por planta. Sin embargo, esta variable solo reflejó un efecto significativo entre genotipos (Tabla 17). Estas diferencias solo para los genotipos indica que el peso total de los tubérculos por planta se relaciona con el potencial de rendimiento de cada material de estudio. La prueba de comparación de medias de Tukey arrojó que el genotipo BIOT-682.042 (Alto Zn; Alto Fe) fue superior a los demás, pero fue estadísticamente igual que BIOT-764.006 (Alto Zn) ($0.86 > 0.05$), le siguió BIOT-721.074 (Bajo en Zn) y en último lugar se encontraron los genotipos Yungay (Var. Comercial no biofortificada) y BIOT-621.097 (Medio Zn) (Figura 24).

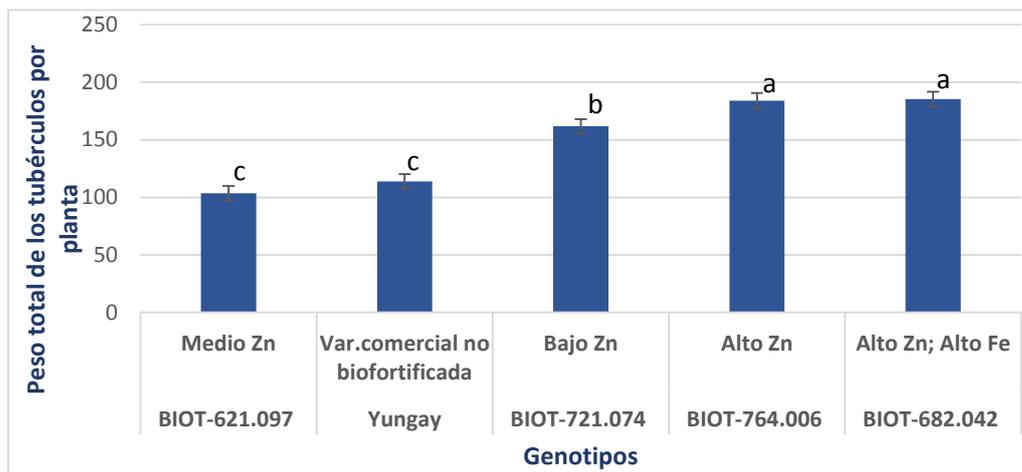


Figura 24: Efecto de los genotipos en el peso total de los tubérculos por planta.

Letras diferentes corresponden a diferencias significativas.

La respuesta de la variedad no biofortificada Yungay en condiciones de maceta, revela valores menores a lo encontrado por Solano (2019), quien encontró 143.19 g planta en promedio de tubérculo para la variedad y fue 1.26 veces superior a lo encontrado en este estudio bajo las mismas condiciones. Mientras que, en condiciones de campo, valores superiores fueron encontrados por Leiva (2021) quien encuentra el máximo valor observado por la variedad Yungay con 1.47 kg de tubérculos por planta en comparación con BIOT-764.006 (Alto en Zn) con promedio de 1.16 kg de tubérculos por planta. Esto demuestra que para Yungay y los clones biofortificados no hay un mismo comportamiento en condiciones de invernadero.

Las aplicaciones foliares de zinc no influyeron en el peso promedio de los tubérculos por planta (Tabla 17). Estos resultados son consistentes con Velez (2013) y Gavilanes (2015) quienes demuestran que la fertilización foliar y edáfica con Zinc no influye en el peso total de los tubérculos por planta para la variedad INIAP-Natividad, ya que no se detectaron diferencias significativas en los tratamientos y en la interacción con la variedad en condiciones de invernadero y campo respectivamente. A diferencia de Jasim et al. (2013) quien encontró que plantas de papa tratadas foliarmente durante cuatro oportunidades con fertilizante alto en K con macros y micronutrientes, aumento el tamaño de tubérculos e incrementó el peso de tubérculos por planta en condiciones de campo para las 7 variedades de papa trabajadas en su estudio (Draga, Aladin, Elpaso, Kurado, Diseree, Provento y Red Brown).

4.2.3. Peso promedio de los tubérculos (ATW)

No se encontraron diferencias significativas entre las aplicaciones foliares y en la interacción entre los genotipos por tratamientos para el peso promedio de tubérculos. Sin embargo, esta variable mostro un efecto significativo entre genotipos (Tabla 17).

La prueba de comparación de medias de Tukey indicó que la variedad comercial no biofortificada Yungay, el genotipo BIOT-621.097 (Medio Zn) y el genotipo BIOT-721.074 (Bajo Zn) fueron estadísticamente iguales pero superiores al genotipo BIOT-764.006 (Alto Zn) ($p < 0.05$) y BIOT-682.042 (Alto Zn; Alto Fe) (Figura 25). Lo reportado para los clones biofortificados altos en Zn pueden deberse a la cantidad de tubérculos pequeños y numerosos en comparación a los demás genotipos, mientras que peso promedio era mayor cuanto más grande fuera el tamaño de los tubérculos grandes como lo presentó Yungay (Ozkaynak; 2021). Estas diferencias indican la característica intrínseca de cada genotipo, donde un clon biofortificado con concentraciones altas en Zn, afectan negativamente (disminuye) el peso promedio de los tubérculos que representa el tamaño, lo cual responde a lo encontrado por Amoros et al. (2020) durante los tres ciclos de selección sobre el peso promedio ($r = -0.05$; $r = -0.28$; $r = -0.18$) y una correlación de -0.11 de acuerdo con lo encontrado en este estudio.

Estos resultados son congruentes con lo encontrado por Leiva (2021) en condiciones de campo, donde muestran una relación positiva con el máximo valor observado para la variedad Yungay con un valor promedio de 109.5 g por tubérculo, mientras que el mínimo valor observado fue de 35.7 g por tubérculo para el clon biofortificado BIOT-764.006 (Alto Zn). Se entiende que a medida que aumenta el número de tubérculos, estos tienden a ser más pequeños, y este patrón se mantiene tanto en invernadero como en campo.

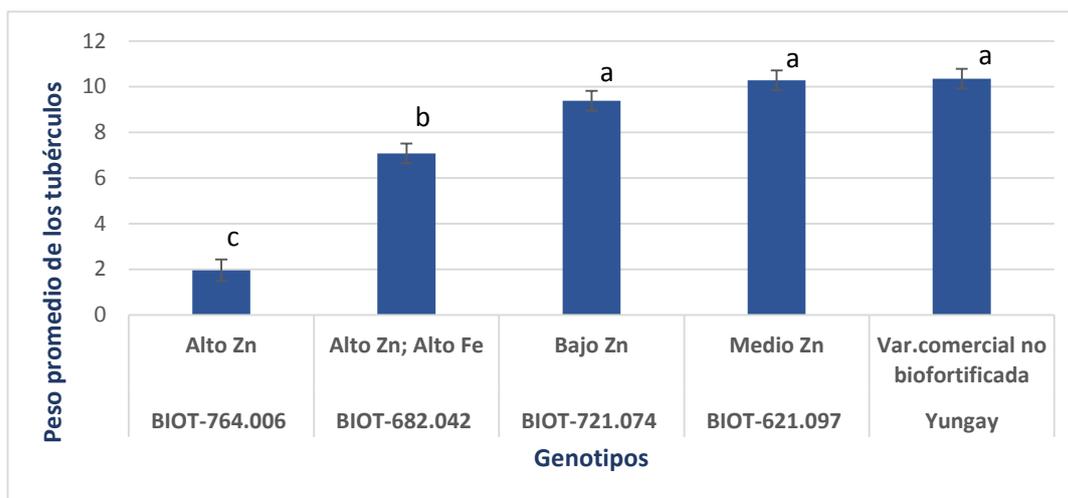


Figura 25: Efecto de los genotipos en el peso promedio de los tubérculos.

Letras diferentes corresponden a diferencias significativas.

Por otro lado, las aplicaciones foliares de Zn no tuvieron efecto en el peso promedio de los tubérculos (Tabla 17). En esa línea, Kromann et al. (2017) no encontraron efectos significativos en la aplicación foliar de Zn para el rendimiento en la variedad INIAP-Natividad y Chaucha roja en condiciones de invernadero y campo. En otros estudios en condiciones de campo, aumentar las concentraciones de Zn en tubérculos de papa de la variedad UNICA mediante fertilizantes foliares no muestran respuestas significativas al rendimiento, pero sí una tendencia a disminuirlo (Gutierrez, 2018). White et al. (2017) también observaron un efecto negativo, pero no significativo en el rendimiento de tubérculos en los genotipos ‘Vales Everest’ y ‘Golden Millennium’ a medida que la concentración de Zn aumentaba debido a la fertilización foliar.

Otros autores argumentan que la aplicación de Zn influye en incrementar el tamaño de los tubérculos y disminuye la cantidad de tubérculos pequeños (Hafeez, 2013; Mengist et al., 2021). Sin embargo, la utilización de clones biofortificados para este experimento no muestra esos efectos. Mousavi et al. (2007) encontraron que la aplicación foliar incremento el peso promedio de los tubérculos con una concentración de 8 mg/L de sulfato de Zn a 75.59 g, que resulto en un 7.2% de incremento en comparación con la aplicación de 0 mg/L.

4.3. Variables analizadas durante la poscosecha.

La Tabla 18 presenta el análisis de varianza para las variables: materia seca (MS), concentración de zinc en tubérculo en base seca (mg kg^{-1} BS) y concentración de hierro en tubérculo en base seca (mg kg^{-1} BS). Estas variables fueron analizadas en laboratorio.

Tabla 18: Análisis de varianza para las variables MS, Concentración de Zn y Fe evaluadas a la poscosecha.

| Fuentes de Variación | Cuadrados medios | | | |
|-------------------------|------------------|----------|------------------------------|------------------------------|
| | GL. | MS (%) | Micronutrientes | |
| | | | Zn (mg kg^{-1} BS) | Fe (mg kg^{-1} BS) |
| Repeticiones (rep) | 3 | 2.51 | 1.63 | 0.25 |
| Dosis de aplicación (D) | 1 | 0.00 | 247.91*** | 0.52 |
| Genotipo (G) | 4 | 30.52*** | 35.01*** | 76.46*** |
| D*G | 4 | 1.72 | 18.47** | 1.29 |

Niveles de significancia : 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

4.3.1. Porcentaje de Materia seca en tubérculos (MS)

La materia seca define un material donde se le extrae toda el agua posible (Gavilanes, 2015). El contenido de materia seca tiene una relación estrecha con el contenido de almidón, esto es relevante a nivel industrial ya que influye en la producción y calidad de los tubérculos (Porrás-Martínez y Brenes-Angulo, 2015). En tubérculos, el componente mayoritario en materia seca corresponde al almidón, cuyo contenido en el cultivo de papa es de 20 g MS 100 g^{-1} según (Robertson et al., 2018). La disponibilidad de nutrientes en el suelo influye en la magnitud de los nutrientes en absorción, y en la acumulación de estos distribuida en las diferentes partes de la planta que posteriormente conformaran la materia seca (Mengel y Kirkby, 2000).

La materia seca analizada en el tubérculo no refleja efectos ante la aplicación de fertilización foliar ni en la interacción. Sin embargo, se encontró diferencias significativas entre las medias de los genotipos (Tabla 18). El genotipo BIOT-721-074 (Bajo en Zn) tuvo el mayor contenido de materia seca frente a todos, pero respondió igual al genotipo BIOT-621.097 (Medio Zn), y este fue mientras estadísticamente similar a Yungay, le siguieron los clones BIOT-764.006 (Alto Zn) y BIOT-682.042 (Alto Zn; Alto Fe) los cuales tuvieron menor valor en comparación con el resto (Figura 26). La respuesta de los clones biofortificados altos en

Zn obedece a lo encontrado por Amoros et al. (2020) quienes correlacionan una ligera disminución en el contenido de MS cuando se incrementan los niveles de Zn. La misma respuesta es encontrada en tres cultivares diploides de los grupos *Solanum tuberosum* con correlaciones negativas en promedio entre el contenido de materia seca y la concentración de Zn (Rango: -0.38 a -0.14) (Paget et al., 2014). Esto significa que las diferencias genóticas responden a la característica genética de cada clon biofortificado respecto a sus niveles de Zn.

En condiciones de invernadero, el porcentaje de materia seca en tubérculos para este ensayo representó entre el 23 y 28%. Este resultado para Yungay y los clones biofortificados logra ser superior que lo encontrado por Salas et al. (2021) con un 19.31% MS y 22.90% MS respectivamente, en los ensayos experimentales en Sierra Sur, Central y Norte bajo condiciones de campo de 11 localidades. Además, fueron mayores a lo encontrado por Leiva (2021) en su estudio en Cajamarca, donde mostró que para los mismos clones biofortificados y las variedades comerciales tuvo un promedio de 21.9% y 21.1%, respectivamente. Dado que el desarrollo del cultivo en ambientes favorables determina que cerca del 90% de fotosintatos son translocados hacia los tubérculos desde las hojas; las respuestas de cada genotipo para materia seca en este experimento aún con limitaciones resultaron óptimas bajo condiciones de invernadero (Flores-López et al., 2020).

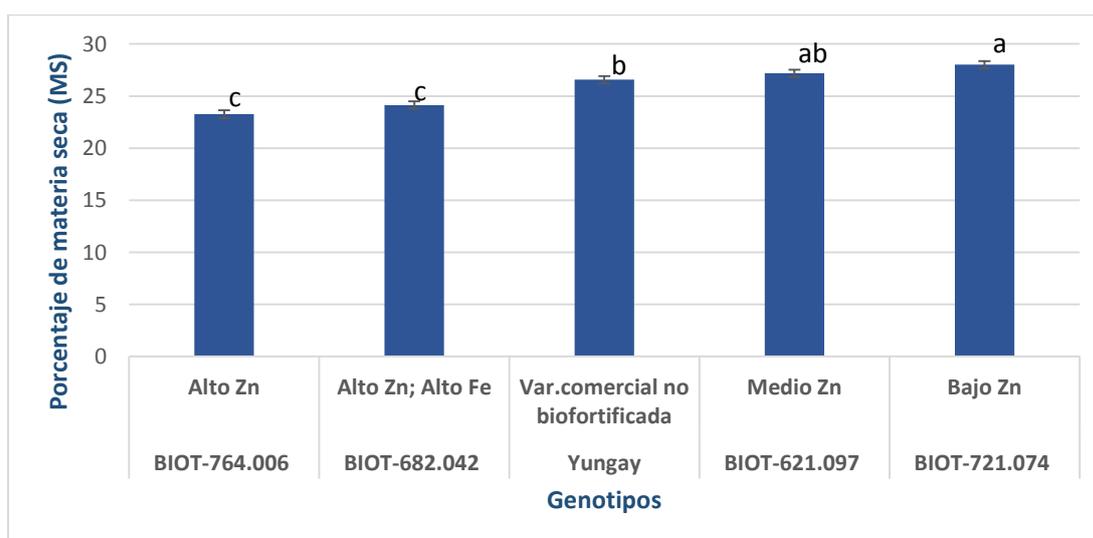


Figura 26: Efecto de los genotipos en la materia seca.

Letras diferentes corresponden a diferencias significativas.

Dado que el porcentaje de materia seca solo varía de acuerdo con las características genotípicas (Tabla 18). Velez (2013) encontró que la fertilización foliar y edáfica con zinc no influye en la materia seca bajo invernadero, de manera similar Gutierrez (2018) reporta que la materia seca total, materia seca en el tubérculo y en el follaje no muestran respuesta ante la aplicación foliar de zinc para el cultivo de papa en condiciones de campo bajo el mismo suelo de este estudio (pH=7.82).

No obstante, Quispe (2020) reporta diferencias significativas en la aplicación foliar para la materia seca en los tubérculos de la variedad UNICA en condiciones de campo en Cañete (pH=7.14); las cuales fueron 1.12 veces mayores con las aplicaciones foliares que sin ellas. Diferente respuesta fue observada por Acuña (2022), bajo las mismas condiciones (pH=7.74), quien observa un ligero incremento en el contenido de materia seca en pulpa cuando las dosis foliares de zinc son efectuadas en cuatro fraccionamientos en campo, e incrementan en 1.10 cuando las dosis se duplican de 5 a 10 kg ha⁻¹.

Por tanto, es importante considerarlo en las prácticas de manejo agronómico ya que optimizan la absorción de nutrientes y son importantes para afinar los parámetros de distribución de materia seca, rendimiento y calidad en los tubérculos (Alva et al., 2007).

4.3.2. Concentración de Fe en tubérculo en base seca (mg Fe kg⁻¹ BS).

Si bien no existen efectos de la aplicación foliar de Zn en la concentración de Fe en los tubérculos ni en la interacción entre los tratamientos y los genotipos (Tabla 18). Si hubo diferencias estadísticamente significativas entre genotipos para esta variable, la respuesta de los genotipos se observa en la Figura 27, donde el BIOT-764.006 (Alto en Zn) fue estadísticamente igual al BIOT-682.042 (Alto Zn; Alto Fe), le siguen el clon BIOT-721.074 (Bajo en Zn), BIOT-621.097 (Medio en Zn) y en último lugar Yungay.

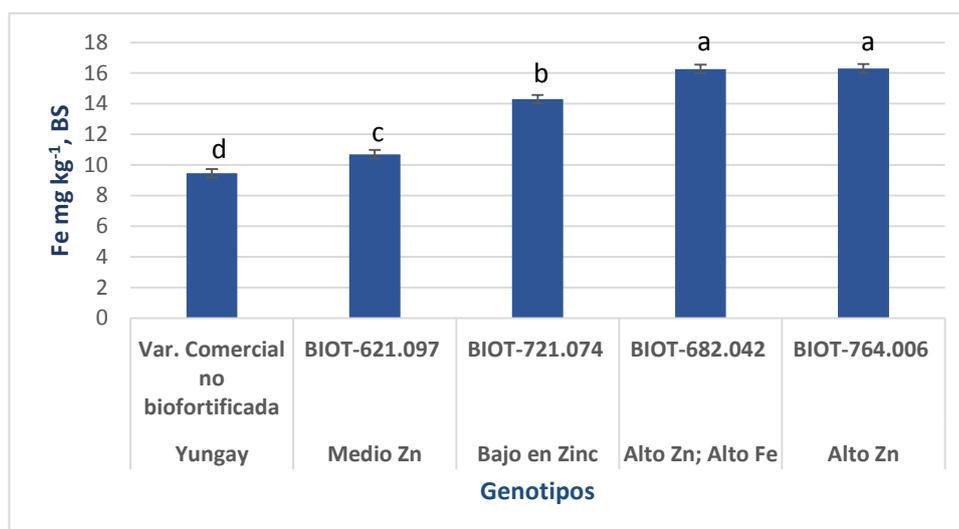


Figura 27: Efecto de los genotipos en la concentración de Fe.

Letras diferentes corresponden a diferencias significativas.

En comparación con lo encontrado en este estudio, el comportamiento respecto a la concentración de Fe de los clones biofortificados con diferentes niveles de Zn se mantienen bajo un suelo ácido de pH=5.43, aunque las concentraciones de hierro son claramente superiores en 59.3% en comparación con lo encontrado en este estudio (Leiva, 2021). Esto se debe a que, que en este experimento no puedan expresar una concentración de Fe mayor debido a que el suelo es limitado en Fe (pH=7.88), menos móvil y tiende a precipitar en formas insolubles, a diferencia del suelo utilizado por Leiva (pH=5.44), lo cual le permitió una expresión superior de los niveles de hierro.

Las aplicaciones foliares de Zn no afectaron la concentración de Fe. En variedades de trigo, Hao et al. (2021) señalaron que las aplicaciones foliares de Zn no fueron significativas en la concentración de Fe bajo un pH=8.0 en condiciones de campo. Mientras que Ierna et al. (2020) demostraron que una aplicación rica en microelementos para el cultivar Bellini de papa, entre ellos el Zn y Fe, logró incrementos superiores al 68.75% para las concentraciones de Fe y 26.92% para las concentraciones de Zn en condiciones de campo bajo un suelo alcalino (pH=7.5).

4.3.3. Concentración de Zinc en tubérculo en base seca (mg Zn kg⁻¹ BS).

Para esta variable las fuentes de variación: Dosis de aplicación, genotipos y la interacción entre las dosis de aplicación y los genotipos fueron altamente significativos (Tabla 18).

El análisis de efectos simples de la interacción D x G mostro diferencias altamente significativas entre el control y la fertilización foliar con zinc para todos los clones biofortificados (Tabla 19). El efecto de la aplicación foliar con zinc para el clon biofortificado BIOT-764.006 fue estadísticamente superior a todos con un incremento en 60.78% respecto al control; seguido de los clones BIOT-721.074, BIOT-682.042 y el clon BIOT-621.097 con un de incremento de Zn de 42.82%, 40.40 % y 27.58 % respectivamente con respecto al control. Mientras que para la variedad comercial Yungay el análisis de efectos simples no mostró diferencias estadísticas entre la aplicación foliar con Zn y el control (Figura 28).

Tabla 19: Análisis de efectos simples de la interacción D x G al evaluar el contenido de Zn en tubérculos de un grupo de clones biofortificados y una variedad comercial.

| Variables | | Zn (mg kg ⁻¹ BS) | | Efectos simples (GxD) |
|-----------------|-------------------------------------|-----------------------------|--------------|-----------------------|
| Tratamientos | | Control | Foliar Zn | Pr> F |
| Genotipo | | | | |
| BIOT-621.097 | (Medio Zn) | 16.35±1.87 b | 20.86±0.84 a | ** |
| BIOT-682.042 | (Alto Zn; Alto Fe) | 16.26±1.09 b | 22.83±1.94 a | ** |
| BIOT-721.074 | (Bajo en Zn) | 12.75±0.49 b | 18.21±1.21 a | ** |
| BIOT-764.006 | (Alto Zn) | 16.37±0.83 b | 26.32±1.01 a | ** |
| Yungay | Var. Comercial No Biofortificada | 17.73±2.85 | 18.81±1.58 | n.s. |
| \bar{x} | | 15.89 | 21.4 | |

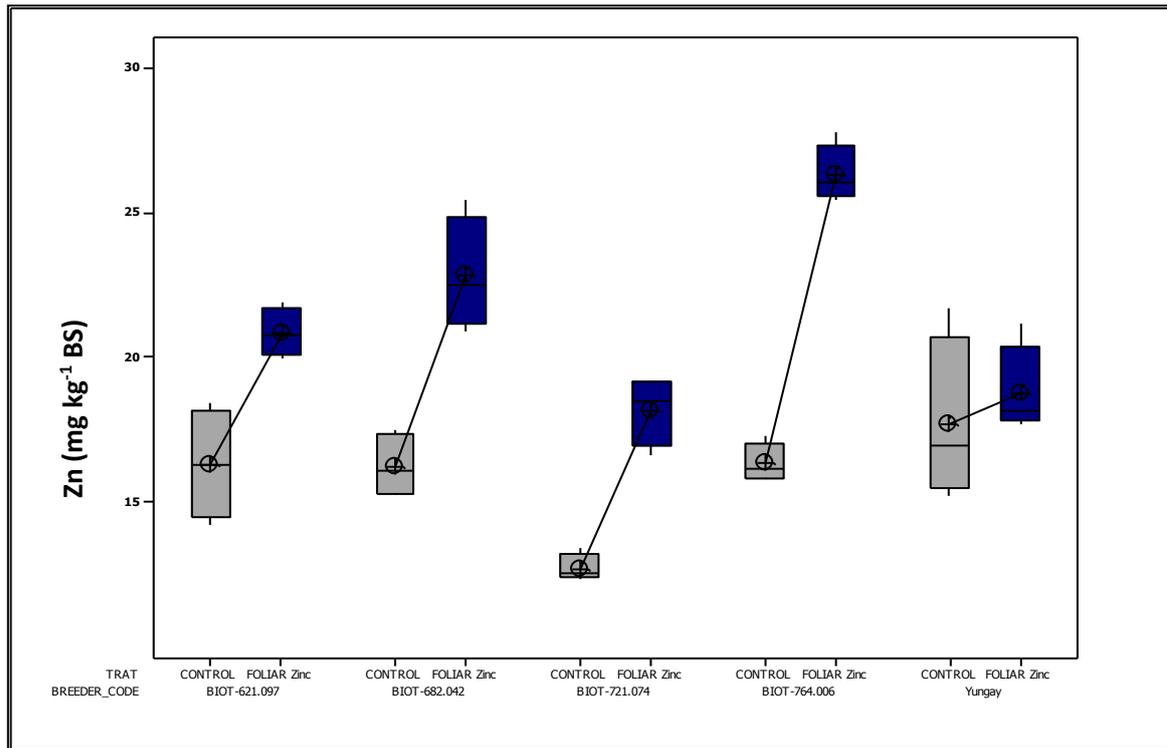


Figura 28: Concentración de Zinc (mg kg⁻¹ BS) por genotipos bajo tratamiento control (sin fertilización) y con fertilización foliar.

De igual forma el trabajo de Qaswar et al. (2017) encontraron que variedades mejoradas biofortificadas tuvieron mayor concentración de Zn en comparación con la variedad estándar de trigo en suelos calcáreos en condiciones de campo. El uso de los clones biofortificados con diferentes niveles de Zn, entendidos como plantas eficientes en Zn tienen tasas máximas de absorción y valores de afinidad más altos en su distribución que plantas ineficientes en Zn o no biofortificados (Sadeghzadeh y Rengel, 2011).

En el suelo, la distribución del Zn es determinada por el pH y su movilidad se encuentra reducida a un nivel mayor a pH=7 (Loue, 1988; Sadeghzadeh y Rengel, 2011). Para este experimento, el pH de este suelo fue de 7.88 y la presencia de zinc disponible fue alta (15.75 mg kg⁻¹). Sin embargo, a un pH elevado, la solubilidad del Zn disminuye debido a su forma adsorbida de Zn(OH)₂ (Broadley et al., 2011) y el Zn puede precipitar en formas insolubles como ferrita de Zn (ZnFe₂O₄), silicatos de Zn (ZnSiO₄), sulfato de Zn o fosfato de Zn. Además, dada la presencia de carbonatos (CaCO₃=1.86%), a un rango de pH entre 7 y 8.6, el Zn precipita en su forma ZnCO₃ (Thomson y Troeh, 1988; Escudero-Almanza et al., 2012), lo cual reducirán la solubilidad de Zn en los suelos, principalmente el Zn²⁺ disponible

para las planta (Sadeghzadeh y Rengel, 2011). Otro factor es la interacción entre P y Zn, un alto contenido de P (39 mg kg^{-1}) encontrado en este experimento en suelo alcalino, y con materia orgánica baja (1.48 %) reducen la absorción de Zn (Akhtar et al., 2019).

Si la adquisición de nutrientes está limitada por los minerales del suelo y las condiciones ambientales que regulan la disponibilidad de minerales (Reichert, 2009), capacidad del crecimiento de raíces para absorber nutrientes con baja movilidad en el suelo como el Zn (Mengel y Kirkby, 2000) o liberar compuestos movilizadores como exudados en la rizosfera (Sadeghzadeh y Rengel, 2011). Esta interacción entre la extracción de minerales por parte del suelo y la interacción entre estos no fue calculada en este estudio, por lo cual los diferentes mecanismos mencionados no fueron determinantes. Pero si lo fueron, los mecanismos propios de los rasgos específicos del genotipo, donde el uso de clones biofortificados permitió mostrar su potencial genético, a pesar de crecer en un suelo alcalino con disponibilidad reducida de Zn (Alloway, 2008; Sadeghzadeh y Rengel, 2011). Además, la aplicación foliar fue vital para contrarrestar la baja disponibilidad de Zn en el suelo y lograr altas concentraciones de Zn en el tubérculo (White y Broadley, 2011).

Aunque White et al. (2017) mencionan que la biofortificación con Zn se restringe debido a la movilidad limitada del Zn en el floema. En la aplicación foliar, cuando el Zn se exporta desde las hojas hacia el tubérculo a través del floema (Marschner, 1995), la movilidad del Zn en el transporte desde el floema conduce a su capacidad en la distribución de minerales hacia los órganos de demanda (Fernandez et al., 2015), lo cual es afectado por la variación genotípica (clones biofortificados altos en Zn), suministro de nutrientes (aplicación foliar con Zn) y el factor ambiental (condiciones de invernadero) (Reichert, 2009). En la savia floemática, bajo aplicaciones foliares, la concentración de Zn se eleva y su movilidad aumenta conforme los complejos orgánicos formados en la fotosíntesis junto al Zn^{+2} (Gupta et al., 2016; Akhtar et al., 2019).

La investigación realizada por Leiva (2021) donde compara los mismos clones de papa biofortificados (Rango: $13\text{-}16.4 \text{ mg Zn kg}^{-1}$) en la campaña 2018-2019 en Cutervo cuyo suelo fue ácido ($\text{pH}=5.44$) y con bajo contenido de Zn disponible (1.39 mg kg^{-1}) muestra que en condiciones campo, los clones biofortificados respondieron a las condiciones del suelo, donde el Zn se presenta en su forma disponible Zn^{+2} (Sadeghzadeh y Rengel, 2011). Sin embargo, no mostraron todo su potencial genético para las concentraciones de Zn en los

tubérculos, comparado con las condiciones de maceta bajo un suelo alcalino (pH=7.88) donde las concentraciones de Zn obedecen a las aplicaciones foliares, por lo cual fue un 56.03% superior en comparación a lo encontrado por Leiva (Tabla 20). Esta diferencia respondería la capacidad de los clones biofortificados de translocar el Zn aplicado vía foliar hacia los tubérculos a pesar de crecer en condiciones limitantes. Además, cabe resaltar que los genotipos BIOT-764.006 (alto en Zn) y BIOT-682.042 (alto en Zn y Fe) mantienen el mismo comportamiento en condiciones de invernadero y logran potenciar aún más su contenido de Zn con la fertilización foliar en comparación con los demás genotipos.

Tabla 20: Comparación de estudio realizado por Leiva (2021) y este experimento.

| | Cutervo (Leiva, 2021) | La Molina | |
|--|--|------------------|--------------|
| Altitud | 2,666 m.s.n.m | 243 m.s.n.m | |
| Condición | Campo | Invernadero | |
| pH | 5.44 | 7.88 | |
| Zinc disponible (mg kg ⁻¹) | 1.39 | 15.75 | |
| Tratamientos | Aplicación foliar (0.1% ZnSO ₄ . 7H ₂ O) | | |
| Genotipos | Contenido de Zn (mg kg⁻¹) | | |
| Bajo en Zinc | BIOT-721.074 | 13.5 | 18.21 |
| Var. Comercial no biofortificada | Yungay | 10 | 18.81 |
| Medio Zn | BIOT-621.097 | 13 | 20.87 |
| Alto Zn; Alto Fe | BIOT-682.042 | 15.7 | 22.83 |
| Alto Zn | BIOT-764.006 | 16.4 | 26.32 |
| \bar{X} | | | 21.41 |

La Figura 28 muestra que los tratamientos fertilizados vía foliar incrementaron los contenidos de Zn en tubérculos en promedio de 21.40 mg Zn kg⁻¹ BS (Rango: 18.21-26.32) mientras que los tratamientos sin aplicación (0% p/v) tuvieron en promedio 15.89 mg Zn kg⁻¹ BS (Rango: 12.75-17.73), esto representó un incremento de 34.68% con respecto al tratamiento control. White et al. (2012) reportan que las fertilizaciones foliares logran concentraciones de tubérculos máximas que siguen una curva de saturación hasta 30 mg Zn kg⁻¹ en el cultivar Maris Piper bajo condiciones de campo a una tasa de aplicación foliar de Zn de 1.08 g planta. En otras investigaciones también se encontraron que la mejor respuesta para el contenido de zinc en tubérculos fue mediante aplicaciones foliares (Zhao et al., 2014; Kromann et al., 2017; White et al., 2017; Gutierrez, 2018).

Gutierrez (2018) muestra un incremento en el contenido de Zn en pulpa hasta un 47.7% (Rango: 17.6 a 26 mg kg⁻¹) en el cultivo de papa en condiciones de campo bajo el mismo suelo de este experimento con aplicaciones foliares de 5 kg Zn ha⁻¹, representó un incremento de 1.47 veces de Zn. El contenido de Zn en los tubérculos logro un incremento de 1.13 veces de Zn o 13.85%, cuando se comparó aplicaciones foliares de 5 kg Zn ha⁻¹ versus los tratamientos sin aplicación foliar para la variedad UNICA (Rango: 104.34-118.80 mg kg⁻¹) (Quispe, 2020). Ierna et al. (2020) en el cultivar Bellini no biofortificado, encuentran incremento significativo de Zn del 27% en el tubérculo bajo un suelo alcalino debido al efecto de la fertilización foliar con micronutrientes. En otros cultivos, Zou et al. (2019) lograron incrementar las concentraciones de zinc en un 60.83% para trigo de 28.6 mg kg⁻¹ a 46 mg kg⁻¹ con aplicaciones foliares de zinc a una concentración de 0.5% de sulfato de zinc heptahidratado en condiciones de campo en seis localidades bajo un pH alcalino. Mientras que, para condiciones de este estudio, el clon biofortificado alto en Zn con solo 0.1% de ZnSO₄.7H₂O de aplicación foliar logro un incremento superior de 1.6 veces o 60.49% (Tabla 20).

White et al. (2017) logran incrementos en una relación de 2.9, 1.9, 1.7, 2.2 de tubérculos agrónomicamente biofortificados en relación con los tubérculos sin aplicación foliar para los cultivares 'Saxon', 'Golden Millenium', 'Vales Everest' y '12601ab1', respectivamente a una dosis de 3.6 g Zn parcelas⁻¹ y con 4 aplicaciones en condiciones de campo. Kromann et al. (2017) en el experimento realizado en invernadero encontraron una variación de 8.1 a 21.6 mg Zn kg⁻¹ BS en el cultivar INIAP-Natividad y de 12.5 a 30.9 mg Zn kg⁻¹ BS en el cultivar Chaucha Roja, respecto al tratamiento sin aplicación de Zn, y mostró un incremento total de 2.6 veces de Zn. Probablemente, este incremento responda a la aplicación combinada que Kromann et al. (2017) utilizaron tanto con aplicaciones foliares y hacia el suelo además de las cinco oportunidades de aplicación que empleó.

Si bien para este estudio se dieron 2 aplicaciones en la fertilización con zinc, probablemente mayores fraccionamientos en la etapa de crecimiento del cultivo responderían a movilizar más el zinc y conseguir una mayor concentración de zinc en el tubérculo, al aplicar zinc foliar varias veces, los cuales no fueron probados en este estudio. Si bien en este estudio las aplicaciones foliares se dieron a los 60 y 74 ddt, se sugiere asociar el momento de aplicación a las etapas finales del desarrollo del tubérculo, ya que permitiría una alta absorción de minerales de los clones biofortificados y mejorar las concentraciones de Zn (Cakmak, 2008,

2010) lo cual responde a una alta distribución de minerales a los tubérculos, ya que son los sumideros dominantes tanto de carbohidratos como de minerales (Reichert, 2009). Cakmak (2008) encontró que la aplicación de Zn (foliar) antes de la antesis en la etapa de macollamiento y elongación del tallo conducía a una concentración de Zn significativamente mayor en los granos. También Ozturk et al. (2006) encontraron concentraciones más altas de Zn en granos de trigo afectados por la aplicación foliar de Zn iniciada al inicio del alargamiento del tallo. En estudios de Reichert (2009) la removilización de Zn en diferentes genotipos de papa desde los tejidos de la hoja o del tallo hasta el tubérculo depende en gran medida de la etapa de crecimiento.

Precisamente, esta variación genotípica en el uso de los clones biofortificados para los diferentes niveles de Zn en los tubérculos tenga diferentes capacidades de almacenamiento o fuerza de sumidero y responda a la intensidad en la movilización de Zn en el floema de cada genotipo, lo cual aún necesita ser estudiado (Fernández et al., 2015). Subramanian et al. (2011) mencionan que la distribución de minerales varía en el tubérculo de papa y depende de los mecanismos de transporte, carga y descarga del floema y otros. Aunque algunos de los mecanismos fisiológicos implicados en la eficiencia de Zn disponen de información limitada sobre el control genético de los mecanismos y genes responsables. Líneas de centeno han demostrado que la eficiencia de los nutrientes como Zn, Cu y Mn, son rasgos independientes en diferentes cromosomas y en siete cultivares de trigo se mostró que los genes que controlan la eficiencia de Zn son dominantes (Cakmak et al., 1997). De este modo, dada la variación genética significativa para la eficiencia de Zn, se sugiere que la selección mediante el desarrollo de marcadores moleculares mejoraría la eficiencia del Zn, identificando genes responsables de las diferencias en las respuestas al Zn (Sadeghzadeh y Rengel, 2011). Finalmente, se ha demostrado que existe una variabilidad en la concentración de Zn en tubérculos entre genotipos de papa, así como la interacción entre los genotipos y el ambiente (Burgos et al., 2007; Salas et al., 2021).

4.3.4. Matriz de correlación de los componentes de rendimiento y calidad vs concentración de Zn con y sin aplicación foliar.

En la Tabla 21 se observan los resultados de la correlación de Pearson entre las variables evaluadas en la fase vegetativa, cosecha y poscosecha versus la concentración de Zn, para el tratamiento sin fertilización foliar y con fertilización foliar de Zn.

En comparación con el tratamiento sin fertilización foliar (0 % p/v):

- El peso de los tubérculos (TTWP), el número de tallos (SNPP) y la altura de planta (PLAHE) resultaron negativa y significativamente correlacionados con el contenido de Zn a nivel de tubérculos.
- Para la concentración de Fe a nivel de tubérculo, se rompe la correlación positiva y significativa con el contenido de Zn reportado en trabajos anteriores con el mismo material genético (Burgos et al., 2007; Paget et al., 2014; Amoros et al., 2020; Salas et al., 2021). Esto se atribuye a las condiciones del suelo alcalino (pH=7.88) donde el contenido de Zn, que a pesar de ser alto (15.75 mg kg⁻¹), no estaba disponible a la planta. Esto debido a que los micronutrientes como el Zn, son menos solubles a un pH básico, mostrando menos movilidad, poca solubilidad y tendiendo a precipitar en formas no solubles.

En comparación con el tratamiento de fertilización con zinc (0.1% p/v):

- Solo se encontraron correlaciones negativas y significativas en el peso promedio de los tubérculos (AWT) y el porcentaje de materia seca (MS), es decir, que con el incremento de la concertación de Zn en los tubérculos habrá una disminución del peso promedio y del contenido de materia seca a nivel de tubérculo. Mientras que la variable número de tubérculos por planta (TNTP) respondió positiva y significativamente, es decir, con el incrementó los contenidos de Zn se incrementa el número de tubérculos por planta.
- Estas respuestas son consistentes con los resultados de Amoros et al. (2020), quienes demuestran que concentraciones altas en Zn de los genotipos disminuyen el peso promedio de los tubérculos (AWT) y que a medida que las concentraciones de Zn se eleven en los clones biofortificados, se aumentaría el número total de tubérculos por planta (TNTP). Gavilanes (2015) y White et al. (2017) coinciden en que las aplicaciones foliares de Zn pueden limitar el rendimiento.
- La relación negativa entre la materia seca y la concentración de Zn en el tubérculo encontrado en este estudio concuerda con los hallazgos previos de Velez (2013) y Gutierrez (2018) quienes trabajaron con variedades comerciales no biofortificadas y aplicaciones foliares de Zn en condiciones de invernadero y campo, respectivamente. Por otro lado, Paget et al. (2014) y Amoros et al. (2020), en condiciones de campo, encuentran correlaciones negativas entre la materia seca (MS) y la concentración de

Zn en los clones biofortificados provenientes del programa de mejoramiento del Centro Internacional de la papa (CIP).

- Para las concentraciones de Fe vs Zn, se observó una correlación positiva y altamente significativa ($r=0.65$). Se debe resaltar que biofortificar agrónomicamente con Zn vía foliar mantuvo una correlación positiva entre el Fe y Zn bajo las condiciones del experimento. Al igual que los trabajos reportados en campo (Burgos et al., 2007; Paget et al., 2014; Amoros et al., 2020a; Salas et al., 2021) a pesar de los bajos contenidos de zinc en el suelo ($0.3-3.9 \text{ mg kg}^{-1}$), se tiene una presencia de zinc soluble y disponible a la planta gracias a al pH ácido del suelo (pH entre 4.1- 5.4); donde el potencial genético de los clones biofortificados para Zn pudo expresarse, mostrándose así una correlación positiva y significativa ($r=0.69$) entre el Fe y Zn (Salas et al, 2021). De la misma manera, Hao et al. (2021) encuentran bajo su experimento en campo, de suelo alcalino pH=8.0 y $0,98 \text{ mg kg}^{-1}$ de Zn extraíble, que aplicaciones foliares de Zn al 0.5% (p/v) de $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, logran correlaciones positivas y altamente significativas en dos campañas, 2017-2018 y 2018-2019 con $r=0.32^{***}$ y $r=0.20^{***}$, respectivamente, para los cultivares de trigo en la concentración de Zn y Fe en el grano.

Por tanto, las aplicaciones foliares de Zn al 0.1% p/v de $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ bajo un suelo de similar pH, permitieron demostrar que fueron suficientes para expresar la misma respuesta que las reportadas en condiciones de campo para las concentraciones de Fe y Zn a pesar de las limitaciones de zinc soluble en el suelo en este estudio.

Tabla 21: Correlaciones respecto al tratamiento control y foliar para la concentración de Zn.

| Zn | Plant_ | | | | | | | | |
|---------------------------------|----------|---------|----------|----------|----------|-------|-------|----------|---------|
| | TTWP | TNTP | AWT | SNPP | PLAHE | Vigor | SE | MS | Fe |
| Sin fertilización foliar | -0.52*** | -0.02 | -0.11 | -0.58*** | -0.72*** | -0.26 | -0.14 | -0.32 | -0.32 |
| Fertilización Foliar Zn | 0.31 | 0.81*** | -0.78*** | 0.20 | -0.29 | 0.16 | 0.23 | -0.85*** | 0.65*** |

Nota: *** indica estadísticamente significativo en un nivel $P<0,05$

V. CONCLUSIONES

- La aplicación foliar no afectó a las variables evaluadas en la fase vegetativa, cosecha y poscosecha. Sin embargo, en promedio de todos los genotipos, la aplicación foliar de zinc tuvo un incremento significativo de un 34.42% frente al tratamiento control para las concentraciones de Zn en el tubérculo.
- Los clones biofortificados responden significativamente a la fertilización foliar de Zn incrementando sus concentraciones de zinc en el tubérculo en promedios desde 28% a 61%, a pesar de crecer en suelos limitados y alcalinos (pH=7.88) en comparación con la variedad comercial (no biofortificada) como la Yungay con un incremento promedio del 6%.
- En promedio de todos los genotipos, el contenido de Fe no mostró diferencias significativas entre el tratamiento con aplicación foliar de Zn y el tratamiento control. Se ha demostrado que la biofortificación agronómica y genética son estrategias complementarias que logran incrementos significativos de contenidos de Zn en los tubérculos.

VI. RECOMENDACIONES

- Validar exhaustivamente estos resultados bajo condiciones de campo y en varias localidades.
- Se recomienda validar esta práctica agronómica de fertilización foliar bajo condiciones de invernadero, como método de tamizado para ser utilizado en los ensayos preliminares o intermedios de un programa de mejoramiento de biofortificación.
- Evaluar mayores dosis y oportunidades de aplicación de fertilización foliar con Zn.
- Comparar contenidos de otros elementos a nivel de tubérculo y evaluar su interacción con la aplicación foliar de Zn.
- Evaluar fenotípica y genotípicamente la acumulación y distribución del Zn a nivel de la planta de papa mediante la aplicación foliar de Zn (0.1 % p/v) vs tratamiento control buscando entender los mecanismos fisiológicos implicados.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Abbas, G., Khan, M., Khan, M., Tahir, M., Ishaque, M., y Hussain, F. (2009). Nutrient uptake, growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) as affected by manganese application. *Pakistan Journal of Botany*, 43(1), 607–616.
- Acuña, M. (2022). *Fraccionamiento de la fertilización foliar con zinc en la biofortificación agronómica del cultivo de papa*. (tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.
- Agrawal, R., Kumar, B., Priyanka, K., Narayan, C., Shukla, K., Sarkar, J., y Anshumali, A. (2016). Micronutrient Fractionation in Coal Mine-Affected Agricultural Soils, India. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 96(4), 449–457. <https://doi.org/10.1007/s00128-016-1745-3>
- Aguilar, L., Guadalupe, M., Carrillo, A., Rivera, A., y González, V. A. (2006). Análisis de crecimiento y de relaciones fuente-demanda en dos variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) In *Artículo Científico Rev. Fitotec. Mex* (Vol. 29, Issue 2).
- Akhtar, M., Yousaf, S., Sarwar, N., y Hussain, S. (2019). Zinc biofortification of cereals role of phosphorus and other impediments in alkaline calcareous soils. *Environmental Geochemistry and Health*, 41(5), 2365–2379. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00279-6>
- Alloway, B. (2008). Zinc in soils and crop production. *International Fertilizer Industry Association and International Zinc Association (IZA), Paris*, 1–139. [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1234514](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1234514)
- Alloway, B. (2009). Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. *Environmental Geochemistry and Health*, 31(5), 537–548. <https://doi.org/10.1007/s10653-009-9255-4>

- Alva, A., Hodges, T., Boydston, R., y Collins, H. (2007). Dry matter and nitrogen accumulations and partitioning in two potato cultivars. *Journal of Plant Nutrition*, 25(8), 1621–1630. <https://doi.org/10.1081/PLN-120006047>
- Amezcuca, J., y Lara, M. (2017). Zinc en las plantas. *Ciencia*, 68(3), 28–35. <https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/index.php/vol-68-numero-3>
- Amoros, W., Salas, E., Hualla, V., Burgos, G., De Boeck, B., Eyzaguirre, R., Felde, T., y Bonierbale, M. (2020b). Heritability and genetic gains for iron and zinc concentration in diploid potato. *Crop Science*, 60(4), 1884–1896. <https://doi.org/10.1002/csc2.20170>
- Arana, R. (2021). *Producción de tubérculos de cinco clones avanzados de papa (Solanum tuberosum L. sp. tuberosum) para precocidad.*(tesis de pregrado). *Universidad Nacional del Centro, Perú.*
- Bailey, R., West, K., y Black, R. (2015). The epidemiology of global micronutrient deficiencies. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 66(suppl 2), 22–33. <https://doi.org/10.1159/000371618>
- Bazán, R. (2017). *Manual de procedimientos de los análisis de suelo y agua con fines de riego.* Lima-Perú.
- Beintema, S., Gallego-Castillo, S., Londoño-Hernandez, F., Restrepo-Manjarres, J., y Talsma, E. (2018). Scaling-up biofortified beans high in iron and zinc through the school-feeding program: A sensory acceptance study with schoolchildren from two departments in southwest Colombia. *Food Science and Nutrition*, 6(4), 1138–1145. <https://doi.org/10.1002/fsn3.632>
- Bhutta, A., Das, J. , Rizvi, A., Gaffey, M. , Walker, N., Horton, S., Webb, P., Lartey, A., y Black, R. (2013). Evidence-based interventions for improvement of maternal and child nutrition: What can be done and at what cost? *The Lancet*, 382(9890), 452–477. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)60996-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)60996-4)
- Bouis, H., y Saltzman, A. (2017a). Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. In *Global Food Security* (Vol. 12, pp. 49–58). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.009>

- Bouis, H., y Saltzman, A. (2017b). Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. *Global Food Security*, 12(January), 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.009>
- Broadley, M., Brown, P., Cakmak, I., Rengel, Z., y Zhao, F. (2011). Function of Nutrients: Micronutrients. In *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition* (pp. 191–248). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00007-8>
- Brown, C. (2005). Antioxidants in potato. *American Journal of Potato Research*, 82(2), 163–172. <https://doi.org/10.1007/BF02853654>
- Burgos, G., Amoros, W., Morote, M., Stangoulis, J., y Bonierbale, M. (2007). Iron and zinc concentration of native Andean potato cultivars from a human nutrition perspective. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87(4), 668–675. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2765>
- Cadena, I. (2018). *Evaluación de fertilizantes edáficos quelatados con macro y micronutrientes en el rendimiento de papa (Solanum tuberosum)*. <http://200.12.169.19/handle/25000/15728>
- Cakmak, I. (2008). Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? *Plant and Soil*, 302(1–2), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9466-3>
- Cakmak, I. (2010). Biofortification of cereals with zinc and iron through fertilization strategy. *Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science: Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia, 1-6 August 2010. Congress Symposium 5: Micronutrients in Soils and Plants in Relation to Crop and Human Health*, 2(3), 4–6. [http://www.iuss.org/19th WCSS/Symposium/pdf/1165.pdf](http://www.iuss.org/19th%20WCSS/Symposium/pdf/1165.pdf)
- Cakmak, I., y Kutman, U. (2018). Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. *European Journal of Soil Science*, 69(1), 172–180. <https://doi.org/10.1111/ejss.12437>
- Cakmak, I., y Marschner, H. (1988). Increase in Membrane Permeability and Exudation in Roots of Zinc Deficient Plants. *Journal of Plant Physiology*, 132(3), 356–361. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(88\)80120-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(88)80120-2)
- Cakmak, I., McLaughlin, M. y White, P. (2017). Zinc for better crop production and human health. *Plant and Soil*, 411(1–2), 1–4. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3166-9>

- Cambraia, T., Fontes, R., Vergütz, L., Vieira, R., Neves, J., Netto, P. y Dias, R. (2019). Agronomic biofortification of common bean grain with zinc. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 54. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.PAB2019.V54.01003>
- Da Silva, G., Pereira, A., Carvalho, A., y Azevedo, F. (2019). Yield, frying quality, plant vigor, and maturity of potato clones. *Horticultura Brasileira*, 37(1), 95–100. <https://doi.org/10.1590/s0102-053620190115>
- Dai, H., Wei, S., y Twardowska, I. (2020). Biofortification of soybean (*Glycine max* L.) with Se and Zn, and enhancing its physiological functions by spiking these elements to soil during flowering phase. *Science of the Total Environment*, 740, 139648. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139648>
- Das y Green. (2016). Biofortification of food crops. *Biofortification of Food Crops*, 1–490. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2716-8>
- De Haan, S., Burgos, G., Liria, R., Rodriguez, F., Creed-Kanashiro, H., y Bonierbale, M. (2019). The Nutritional Contribution of Potato Varietal Diversity in Andean Food Systems: a Case Study. *American Journal of Potato Research*, 96(2), 151–163. <https://doi.org/10.1007/s12230-018-09707-2>
- De Valença, A., Bake, A., Brouwer, I., y Giller, K. (2017). Agronomic biofortification of crops to fight hidden hunger in sub-Saharan Africa. In *Global Food Security* (Vol. 12, pp. 8–14). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2016.12.001>
- Delgado, L. (2015). *Fertilización con zinc en dos variedades de papa (Solanum tuberosum) ensuelos de Costa y Sierra*. (tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.
- Demment, M., Young, M., y Sensenig, R. (2018). *Animal Source Foods to Improve Micronutrient Nutrition and Human Function in Developing Countries Providing Micronutrients through Food-Based Solutions: A Key to Human and National Development 1,2*. <https://academic.oup.com/jn/article-abstract/133/11/3879S/4818037>
- Deshi, K., Obasi, M., y Odiaka, N. (2021). Growth and yield of potato (*Solanum tuberosum* L.) as affected by storage conditions and storage duration in Jos, Plateau State, Nigeria. *Open Agriculture*, 6(1), 779–797. <https://doi.org/10.1515/opag-2021-0057>

- Dhaliwal, S., Naresh, R., Mandal, A., Singh, R., y Dhaliwal, M. (2019). Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A review. *Environmental and Sustainability Indicators*, 1–2(May), 100007. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2019.100007>
- Egúsquiza, R. (2014). La papa en el Perú. Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM). Lima, Perú.
- Eichert, T., y Fernández, V. (2011). Uptake and Release of Elements by Leaves and Other Aerial Plant Parts. In *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition* (pp. 71–84). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00004-2>
- Escudero-Almanza, D., Ojeda-Barrios, L., Hernández-Rodríguez, A., Sánchez, E., Ruíz-Anchondo, T., y Sida-Arreola, J. (2012). Review carbonic anhydrase and zinc in plant physiology Carbonic anhydrase (CA). (EC: 2.4.1. *Chilean Journal of Agricultural Research*.72, 1.
- Estrada, V., Márquez, C., De la Cruz, E., Osorio, R., y Sánchez, E. (2018). Biofortificación de frijol caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp) con zinc: efecto en el rendimiento y contenido mineral. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 20, 4149–4160. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i20.986>
- FAO, IFAD, WFP, y WHO. (2022). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2022. Purposing food and Agricultural Policies to Make Healthy Diets More Affordable*. <https://www.fao.org/3/cc0639en/cc0639en.pdf>
- Fernández, V., Sotiropoulos, T., y Brown, P. (2015.). *Fertilización Foliar: Principios Científicos y Prácticas de Campo*. <https://www.researchgate.net/publication/283908842>
- Flores-López, R., Casimiro-Marín, M., Sotelo-Ruiz, E., Rubio-Covarrubias, O., y López-Delgado, H. (2020). Fertilización NPK, distribución de biomasa y número de minitubérculos de papa en invernadero. *Revista Mexican Ciencias Agrícola*, 11(8).
- Gabriel et al., J. (2016). Agronomic biofortificación in two native potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.). *Revista Latinoamericana de La Papa*, 19(2). <https://doi.org/10.37066/ralap.v19i2.230>

- Gannon, B., Kaliwile, C., Arscott, S., Schmaelzle, S., Chileshe, J., Kalungwana, N., Mosonda, M., Pixley, K., Masi, C., y Tanumihardjo, S. (2014). Biofortified orange maize is as efficacious as a vitamin A supplement in Zambian children even in the presence of high liver reserves of vitamin A: A community-based, randomized placebo-controlled trial. *American Journal of Clinical Nutrition*, 100(6), 1541–1550. <https://doi.org/10.3945/ajcn.114.087379>
- Garzón, C. (2014). *Efecto de cuatro categorías de semilla en el rendimiento de papa (Solanum tuberosum L.) variedad Superchola* (tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
- Gavilanes, L. (2015). *Efecto de la fertilización foliar y edáfica con Hierro y Zinc para la biofortificación agronómica del tubérculo de papa (Solanum tuberosum L.)*. (tesis de pregrado). Escuela Superior Politecnica de Chimborazo, Ecuador.
- Gavilanes, L., Caballero, D., Cabezas, A., Kromann, P., y Potosí, B. (2015). *Efecto De La Fertilización Foliar y Edáfica Con Hierro y Zinc Para La Biofortificación Agronómica Del Tubérculo De Papa (Solanum tuberosum L.)*. www.desarrollosocial.gob.ec/wpcontent/uploads/2012/07/2_tripty.
- Gibson, R., Raboy, V., y King, J. (2018). Implications of phytate in plant-based foods for iron and zinc bioavailability, setting dietary requirements, and formulating programs and policies. *Nutrition Reviews*, 76(11), 793–804. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuy028>
- Global, P. (2015). BIOFORTIFICATION: An Agricultural Investment for Nutrition. *Policy Brief, 1*, 1–8.
- Gomez-Coronado, F., Poblaciones, M., Almeida, A., y Cakmak, I. (2016). Zinc (Zn) concentration of bread wheat grown under Mediterranean conditions as affected by genotype and soil/foliar Zn application. *Plant and Soil*, 401(1–2), 331–346. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2758-0>
- Greco, M., Chiappetta, A., Bruno, L., y Bitonti, M. (2012). In *Posidonia oceanica* cadmium induces changes in DNA methylation and chromatin patterning. *Journal of Experimental Botany*, 63(2), 695–709. <https://doi.org/10.1093/jxb/err313>
- Grigoriadou, K., y Leventakis, N. (1999). Large scale commercial production of potato minitubers, using in vitro techniques. *Potato Research*, 42(3–4), 607–610. <https://doi.org/10.1007/BF02358178>

- Grusak, M. (2002). Enhancing mineral content in plant food products. *Journal of the American College of Nutrition*, 21, 178S-183S. <https://doi.org/10.1080/07315724.2002.10719263>
- Gupta, N., Ram, H., y Kumar, B. (2016). Mechanism of Zinc absorption in plants: uptake, transport, translocation and accumulation. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 15(1), 89–109. <https://doi.org/10.1007/s11157-016-9390-1>
- Gutierrez, P. (2018). *Biofortificación agronómica del cultivo de papa mediante aplicación foliar y edáfica de Zinc y su interacción con Cadmio*. (tesis de posgrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.
- Guttieri, M., Peterson, K., y Souza, E. (2006). Agronomic performance of low phytic acid wheat. *Crop Science*, 46(6), 2623–2629. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.01.0008>
- Hafeez, B. (2013). Role of Zinc in Plant Nutrition- A Review. *American Journal of Experimental Agriculture*, 3(2), 374–391. <https://doi.org/10.9734/ajea/2013/2746>
- Hagh, E., Mirshekari, B., Ardakani, M., Farahvash, F., y Rejali, F. (2016b). Biofortificación y aumento del rendimiento del maíz a través del manejo bioquímico de los nutrientes orgánicos. *Idesia*, 34(5), 37–46. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292016005000026>
- Haider, M., Farooq, M., Nawaz, A., y Hussain, M. (2018). Foliage applied zinc ensures better growth, yield and grain biofortification of mungbean. *International Journal of Agriculture and Biology*, 20(12), 2817–2822. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0840>
- Hao, B., Ma, J., Jiang, L., Wang, X., Bai, Y., Zhou, C., Ren, S., Li, C., y Wang, Z. (2021). Effects of foliar application of micronutrients on concentration and bioavailability of zinc and iron in wheat landraces and cultivars. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02088-3>
- HarvestPlus, y Center DDGs Research. (2018). *CGIAR System 3-Year Business Plan (2019-2021)*, *CGIAR Five-Year Biofortification Strategy 2019-2023*. October 2018, 3–7.
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I., y White, P. (2011). Functions of Macronutrients. In *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition* (pp. 135–189). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6>

- Hidoto, L., Worku, W., Mohammed, H., y Bunyamin, T. (2017). Effects of zinc application strategy on zinc content and productivity of chickpea grown under zinc deficient soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(ahead), 0–0. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017005000009>
- Hoke, M., y McCabe, K. (2022). Malnutrition, illness, poverty, and infant growth: A test of a syndemic hypothesis in Nuñoa, Peru. *Social Science and Medicine*, 295(January), 113720. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2021.113720>
- Hotz, C., Loechl, C., De Brauw, A., Eozenou, P., Gilligan, D., Moursi, M., Munhaua, B., Van Jaarsveld, P., Carriquiry, A., y Meenakshi, J. (2012). A large-scale intervention to introduce orange sweet potato in rural Mozambique increases vitamin A intakes among children and women. *British Journal of Nutrition*, 108(1), 163–176. <https://doi.org/10.1017/S0007114511005174>
- Huber, D., Römheld, V., y Weinmann, M. (2011). Relationship between Nutrition, Plant Diseases and Pests. In *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition* (pp. 283–298). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00010-8>
- Hussain, S., Khan, A., y Rengel, Z. (2019). Zinc-biofortified wheat accumulates more cadmium in grains than standard wheat when grown on cadmium-contaminated soil regardless of soil and foliar zinc application. *Science of the Total Environment*, 654, 402–408. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.097>
- Hussain, S., Khan, S. M., Jamal, A., Mihoub, A., Saeed, M., Khalid, M., Babar, S., y Ahmad, S. (2022). Improvement of Growth, Yield and Biochemical Properties of Potato (*Solanum tuberosum* L. “Montreal” and “Red Bull”) by Foliar Application of Zinc Under Calcareous Soil Conditions. *Gesunde Pflanzen*, 74(3), 561–570. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00631-4>
- Cakmak, I., Derici, R., Torun, B., Tolay, I., Braun, H. y Schlegel, R. (1997). Role of rye chromosomes in improvement of zinc efficiency in wheat and triticale. *Plant and Soil*, 196, 249–253.
- Ibrahim, H., Farag, M., Ibrahim, M., y Bondok, A. (2016). *Improving Growth, Yield and Resistance to Viral Diseases of Potato Plants Through Modifying Some Metabolites Using Zinc Sulphate and Jasmonic Acid Effects of 1-methylcyclopropane on quality of*

tomato and sweet pepper fruits during mixed loads.
<https://doi.org/10.5829/idosi.jhsop.2016.8.3.1183>

Ierna, A., Pellegrino, A., Mauro, R., y Leonardi, C. (2020). Micronutrient foliar fertilization for the biofortification of raw and minimally processed early potatoes. *Agronomy*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/agronomy10111744>

INEI. (2022). *Perú: Encuesta Demográfica y de Salud Familiar ENDES 2022*. 1–23.

International Zinc Nutrition Consultative Group (IZiNCG). (2004). International Zinc Nutrition Consultative Group (IZiNCG) technical document #1. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control. *Food and Nutrition Bulletin*, 25(1 Suppl 2).

Jalal, A., Shah, S., Carvalho Minhoto Teixeira Filho, M., Khan, A., Shah, T., Ilyas, M., y Rosa, L. (2020). Agro-Biofortification of Zinc and Iron in Wheat Grains. *Gesunde Pflanzen*, 72(3), 227–236. <https://doi.org/10.1007/s10343-020-00505-7>

Jasim, A., Hussein, M., y Nayef, M. (2013). Effect of foliar fertilizer (high in potash) on growth and yield of seven potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.). *Euphrates Journal of Agriculture Science*, 5(1), 1–7. <https://www.researchgate.net/publication/320172775>

Jiménez-Morán, E., Bacardí-Gascón, M., y Jiménez-Cruz, A. (2013). Efecto del zinc sobre el crecimiento lineal en menores de cinco años de latinoamérica; revisión sistemática. *Nutricion Hospitalaria*, 28(5), 1574–1579. <https://doi.org/10.3305/nh.2013.28.5.6771>

Jones, K., y de Brauw, A. (2015). Using Agriculture to Improve Child Health: Promoting Orange Sweet Potatoes Reduces Diarrhea. *World Development*, 74, 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.04.007>

Jongstra, R., Mwangi, M., Burgos, G., Zeder, C., Low, J., Mzembe, G., Liria, R., Penny, M., Andrade, M., Fairweather-Tait, S., Zum Felde, T., Campos, H., Phiri, K., Zimmermann, M. y Wegmüller, R. (2020). Iron Absorption from Iron-Biofortified Sweetpotato Is Higher Than Regular Sweetpotato in Malawian Women while Iron Absorption from Regular and Iron-Biofortified Potatoes Is High in Peruvian Women. *Journal of Nutrition*, 150(12), 3094–3102. <https://doi.org/10.1093/jn/nxaa267>

- Kim, T., Mills, H., y Wetzstein, H. (2002). Studies on the effect of zinc supply on growth and nutrient uptake in pecan. *Journal of Plant Nutrition*, 25(9), 1987–2000. <https://doi.org/10.1081/PLN-120013289>
- Kirkby, E. (2011). Introduction, Definition and Classification of Nutrients. In *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition* (pp. 3–5). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00001-7>
- Kreżel, A., y Maret, W. (2016). The biological inorganic chemistry of zinc ions. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 611, 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2016.04.010>
- Kromann, P., Valverde, F., Alvarado, S., Vélez, R., Pisuña, J., Potosí, B., Taípe, A., Caballero, D., Cabezas, A., y Devaux, A. (2017). Can Andean potatoes be agronomically biofortified with iron and zinc fertilizers? *Plant and Soil*, 411(1–2), 121–138. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3065-0>
- Kumari, M., Naresh, P., Acharya, G., Laxminarayana, K., Singh, H., Raghu, B., y Aghora, T. (2022). Nutritional diversity of Indian lablab bean (*Lablab purpureus* L. Sweet): An approach towards biofortification. *South African Journal of Botany*, 149, 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.06.002>
- Kyrkby, E., y Römheld, V. (2007). Micronutrientes en la fisiología de las plantas: funciones, absorción y movilidad. *Informaciones Agronomicas*, 1–21.
- Leiva, Y. (2021). *Comparativo de 34 clones de papas biofortificadas con alto contenido de hierro y zinc, para contribuir a la seguridad alimentaria en el departamento de Cajamarca, 2019*.
- Lindsay, W. (1991). Inorganic equilibria affecting micronutrients in soils. *Micronutrients in Agriculture*, 4, 89–112. <https://doi.org/10.2136/sssabookser4.2ed.c4>
- Liria-Domínguez, R., Penny, M., Kroon, P., Burgos, G., Dainty, J., Zeder, C., Zimmermann, M., King, J., Mithen, R., Boy, E., Al-Jaiballi, O., y Fairweather-Tait, S. (2023). Biofortified yellow fleshed potatoes provide more absorbable zinc than a commonly consumed variety: a randomized trial using stable isotopes in women in the Peruvian highlands. *The Journal of Nutrition*. <https://doi.org/10.1016/j.tjnut.2023.08.028>
- Lommen, W., y Struik, P. (1992). Production of potato minitubers by repeated harvesting: Effects of crop husbandry on yield parameters. In *Potato Research* (Vol. 35).

- Loué, A. (1988). Los micronutrientes en agricultura. Madrid, España: Mundi Prensa.
- Machado, P., Steiner, F., Zuffo, A., y Machado, R. (2018). Could the Supply of Boron and Zinc Improve Resistance of Potato to Early Blight? *Potato Research*, 61(2), 169–182. <https://doi.org/10.1007/s11540-018-9365-4>
- Maciel, B., Costa, P., Filho, J., Ribeiro, S., Rodrigues, F., Soares, A., Júnior, F., Ambikapathi, R., McQuade, E., Kosek, M., Ahmed, T., Bessong, P., Kang, G., Shresthra, S., Mduma, E., Bayo, E., Guerrant, R., Caulfield, L., y Lima, A. (2021). Higher Energy and Zinc Intakes from Complementary Feeding Are Associated with Decreased Risk of Undernutrition in Children from South America, Africa, and Asia. *Journal of Nutrition*, 151(1), 170–178. <https://doi.org/10.1093/jn/nxaa271>
- Mamani, C., Dongo, D., Pimentel, S., y Oriundo, P. (2017). Ingesta de nutrientes y estado nutricional de niños peruanos entre 6 a 35 meses. *Nutricion Clinica y Dietetica Hospitalaria*, 37(1), 156–164. <https://doi.org/10.12873/371tarquimamani>
- Márquez-Quiroz, C., De-la-Cruz, E., Osorio-Osorio, R., Sánchez-Chávez, E., Huijara-Vasconcelos, J., y Sida-Arreola, J. (2018). Contenido de zinc y rendimiento de frijol caupí biofortificado. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 20. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i20.988>
- Marschner, H. (1995). Mineral Nutrition of Higher Plants. In *London: Academic Press* (second edition, Vol. 23, Issue C). [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(08\)60516-1](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(08)60516-1)
- Guerinot, M. (2000). The ZIP family of metal transporters. *Biochimica et Biophysica*, 27(1), 114. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2019.02.008%0A>.
- Mejia, C., Sulca, P., Hernani-Salazar, L., Ricaldi-Asto, L., Rojas, M., Hernández-Arriaga, G., Tovani-Palone, M. y Bueso-Pineda, L. (2019). Association of nutritional status and anemia with multi-micronutrient supplementation in young children in Peru. *Electronic Journal of General Medicine*, 16(5). <https://doi.org/10.29333/ejgm/114662>
- Mengel, K., y Kirkby, E. (2000). *Principios de nutrición vegetal* (4th ed.).
- Mengist, M. (2018). *Investigating the genetics and physiological basis of differences in cadmium and zinc concentrations in tubers of potato (solanum tuberosum L): implications for food safety and biofortification.*

<https://cora.ucc.ie/bitstream/handle/10468/5880/MengistPhDThesis.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

- Mengist, M., Milbourne, D., Griffin, D., McLaughlin, M. J., Creedon, J., Jones, P., y Alves, S. (2021). Zinc uptake and partitioning in two potato cultivars: implications for biofortification. *Plant and Soil*, 463(1–2), 601–613. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04874-4>
- Mertens y Smolders. (2013). Zinc. *Heavy Metals in Soils*, 465–493., 65(6), 717–728. <https://doi.org/10.1097/00006534-198006000-00001>
- Sillanpää, M. (1982). *Micronutrients and the Nutrient Status of Soils: A Global Study - Mikko Sillanpää* - Google Libros. https://books.google.com.pe/books?id=V-_KzqroK1ECyprintsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ViewAPI&redir_esc=y#v=onepage&qyf=false
- Milner, M., Seamon, J., Craft, E., y Kochian, L. (2013). Transport properties of members of the ZIP family in plants and their role in Zn and Mn homeostasis. *Journal of Experimental Botany*, 64(1), 369–381. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers315>
- Mkambula, P., Birol, E., Friesen, V., Munyua, H., Alberts, D., Aytakin, D., Mudyahoto, B., Boy, E., y Nn Mbuya, M. (2022). *Transforming food systems to deliver nutritious foods the vital roles of fortification and biofortification*. Global Alliance for Improved Nutrition (GAIN) and HarvestPlus. Discussion Paper #10. Geneva, Switzerland, <https://doi.org/10.36072/dp.10>.
- Monroy-Valle, M., Coyoy, W., De León, J., y Flórez, I. (2017). Dietetic determinants of zinc consumption in stunted children under five in Maya communities from Guatemala. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 34(3), 451–458. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2017.343.2276>
- Mora-Aguilar, R. (2006). Indices de eficiencia de genotipos de papa establecidos en condiciones de secano. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 12(1), 85–94.
- Mousavi, S., Galavi, M., y Ahmadvand, G. (2007). Effect of zinc and manganese foliar application on yield, quality and enrichment on potato (*Solanum tuberosum* L.). *Asian Journal of Plant Sciences*, 6(8), 1256–1260. <https://doi.org/10.3923/ajps.2007.1256.1260>

- Mulualem, T. (2015). Application of Bio-fortification through Plant Breeding to Improve the Value of Staple Crops Watershed Management in Ethiopia View project Improvement of underutilized nutritional important root and tuber crops View project Tewodros Mulualem Beyene Ethiopian Institute of Agricultural Research Application of Bio-fortification through Plant Breeding to Improve the Value of Staple Crops. *Biomedicine and Biotechnology*, 3(1), 11–19. <https://doi.org/10.12691/bb-3-1-3>
- Murillo, R., Piedra, G., y Ramón, G. (2013). Absorción de nutrientes a través de la hoja. *Uniciencia*, 27(1), 24–37.
- Mwesigye, A., Young, S., Bailey, E., y Tumwebaze, S. (2019). Uptake of trace elements by food crops grown within the Kilembe copper mine catchment, Western Uganda. *Journal of Geochemical Exploration*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106377>
- Nakandalage, N. y Seneweera, S. (2018). Micronutrients Use Efficiency of Crop-Plants Under Changing Climate. In *Plant Micronutrient Use Efficiency: Molecular and Genomic Perspectives in Crop Plants*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812104-7.00015-0>
- Natasha, N., Shahid, M., Bibi, I., Iqbal, J., Khalid, S., Murtaza, B., Bakhat, H., Farooq, A., Amjad, M., Hammad, H., Niazi, N., y Arshad, M. (2022). Zinc in soil-plant-human system: A data-analysis review. *Science of the Total Environment*, 808. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152024>
- NU. CEPAL. (2021). Balance Preliminar de las Economías, 2019. In *Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)*. <http://hdl.handle.net/11362/46501>
- Osendarp, S., Martinez, H., Garrett, G., Neufeld, L., De-Regil, L., Vossenaar, M., y Darnton-Hill, I. (2018). Large-Scale Food Fortification and Biofortification in Low- and Middle-Income Countries: A Review of Programs, Trends, Challenges, and Evidence Gaps. *Food and Nutrition Bulletin*, 39(2), 315–331. <https://doi.org/10.1177/0379572118774229>
- Ozkaynak, E. (2021). Tuber size effects on yield and number of potato minitubers of commercial varieties in a greenhouse production system. *Turkish Journal of Field Crops*, 26(1), 123–128. <https://doi.org/10.17557/tjfc.950280>

- Özkaynak, E., y Samanci, B. (2005). *Rendimiento y componentes de rendimiento de papa cultivada en invernadero, campo y semillero (Solanum tuberosum L.) Plantlets* (Vol. 18, Issue 1). <https://www.researchgate.net/publication/266409405>
- Ozturk, L., Yazici, M., Yucel, C., Torun, A., Cekic, C., Bagci, A., Ozkan, H., Braun, H., Sayers, Z., y Cakmak, I. (2006). Concentration and localization of zinc during seed development and germination in wheat. *Physiologia Plantarum*, 128(1), 144–152. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2006.00737.x>
- Paget, M., Amoros, W., Salas, E., Eyzaguirre, R., Alspach, P., Apiolaza, L., Noble, A., y Bonierbale, M. (2014). Genetic evaluation of micronutrient traits in diploid potato from a base population of Andean Landrace Cultivars. *Crop Science*, 54(5), 1949–1959. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.12.0809>
- Palmgren, M., Clemens, S., Williams, L., Krämer, U., Borg, S., Schjørring, J., y Sanders, D. (2008). Zinc biofortification of cereals: problems and solutions. *Trends in Plant Science*, 13(9), 464–473. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2008.06.005>
- Pereira, A., Silva, G., Carvalho, A., y Ponijaleki, R. (2017). Desempenho de clones avançados de batata: Vigor de planta, produtividade e peso específico. *Horticultura Brasileira*, 35(3), 440–444. <https://doi.org/10.1590/S0102-053620170321>
- Raigond, P., Singh, B., Dutt, S. y Kumar, S. (2020). Potato. In *Genetic Resources, Chromosome Engineering, and Crop Improvement: Vegetable Crops* (Vol. 3). <https://doi.org/10.5040/9781635577068-1413>
- Porras, E., Burgos, G., Sosa, P., y Felde, T. (2014). *Procedures for sampling and sample preparation of sweetpotato roots and potato tubers for mineral analysis*. <https://doi.org/10.4160/9789290604457>
- Porras-Martínez, C., y Brenes-Angulo, A. (2015). *Calidad de los tubérculos y componentes de rendimiento de híbridos F1 de papa (Solanum tuberosum)*. *Agronomía Costarricense*, 39(3), 37–46. www.mag.go.cr/revagr/index.htmlwww.cia.ucr.ac.cr
- Pradel, W., Hareau, G., Quintanilla, L., y Suarez, V. (2017). *Adopcion e impacto de variedades mejoradas de papa en el Peru: Resultado de una encuesta a nivel nacional (2013)*. <https://doi.org/10.4160/9789290602118>

- Praharaj, S., Skalicky, M., Maitra, S., Bhadra, P., Shankar, T., Brestic, M., Hejnak, V., Vachova, P., y Hossain, A. (2021). Zinc biofortification in food crops could alleviate the zinc malnutrition in human health. In *Molecules* (Vol. 26, Issue 12). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/molecules26123509>
- Prentice, A., Gershwin, M., Schaible, U., Keusch, G., Victora, C., y Gordon, J. (2008). Review series personal perspective New challenges in studying nutrition-disease interactions in the developing world. *The Journal of Clinical Investigation*, 118. <https://doi.org/10.1172/JCI34034>
- Pumisacho, M., y Sherwood, S. (2002). *INIAP-Estación Experimental Santa Catalina* (primera edición).
- Qaswar, M., Hussain, S., y Rengel, Z. (2017). Zinc fertilisation increases grain zinc and reduces grain lead and cadmium concentrations more in zinc-biofortified than standard wheat cultivar. *Science of the Total Environment*, 605–606, 454–460. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.242>
- Quispe, M. (2020). *Fertilización foliar y edáfica con Zinc para la biofortificación agronómica del cultivo de papa*. (tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Cañete-Perú.
- Ramírez, J. (2019). *Características biométricas en el cultivo de papa (Solanum tuberosum L.) bajo fertilización foliar y edáfica con Zinc*. (tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.
- Ramirez-Jaspeado, R., Palacios-Rojas, N., Salomon, P., y Donnet, M. (2018). Identificación de áreas potenciales en México para la intervención con maíz biofortificado con zinc = Identification of potential areas in Mexico for intervention with biofortified high-zinc maize. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 4(3), 327–337.
- Ramzan, Y., Hafeez, M., Khan, S., Nadeem, M., Saleem-ur-Rahman, B., y Ahmad, J. (2020). Biofortification with Zinc and Iron Improves the Grain Quality and Yield of Wheat Crop. *International Journal of Plant Production*, 14(3), 501–510. <https://doi.org/10.1007/s42106-020-00100-w>
- Pandey, R. (2015). Plant biology and biotechnology: Plant diversity, organization, function and improvement. In *Plant Biology and Biotechnology: Plant Diversity, Organization, Function and Improvement* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2286-6>

- Reichert, U. (2009). *Regulation of micronutrient density in tubers of different potato varieties*. (tesis de posgrado). Humboldt- Universität zu Berlin. Berlin, Alemania.
- Robertson, T., Alzaabi, A., Robertson, M., y Fielding, B. (2018). Starchy carbohydrates in a healthy diet: The role of the humble potato. *Nutrients*.10-11. <https://doi.org/10.3390/nu10111764>
- Rodríguez, L. (2010). *Ecofisiología del cultivo de papa (Solanum tuberosum L.)*. Departamento de Biología, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.0
- Sadeghzadeh, B. (2013). A review of zinc nutrition and plant breeding. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13(4), 907–927. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162013005000072>
- Sadeghzadeh, B. y Rengel, Z. (2011). Zinc in Soils and Crop Nutrition. *The Molecular and Physiological Basic of Nutrient Use Efficiency in Crops*, 335–375.
- Salas, E., Bastos, C., Maccera, C., Cevallos, D., De Boeck, B., Burgos, G., y Campos, H. (2021). *Potenciales nuevas variedades de papa biofortificada con altos contenidos de hierro y zinc, para contribuir a la seguridad alimentaria y nutricional en agricultura familiar alto andina. Reporte Final STC*. <https://doi.org/10.4160/9789290605935>
- Santis, M., Cabrera, M., Benavides, A., Sandoval, A., Ortega, H., y Robledo, A. (2019). Rendimiento agronómico del jitomate suplementado con microelementos Fe, Cu y Zn. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(6), 1379–1391. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.1822>
- Schwarz, D., y Kläring, H. (2001). Allometry to estimate leaf area of tomato. *Journal of Plant Nutrition*, 24(8), 1291–1309. <https://doi.org/10.1081/PLN-100106982>
- Sharma, D., Ghimire, P., Bhattarai, S., y Adhikari, U. (2020). Biofortification of Wheat: Genetic and Agronomic Approaches and Strategies to Combat Iron and Zinc Deficiency. *Sustainability in Food and Agriculture*, 1(1), 48–54. <https://doi.org/10.26480/sfna.01.2020.48.54>
- Shayanowako, A., Mangani, R., Mtaita, T., y Mazarura, U. (2015). Influence of Main Stem Density on Irish Potato Growth and Yield: A Review. *Annual Research y Review in Biology*, 5(3), 229–237. <https://doi.org/10.9734/arrb/2015/9973>

- Sifuentes, E., Macías, J., Apodaca, M. y Cortez, E. (2009). *Predicción de la fenología de papa Principios y aplicaciones prácticas*.
- Singh, G., Graham, R. y Rengel, Z. (1996). Genotypic variation in zinc efficiency and resistance to crown rot disease (*Fusarium graminearum* Schw. Group 1) in wheat. In *Plant and Soil*. 186. Kluwer Academic Publishers.
- Singh, U., Praharaj, C., Singh, S., y Singh, N. (2016). Biofortification: Introduction, approaches, limitations, and challenges. In *Biofortification of Food Crops*. 3–18. Springer India. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2716-8_1
- Siwela, M., Pillay, K., Govender, L., Lottering, S., Mudau, F., Modi, A. y Mabhaudhi, T. (2020). Biofortified crops for combating hidden hunger in South Africa: Availability, acceptability, micronutrient retention and bioavailability. *Foods*, 9(6), 1–23. <https://doi.org/10.3390/foods9060815>
- Solano, C. (2019). Producción de papa variedad Yungay (*Solanum tuberosum*-Yungay), bajo condiciones de invernadero empleando modulo aeropónico.(tesis de pregrado). Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo, Perú.
- Stangoulis, J. y Knez, M. (2022). Biofortification of major crop plants with iron and zinc - achievements and future directions. In *Plant and Soil*. 474, 1–2, 57–76. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05330-7>
- Stewart, C., Dewey, K., y Ashorn, P. (2010). The undernutrition epidemic: an urgent health priority. In *The Lancet*. 375(282). [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(10\)60132-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(10)60132-8)
- Stomph, T. (2011). *The Relative Contribution of Post-Flowering Uptake of Zinc to Rice Grain Zinc Density*.
- Subramanian, N. , White, P. , Broadley, M., y Ramsay, G. (2011). The three-dimensional distribution of minerals in potato tubers. *Annals of Botany*, 107(4), 681–691. <https://doi.org/10.1093/aob/mcr009>
- Sun, Y., Mi, W., y Wu, L. (2018). Effects of foliar Fe and Zn fertilizers on storage root Fe, Zn, and beta-carotene content of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.). *Journal of Plant Nutrition*, 42(1), 16–26. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1510505>

- Swamy, B., Rahman, M., Inabangan-Asilo, M., Amparado, A., Manito, C., Chadha-Mohanty, P., Reinke, R., y Slamet-Loedin, I. (2016). Advances in breeding for high grain Zinc in Rice. *Rice* 9(1). Springer New York LLC. <https://doi.org/10.1186/s12284-016-0122-5>
- Talsma, E., Brouwer, I., Verhoef, H., Mbera, G., Mwangi, A., Demir, A., Maziya-Dixon, B., Boy, E., Zimmermann, M., y Melse-Boonstra, A. (2016). Biofortified yellow cassava and Vitamin A status of Kenyan children: A randomized controlled trial. *American Journal of Clinical Nutrition*, 103(1), 258–267. <https://doi.org/10.3945/ajcn.114.100164>
- Tirado, H. (2014). *Evaluación del rendimiento de clones avanzados de papa (Solanum tuberosum L.) con pulpa pigmentada-Cajamarca. (tesis de pregrado). Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Lambayeque-Perú.*
- Tirado-Lara, R., y Tirado-Malaver, R. (2018). Behavior of biometric parameters clones for the obtaining of potato baby with pigmented flesh. *Scientia Agropecuaria*, 9(3), 401–410. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.03.11>
- Trinidad, A., y Aguilar, D. (1999). Foliar fertilization, an important enhancing for the crop yield. *Terra*, 17(3), 247–255.
- UNICEF/WHO/WORLD BANK. (2021). Levels and trends in child malnutrition UNICEF / WHO / World Bank Group Joint Child Malnutrition Estimates Key findings of the 2021 edition. *World Health Organization*, 1–32. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240025257>
- Velez, A. (2013). Efecto de la fertilización foliar y edáfica con hierro y zinc para la biofortificación agronómica del tubérculo de papa (*Solanum tuberosum* L.) bajo invernadero. (tesis de pregrado). Universidad Central del Ecuador.
- Velu, G., Ortiz-Monasterio, I., Cakmak, I., Hao, Y., y Singh, R. (2014). Biofortification strategies to increase grain zinc and iron concentrations in wheat. *Journal of Cereal Science*, 59(3), 365–372. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.09.001>
- Velu, G., Singh, R., Huerta-Espino, J., Peña, R., Arun, B., Mahendru-Singh, A., Mujahid, M. Y., Sohu, V., Mavi, G., Crossa, J., Alvarado, G., Joshi, A., y Pfeiffer, W. (2012). Performance of biofortified spring wheat genotypes in target environments for grain zinc and iron concentrations. *Field Crops Research*, 137, 261–267. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.07.018>

- Vergara, V., Cecílio, B., Almeida, H. y Gratão, P. (2019). Fortification and bioavailability of zinc in potato. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(7), 3525–3529. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9572>
- Wei, X., Hao, M., Shao, M., y Gale, W. (2006). Changes in soil properties and the availability of soil micronutrients after 18 years of cropping and fertilization. *Handbook of Environmental Chemistry, Volume 5: Water Pollution*, 91(1–2), 120–130. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.11.009>
- White, P. (2011a). Ion Uptake Mechanisms of Individual Cells and Roots: Short-distance Transport. In *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition* (pp. 7–47). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00002-9>
- White, P. (2011b). Long-distance Transport in the Xylem and Phloem. In *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition* (pp. 49–70). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00003-0>
- White, P., Bradshaw, J., Dale, M., Ramsay, G., Hammond, J., y Broadley, M. (2009). Relationships between yield and mineral concentrations in potato tubers. *HortScience*, 44(1), 6–11. <https://doi.org/10.21273/hortsci.44.1.6>
- White, P. y Broadley, M. (2011). Physiological limits to zinc biofortification of edible crops. *Frontiers in Plant Science*, 2(NOV), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2011.00080>
- White, P., Broadley, M., Hammond, J., Ramsay, G., Subramanian, N., Thompson, J. y Wright, G. (2012). Bio-fortification of potato tubers using foliar zinc-fertiliser. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 87(2), 123–129. <https://doi.org/10.1080/14620316.2012.11512842>
- White, P., Thompson, J., Wright, G., y Rasmussen, S. (2017). Biofortifying Scottish potatoes with zinc. *Plant and Soil*, 411(1–2), 151–165. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2903-4>
- Whitney, R., Centrone, W., Mamani, H., Falkenstein, K., Levine, R., Harris, J., Hazlitt, M., y Lim, C. (2021). Impact of a collaborative childhood anemia intervention programme in Peru. *Tropical Medicine and International Health*, 26(6), 680–686. <https://doi.org/10.1111/tmi.13564>

- Wulf A., Hans-Peter B., Heiner F., Rainer H., Ellen K., Kögel-Knabner I., Kretschmar, R., Stahr, K. y Wilke, B. (2016). *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde* (Issue 16). [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-662-55871-3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-55871-3)
- Younas, N., Fatima, I., Ahmad, I., y Ayyaz, M. (2022). Alleviation of zinc deficiency in plants and humans through an effective technique; biofortification: A detailed review. *Acta Ecologica Sinica, July*. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2022.07.008>
- Zaman, Q., Aslam, Z., Yaseen, M., Ihsan, M., Khaliq, A., Fahad, S., Bashir, S., Ramzani, P., y Naeem, M. (2017). Zinc biofortification in rice: leveraging agriculture to moderate hidden hunger in developing countries. *Archives of Agronomy and Soil Science, 64*(2), 147–161. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1338343>
- Zarate, J. (2010). *Senescencia foliar, componentes del rendimiento y degradación nuclear en dos variedades de papa (Solanum tuberosum L.) var. Lupita y Tollocan*. (tesis de posgrado). Institución de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas, Mexico.
- Zhang, Y., Deng, Y., Chen, R., Cui, Z., Chen, X., Yost, R., Zhang, F., y Zou, C. (2012). The reduction in zinc concentration of wheat grain upon increased phosphorus-fertilization and its mitigation by foliar zinc application. *Plant and Soil, 361*(1–2), 143–152. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1238-z>
- Zhang, Y., Sun, Y., Ye, Y., Karim, M., Xue, Y., Yan, P., Meng, Q., Cui, Z., Cakmak, I., Zhang, F., y Zou, C. (2012). Zinc biofortification of wheat through fertilizer applications in different locations of China. *Field Crops Research, 125*, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.08.003>
- Zhao, A., Tian, X., Cao, Y., Lu, X., y Liu, T. (2014). Comparison of soil and foliar zinc application for enhancing grain zinc content of wheat when grown on potentially zinc-deficient calcareous soils. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 94*(10), 2016–2022. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6518>
- Zou, C., Du, Y., Rashid, A., Ram, H., Savasli, E., Pieterse, P., Ortiz-Monasterio, I., Yazici, A., Kaur, C., Mahmood, K., Singh, S., Le Roux, M., Kuang, W., Onder, O., Kalayci, M., y Cakmak, I. (2019). Simultaneous Biofortification of Wheat with Zinc, Iodine, Selenium, and Iron through Foliar Treatment of a Micronutrient Cocktail in Six Countries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 67*(29), 8096–8106. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b01829>

VIII. ANEXO

ANEXO 1: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable altura de planta (PLAHE).

Type III Analysis of Variance Table with Satterthwaite's method

| | Sum Sq | Mean Sq | NumDF | DenDF | F value | Pr(>F) | (*) |
|----------------|--------|---------|-------|-------|---------|----------|-----|
| rep | 6.23 | 2.08 | 3 | 26 | 0.204 | 0.89272 | |
| tr | 10.32 | 10.32 | 1 | 26 | 1.0139 | 0.32324 | |
| geno | 1840.1 | 460.03 | 4 | 26 | 45.2032 | 2.42E-11 | *** |
| tr:geno | 98.32 | 24.58 | 4 | 26 | 2.4153 | 0.07437 | . |

Signif. codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Predicciones para PLAHE respecto a los genotipos

| geno | predicted.value | standard.error | upper.Confidence.limit | lower.Confidence.limit | est.status |
|---------------|-----------------|----------------|------------------------|------------------------|------------|
| CIP312621.097 | 27.525 | 1.229699 | 30.03638 | 25.01362 | Estimable |
| CIP312682.042 | 38.375 | 1.23 | 40.886 | 35.864 | Estimable |
| CIP312721.074 | 43.3 | 1.23 | 45.811 | 40.789 | Estimable |
| CIP312764.006 | 27.049 | 1.325 | 29.755 | 24.342 | Estimable |
| CIP720201 | 26.969 | 1.23 | 29.48 | 24.457 | Estimable |

Matriz de varianza de los valores predichos: Valores p para todas las diferencias por pares entre los valores predichos

| | CIP312621.097 | CIP312682.042 | CIP312721.074 | CIP312764.006 | CIP720201 |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| CIP312621.097 | NA | 0 | 0 | 0.794 | 0.751 |
| CIP312682.042 | 0.000 | NA | 0.008 | 0.000 | 0.000 |
| CIP312721.074 | 0.000 | 0.008 | NA | 0.000 | 0.000 |
| CIP312764.006 | 0.794 | 0.000 | 0.000 | NA | 0.965 |
| CIP720201 | 0.751 | 0.000 | 0.000 | 0.965 | NA |

ANEXO 2: Análisis de Varianza (ANVA) para el número de tallos por planta (SNPP).

Type III Analysis of Variance Table with Satterthwaite's method

| | Sum Sq | Mean Sq | NumDF | DenDF | F value | Pr(>F) | (*) |
|----------------|---------------|----------------|--------------|--------------|----------------|------------------|------------|
| rep | 0.3405 | 0.1135 | 3 | 2.8704 | 0.2448 | 0.860936 | |
| tr | 0.0008 | 0.00078 | 1 | 2.8781 | 0.0017 | 0.969995 | |
| geno | 12.1051 | 3.02628 | 4 | 22.9421 | 6.5281 | 0.001163 | ** |
| tr:geno | 2.4012 | 0.60029 | 4 | 22.9421 | 1.2949 | 0.301301 | |

Signif. codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Predicciones para SNPP respecto a los genotipos

| geno | predicted.value | standard.error | upper.Confidence.limi | lower.Confidence.limi | est.status |
|--------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------|
| | e | r | t | t | |
| CIP312621.09 | | | | | |
| 1 7 | 1.8625 | 0.248826 | 2.373049 | 1.3519513 | Estimable |
| CIP312682.04 | | | | | |
| 2 2 | 1.65 | 0.248826 | 2.160549 | 1.1394513 | Estimable |
| CIP312721.07 | | | | | |
| 3 4 | 2.9 | 0.248826 | 3.410549 | 2.3894513 | Estimable |
| CIP312764.00 | | | | | |
| 4 6 | 2.497299 | 0.269255 | 3.049764 | 1.944833 | Estimable |
| 5 CIP720201 | 1.291667 | 0.248826 | 1.802215 | 0.7811179 | Estimable |

Matriz de varianza de los valores predichos: Valores p para todas las diferencias por pares entre los valores predichos

| | CIP312621.097 | CIP312682.042 | CIP312721.074 | CIP312764.006 | CIP720201 |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| CIP312621.097 | NA | 0.55 | 0.01 | 0.10 | 0.12 |
| CIP312682.042 | 0.55 | NA | 0.00 | 0.03 | 0.32 |
| CIP312721.074 | 0.01 | 0.00 | NA | 0.28 | 0.00 |
| CIP312764.006 | 0.10 | 0.03 | 0.28 | NA | 0.00 |
| CIP720201 | 0.12 | 0.32 | 0.00 | 0.00 | NA |

ANEXO 3: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable vigor de planta (Plant_vigor).

Type III Analysis of Variance Table with Satterthwaite's method

| | Sum Sq | Mean Sq | NumDF | DenDF | F value | Pr(>F) | (*) |
|----------------|--------|---------|-------|-------|---------|----------|-----|
| rep | 0.882 | 0.2941 | 3 | 26 | 0.407 | 0.7492 | |
| tr | 0.089 | 0.0894 | 1 | 26 | 0.1237 | 0.7279 | |
| geno | 38.865 | 9.7162 | 4 | 26 | 13.4449 | 4.57E-06 | *** |
| tr:geno | 2.071 | 0.5178 | 4 | 26 | 0.7165 | 0.5883 | |

Signif. codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Predicciones para Plant_vigor respecto a los genotipos

| geno | predicted.value | standard.error | upper.Confidence.limit | lower.Confidence.limit | est.status |
|-----------------|-----------------|----------------|------------------------|------------------------|------------|
| 1 CIP312621.097 | 4.4 | 0.3008485 | 5.014415 | 3.785585 | Estimable |
| 2 CIP312682.042 | 6.1 | 0.3008485 | 6.714415 | 5.485585 | Estimable |
| 3 CIP312721.074 | 6.9 | 0.3008485 | 7.514415 | 6.285585 | Estimable |
| 4 CIP312764.006 | 7.334677 | 0.3242039 | 7.99679 | 6.672565 | Estimable |
| 5 CIP720201 | 6.625 | 0.3008485 | 7.239415 | 6.010585 | Estimable |

Matriz de varianza de los valores predichos: Valores p para todas las diferencias por pares entre los valores predichos

p values for all pairwise differences between predicted values

| | CIP312621.097 | CIP312682.042 | CIP312721.074 | CIP312764.006 | CIP720201 |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| CIP312621.097 | NA | | 0 | 0 | 0 |
| CIP312682.042 | 0.000 | NA | | 0.070 | 0.227 |
| CIP312721.074 | 0.000 | 0.070 | NA | | 0.523 |
| CIP312764.006 | 0.000 | 0.009 | 0.334 | NA | 0.119 |
| CIP720201 | 0.000 | 0.227 | 0.523 | 0.119 | NA |

ANEXO 4: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable senescencia (SE).

Type III Analysis of Variance Table with Satterthwaite's method

| | Sum Sq | Mean Sq | NumDF | DenDF | F value | Pr(>F) |
|----------------|---------------|----------------|--------------|--------------|----------------|------------------|
| rep | 3.4466 | 1.14886 | 3 | 26 | 1.9828 | 0.1413 |
| tr | 0.4746 | 0.4746 | 1 | 26 | 0.8191 | 0.3738 |
| geno | 3.9359 | 0.98398 | 4 | 26 | 1.6982 | 0.1807 |
| tr:geno | 2.2224 | 0.55559 | 4 | 26 | 0.9589 | 0.4465 |

Signif. codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Predicciones para SE respecto a los genotipos

| geno | predicted.value | standard.error | upper.Confidence.limit | lower.Confidence.limit | est.status |
|---------------|-----------------|----------------|------------------------|------------------------|------------|
| CIP312621.097 | 5.6875 | 0.2683858 | 6.235617 | 5.139383 | Estimable |
| CIP312682.042 | 6.2 | 0.2683858 | 6.748117 | 5.651883 | Estimable |
| CIP312721.074 | 6.1 | 0.2683858 | 6.648117 | 5.551883 | Estimable |
| CIP312764.006 | 6.231452 | 0.2892211 | 6.82212 | 5.640783 | Estimable |
| CIP720201 | 5.4375 | 0.2683858 | 5.985617 | 4.889383 | Estimable |

Matriz de varianza de los valores predichos: Valores p para todas las diferencias por pares entre los valores predichos

| | CIP312621.097 | CIP312682.042 | CIP312721.074 | CIP312764.006 | CIP720201 |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| CIP312621.097 | NA | 0.187 | 0.286 | 0.178 | 0.515 |
| CIP312682.042 | 0.187 | NA | 0.794 | 0.937 | 0.054 |
| CIP312721.074 | 0.286 | 0.794 | NA | 0.741 | 0.091 |
| CIP312764.006 | 0.178 | 0.937 | 0.741 | NA | 0.053 |
| CIP720201 | 0.515 | 0.054 | 0.091 | 0.053 | NA |

ANEXO 5: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable número de tubérculos por planta (TNTPL).

Type III Analysis of Variance Table with Satterthwaite's method

| | Sum Sq | Mean Sq | NumDF | DenDF | F value | Pr(>F) | (*) |
|----------------|--------|---------|-------|-------|---------|----------|-----|
| rep | 1252 | 417 | 3 | 3 | 0.1079 | 0.9499 | |
| tr | 3397 | 3397 | 1 | 3 | 0.8787 | 0.4177 | |
| geno | 377551 | 94388 | 4 | 24 | 24.4124 | 3.70E-08 | *** |
| tr:geno | 23576 | 5894 | 4 | 24 | 1.5244 | 0.2268 | |

Signif. codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Predicciones para TNTPL respecto a los genotipos

| | geno | predicted.value | standard.error | upper.Confidence.limit | lower.Confidence.limit | est.status |
|---|---------------|-----------------|----------------|------------------------|------------------------|------------|
| 1 | CIP312621.097 | 10.33125 | 2.437871 | 15.33163 | 5.33087 | Estimable |
| 2 | CIP312682.042 | 26.35 | 2.437871 | 31.35038 | 21.34962 | Estimable |
| 3 | CIP312721.074 | 17.475 | 2.437871 | 22.47538 | 12.47462 | Estimable |
| 4 | CIP312764.006 | 88.7797 | 2.628614 | 94.17131 | 83.38808 | Estimable |
| 5 | CIP720201 | 11.21875 | 2.437871 | 16.21913 | 6.21837 | Estimable |

Matriz de varianza de los valores predichos: Valores p para todas las diferencias por pares entre los valores predichos

| | CIP312621.097 | CIP312682.042 | CIP312721.074 | CIP312764.006 | CIP720201 |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| CIP312621.097 | NA | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.80 |
| CIP312682.042 | 0.00 | NA | 0.02 | 0.00 | 0.00 |
| CIP312721.074 | 0.05 | 0.02 | NA | 0.00 | 0.08 |
| CIP312764.006 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | NA | 0.00 |
| CIP720201 | 0.80 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | NA |

ANEXO 6: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable peso de tubérculos por planta (TTWP).

Type III Analysis of Variance Table with Satterthwaite's method

| | Sum Sq | Mean Sq | NumDF | DenDF | F value | Pr(>F) | (*) |
|----------------|---------------|----------------|--------------|--------------|----------------|------------------|------------|
| rep | 611 | 203.7 | 3 | 3.0418 | 0.5848 | 0.6644 | |
| tr | 275 | 275.1 | 1 | 3.0446 | 0.7897 | 0.4388 | |
| geno | 45965 | 11491.2 | 4 | 23.0831 | 32.99 | 3.07E-09 | *** |
| tr:geno | 452 | 113.1 | 4 | 23.0831 | 0.3246 | 0.8586 | |

Predicciones para TTWP respecto a los genotipos

| geno | predicted.value | standard.error | upper.Confidence.limit | lower.Confidence.limit | est.status |
|---------------|------------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| CIP312621.097 | 103.5669 | 6.256997 | 116.4052 | 90.72864 | Estimable |
| CIP312682.042 | 185.523 | 6.256997 | 198.3613 | 172.6847 | Estimable |
| CIP312721.074 | 161.7217 | 6.256997 | 174.56 | 148.88345 | Estimable |
| CIP312764.006 | 183.9181 | 6.783309 | 197.8363 | 169.99994 | Estimable |
| CIP720201 | 113.9213 | 6.256997 | 126.7596 | 101.08295 | Estimable |

Matriz de varianza de los valores predichos: Valores p para todas las diferencias por pares entre los valores predichos

| | CIP312621.097 | CIP312682.042 | CIP312721.074 | CIP312764.006 | CIP720201 |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------|
| CIP312621.097 | NA | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.25 |
| CIP312682.042 | 0.00 | NA | 0.01 | 0.86 | 0.00 |
| CIP312721.074 | 0.00 | 0.01 | NA | 0.02 | 0.00 |
| CIP312764.006 | 0.00 | 0.86 | 0.02 | NA | 0.00 |
| CIP720201 | 0.25 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | NA |

ANEXO 7: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable peso promedio de los tubérculos (ATW).

Type III Analysis of Variance Table with Satterthwaite's method

| | Sum Sq | Mean Sq | NumDF | DenDF | F value | Pr(>F) | (*) |
|----------------|--------|---------|-------|---------|---------|----------|-----|
| rep | 5.66 | 1.888 | 3 | 3.0846 | 0.9 | 0.5316 | |
| tr | 4.13 | 4.126 | 1 | 3.1059 | 1.9665 | 0.2525 | |
| geno | 401.83 | 100.457 | 4 | 23.2238 | 47.8825 | 6.89E-11 | *** |
| tr:geno | 3.91 | 0.977 | 4 | 23.2238 | 0.4656 | 0.7603 | |

Signif. codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Predicciones para ATW respecto a los genotipos

| geno | predicted.value | standard.error | upper.Confidence.limit | lower.Confidence.limit | est.status |
|-----------------|-----------------|----------------|------------------------|------------------------|------------|
| 1 CIP312621.097 | 10.279161 | 0.4366376 | 11.174759 | 9.383563 | Estimable |
| 2 CIP312682.042 | 7.078833 | 0.4366376 | 7.974432 | 6.183235 | Estimable |
| 3 CIP312721.074 | 9.386014 | 0.4366376 | 10.281612 | 8.490416 | Estimable |
| 4 CIP312764.006 | 1.958358 | 0.4714489 | 2.925359 | 0.991358 | Estimable |
| 5 CIP720201 | 10.351171 | 0.4366376 | 11.246769 | 9.455573 | Estimable |

Matriz de varianza de los valores predichos: Valores p para todas las diferencias por pares entre los valores predichos

| | CIP312621.097 | CIP312682.042 | CIP312721.074 | CIP312764.006 | CIP720201 |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| CIP312621.097 | NA | 0.00 | 0.16 | 0.00 | 0.91 |
| CIP312682.042 | 0.00 | NA | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| CIP312721.074 | 0.16 | 0.00 | NA | 0.00 | 0.13 |
| CIP312764.006 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | NA | 0.00 |
| CIP720201 | 0.91 | 0.00 | 0.13 | 0.00 | NA |

ANEXO 8: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable materia seca (MS).

Type III Analysis of Variance Table with Satterthwaite's method

| | Sum Sq | Mean Sq | NumDF | DenDF | F value | Pr(>F) | (**) |
|----------|---------|---------|-------|---------|---------|----------|------|
| rep | 7.542 | 2.5139 | 3 | 2.9381 | 2.8443 | 0.2097 | |
| tr | 0.004 | 0.0039 | 1 | 2.9583 | 0.0044 | 0.9513 | |
| geno | 122.065 | 30.5162 | 4 | 23.0769 | 34.5267 | 1.98E-09 | *** |
| tr: geno | 6.887 | 1.7217 | 4 | 23.0769 | 1.9479 | 0.1364 | |

Predicciones para MS respecto a los genotipos

| geno | predicted.value | standard.error | upper.Confidence.limit | lower.Confidence.limit | est.status |
|-----------------|-----------------|----------------|------------------------|------------------------|------------|
| 1 CIP312621.097 | 27.185 | 0.3536082 | 27.91042 | 26.45958 | Estimable |
| 2 CIP312682.042 | 24.135 | 0.3536082 | 24.86042 | 23.40958 | Estimable |
| 3 CIP312721.074 | 28.01875 | 0.3536082 | 28.74417 | 27.29333 | Estimable |
| 4 CIP312764.006 | 23.26633 | 0.3820638 | 24.05013 | 22.48254 | Estimable |
| 5 CIP720201 | 26.57 | 0.3536082 | 27.29542 | 25.84458 | Estimable |

Matriz de varianza de los valores predichos: Valores p para todas las diferencias por pares entre los valores predichos

| | CIP312621.097 | CIP312682.042 | CIP312721.074 | CIP312764.006 | CIP720201 |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| CIP312621.097 | NA | 0 | 0.107 | 0 | 0.229 |
| CIP312682.042 | 0.000 | NA | 0.000 | 0.107 | 0.000 |
| CIP312721.074 | 0.107 | 0.000 | NA | 0.000 | 0.007 |
| CIP312764.006 | 0.000 | 0.107 | 0.000 | NA | 0.000 |
| CIP720201 | 0.229 | 0.000 | 0.007 | 0.000 | NA |

ANEXO 9: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable concentración de Hierro en tubérculo en base peso seco Fe (mg kg⁻¹ BS).

| | Sum Sq | Mean Sq | NumDF | DenDF | F value | Pr(>F) | (**) |
|-----------------|---------|---------|-------|---------|----------|---------|------|
| rep | 0.737 | 0.246 | 3 | 3.0362 | 0.5138 | 0.7006 | |
| tr | 0.517 | 0.517 | 1 | 3.04 | 1.0821 | 0.37378 | |
| geno | 305.843 | 76.461 | 4 | 23.0852 | 159.9606 | < 2e-16 | *** |
| tr: geno | 5.143 | 1.286 | 4 | 23.0852 | 2.6898 | 0.05642 | . |

Predicciones para **Fe(mg kg⁻¹MS)** respecto a los genotipos

| | geno | predicted.value | standard.error | upper.Confidence.limit | lower.Confidence.limit | est.status |
|---|---------------|-----------------|----------------|------------------------|------------------------|------------|
| 1 | CIP312621.097 | 10.703504 | 0.2738074 | 11.26521 | 10.141794 | Estimable |
| 2 | CIP312682.042 | 16.269161 | 0.2738074 | 16.83087 | 15.707452 | Estimable |
| 3 | CIP312721.074 | 14.302278 | 0.2738074 | 14.86399 | 13.740569 | Estimable |
| 4 | CIP312764.006 | 16.298804 | 0.2965521 | 16.90717 | 15.690435 | Estimable |
| 5 | CIP720201 | 9.464491 | 0.2738074 | 10.0262 | 8.902781 | Estimable |

Matriz de varianza de los valores predichos: Valores p para todas las diferencias por pares entre los valores predichos

| | CIP312621.097 | CIP312682.042 | CIP312721.074 | CIP312764.006 | CIP720201 |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| CIP312621.097 | NA | 0 | 0 | 0 | 0.003 |
| CIP312682.042 | 0.000 | NA | 0.000 | 0.942 | 0.000 |
| CIP312721.074 | 0.000 | 0.000 | NA | 0.000 | 0.000 |
| CIP312764.006 | 0.000 | 0.942 | 0.000 | NA | 0.000 |
| CIP720201 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | NA |

ANEXO 10: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable concentración de Zinc en tubérculo en base de peso seco Zn (mg kg⁻¹ BS).

| | Sum Sq | Mean Sq | NumDF | DenDF | F value | Pr(>F) | (**) |
|-----------------|---------|---------|-------|---------|---------|-----------|------|
| rep | 4.889 | 1.63 | 3 | 2.8216 | 0.685 | 0.6211749 | |
| tr | 247.908 | 247.908 | 1 | 2.8582 | 104.196 | 0.0024624 | ** |
| geno | 140.023 | 35.006 | 4 | 23.0259 | 14.713 | 4.21E-06 | *** |
| tr: geno | 73.877 | 18.469 | 4 | 23.0259 | 7.7626 | 0.0004098 | *** |

Predicciones para **Zn (mg kg⁻¹ MS)** respecto a los genotipos

| | geno | predicted.value | standard.error | upper.Confidence.limit | lower.Confidence.limit | est.status |
|---|---------------|-----------------|----------------|------------------------|------------------------|------------|
| 1 | CIP312621.097 | 18.603 | 0.5453491 | 19.73088 | 17.47513 | Estimable |
| 2 | CIP312682.042 | 19.54662 | 0.5453491 | 20.67449 | 18.41875 | Estimable |
| 3 | CIP312721.074 | 15.47668 | 0.5453491 | 16.60455 | 14.34881 | Estimable |
| 4 | CIP312764.006 | 21.43081 | 0.5944752 | 22.66028 | 20.20134 | Estimable |
| 5 | CIP720201 | 18.26678 | 0.5453491 | 19.39465 | 17.13891 | Estimable |

Predicciones para **Zn (mg kg⁻¹MS)** respecto a los tratamientos

| | geno:tr | predicted.value | standard.error | upper.Confidence.limit | lower.Confidence.limit | est.status |
|----|---------------------------|-----------------|----------------|------------------------|------------------------|------------|
| 1 | CIP312621.097 CONTROL | 16.34579 | 0.77124 | 17.94084 | 14.75074 | Estimable |
| 2 | CIP312621.097 FOLIAR Zinc | 20.86022 | 0.77124 | 22.45527 | 19.26517 | Estimable |
| 3 | CIP312682.042 CONTROL | 16.26206 | 0.77124 | 17.85711 | 14.66701 | Estimable |
| 4 | CIP312682.042 FOLIAR Zinc | 22.83118 | 0.77124 | 24.42623 | 21.23614 | Estimable |
| 5 | CIP312721.074 CONTROL | 12.74319 | 0.77124 | 14.33824 | 11.14814 | Estimable |
| 6 | CIP312721.074 FOLIAR Zinc | 18.21016 | 0.77124 | 19.80521 | 16.61511 | Estimable |
| 7 | CIP312764.006 CONTROL | 16.54433 | 0.9048712 | 18.41575 | 14.67291 | Estimable |
| 8 | CIP312764.006 FOLIAR Zinc | 26.3173 | 0.77124 | 27.91234 | 24.72225 | Estimable |
| 9 | CIP720201 CONTROL | 17.72941 | 0.77124 | 19.32446 | 16.13436 | Estimable |
| 10 | CIP720201 FOLIAR Zinc | 18.80415 | 0.77124 | 20.3992 | 17.2091 | Estimable |

Matriz de varianza de los valores predichos: Valores p para todas las diferencias por pares entre los valores predichos

| | CIP312621.097, CONTROL | CIP312621.097, FOLIAR Zinc | CIP312682.042 ,CONTROL | CIP312682.042 ,FOLIAR Zinc | CIP312721.074,CON TROL |
|---|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| CIP312621.097,CONTR OL | NA | 0 | 0.939 | 0 | 0.003 |
| CIP312621.097,FOLIAR Zinc | 0 | NA | 0 | 0.084 | 0 |
| CIP312682.042,CONTR OL | 0.939 | 0 | NA | 0 | 0.004 |
| CIP312682.042,FOLIAR Zinc | 0 | 0.084 | 0 | NA | 0 |
| CIP312721.074,CONTR OL | 0.003 | 0 | 0.004 | 0 | NA |
| CIP312721.074,FOLIAR Zinc | 0.101 | 0.023 | 0.087 | 0 | 0 |
| CIP312764.006,CONTR OL | 0.869 | 0.001 | 0.814 | 0 | 0.004 |
| CIP312764.006,FOLIAR Zinc | 0 | 0 | 0 | 0.004 | 0 |
| CIP720201,CONTROL CIP720201,FOLIAR Zinc | 0.217 | 0.009 | 0.192 | 0 | 0 |
| | 0.034 | 0.072 | 0.029 | 0.001 | 0 |
| | CIP312721.074, FOLIAR Zinc | CIP312764.006, CONTROL | CIP312764.006 ,FOLIAR Zinc | CIP720201,CO NTROL | CIP720201,FOLIAR Zinc |
| CIP312621.097,CONTR OL | 0.101 | 0.869 | 0 | 0.217 | 0.034 |
| CIP312621.097,FOLIAR Zinc | 0.023 | 0.001 | 0 | 0.009 | 0.072 |
| CIP312682.042,CONTR OL | 0.087 | 0.814 | 0 | 0.192 | 0.029 |
| CIP312682.042,FOLIAR Zinc | 0 | 0 | 0.004 | 0 | 0.001 |
| CIP312721.074,CONTR OL | 0 | 0.004 | 0 | 0 | 0 |
| CIP312721.074,FOLIAR Zinc | NA | 0.174 | 0 | 0.663 | 0.591 |
| CIP312764.006,CONTR OL | 0.174 | NA | 0 | 0.329 | 0.07 |
| CIP312764.006,FOLIAR Zinc | 0 | 0 | NA | 0 | 0 |
| CIP720201,CONTROL CIP720201,FOLIAR Zinc | 0.663 | 0.329 | 0 | NA | 0.335 |
| | 0.591 | 0.07 | 0 | 0.335 | NA |

ANEXO 11: Promedio de los tratamientos en la fase vegetativa.

| Variables | PLAHE | | SNPP | | Plant_Vigor | | SE | |
|---------------------|------------|------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| | Control | Foliar Zn | Control | Foliar Zn | Control | Foliar Zn | Control | Foliar Zn |
| Tratamientos | | | | | | | | |
| Genotipos | | | | | | | | |
| BIOT-621.097 | 29.7±1.57 | 25.26±1.6 | 1.45±0.4 | 2.27±0.41 | 4±0.42 | 4.8±0.42 | 5.7±0.38 | 5.66±0.38 |
| BIOT-682.042 | 36.05±1.57 | 40.7±1.57 | 1.9±0.4 | 1.4±0.4 | 6.1±0.42 | 6.1±0.42 | 6.5±0.38 | 5.9±0.38 |
| BIOT-721.074 | 42.3±1.57 | 44.3±1.57 | 3±0.4 | 2.8±0.4 | 6.8±0.42 | 7±0.42 | 6.4±0.38 | 5.8±0.38 |
| BIOT-764.006 | 27.32±1.96 | 27±1.67 | 2.29±0.47 | 2.63±0.42 | 7.26±0.52 | 7.38±0.44 | 6.51±0.46 | 6±0.39 |
| Yungay | 25.38±1.67 | 28.56±1.67 | 1.56±0.42 | 1.19±0.42 | 6.75±0.44 | 6.13±0.44 | 5.13±0.39 | 5.75±0.39 |
| \bar{x} | 32.15 | 33.16 | 2.04 | 2.06 | 6.18 | 6.28 | 6.05 | 5.82 |

ANEXO 12: Promedio de los tratamientos en la cosecha.

| Variables Tratamientos | TNTP | | TTWP (g/planta) | | AWT (kg/planta) | |
|---------------------------|------------|------------|------------------|------------------|-----------------|------------|
| | Control | Foliar Zn | Control | Foliar Zn | Control | Foliar Zn |
| Genotipo | | | | | | |
| BIOT-621.097 | 10.8±3.29 | 9.8±3.38 | 99.41±12.35 | 107.72±12.4 3 | 10.21±0.7 1 | 12.13±0.72 |
| BIOT-682.042 | 26.15±3.29 | 25.95±3.29 | 178.71±12.3 5 | 192.34±12.3 5 | 7.07±0.71 | 7.66±0.71 |
| BIOT-721.074 | 17.65±3.29 | 17.3±3.29 | 155.39±12.3 5 | 168.14±12.3 5 | 9.42±0.71 | 10.26±0.71 |
| BIOT-764.006 | 84.42±4.3 | 92.06±3.68 | 171.16±14.0 5 | 194.54±12.7 | 1.87±0.9 | 2.37±0.77 |
| Yungay | 11.06±3.68 | 11.38±3.68 | 113.05±12.7 | 114.79±12.7 | 10.8±0.77 | 10.98±0.77 |
| \bar{X} | 30.02 | 31.30 | 143.54 | 155.50 | 7.87 | 8.68 |

ANEXO 13: Promedio de los tratamientos durante la poscosecha.

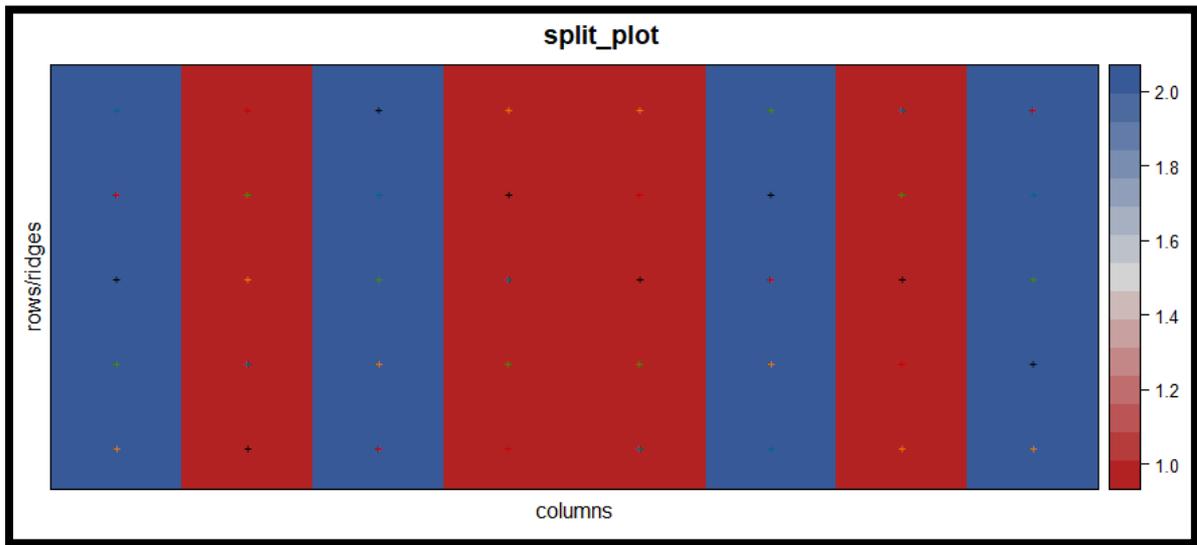
| Variables Tratamientos | MS | | Fe (mg kg ⁻¹ MS) | | Zn (mg kg ⁻¹ MS) | |
|---------------------------|------------|------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------|
| | Control | Foliar Zn | Control | Foliar Zn | Control | Foliar Zn |
| Genotipo | | | | | | |
| BIOT-621.097 | 27.67±0.76 | 26.7±0.24 | 10.86±0.35 | 10.55±0.35 | 16.35±1.87 | 20.86±0.84 |
| BIOT-682.042 | 23.7±1.17 | 24.58±1.4 | 15.79±0.35 | 16.75±0.35 | 16.26±1.09 | 22.83±1.94 |
| BIOT-721.074 | 28.13±0.86 | 27.91±0.73 | 14.15±0.35 | 14.45±0.35 | 12.75±0.49 | 18.21±1.21 |
| BIOT-764.006 | 24.02±0.68 | 22.98±1.71 | 15.35±0.41 | 17.03±0.35 | 16.37±0.83 | 26.32±1.01 |
| Yungay | 26±1.82 | 27.14±0.69 | 9.57±0.35 | 9.35±0.35 | 17.73±2.85 | 18.81±1.58 |
| \bar{X} | 25.91 | 25.86 | 13.15 | 13.63 | 15.89 | 21.40 |

ANEXO 14: Matriz de correlaciones de Pearson de las variables de estudio (P-value).

| Control | TTWP | TNTP | AWT | SNPP | PLAHE | Plant_Vigor | SE | MS | Fe | Zn |
|--------------------|-------------|-------------|------------|-------------|--------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| TTWP | 1.00 | 0.37 | -0.38 | 0.46* | 0.72* | 0.34 | 0.39 | -0.34 | 0.81 | -0.52 |
| TNTP | 0.37 | 1.00 | -0.95 | 0.25 | -0.09 | 0.43 | 0.32 | -0.54 | 0.67 | -0.02 |
| AWT | -0.38 | -0.95* | 1.00 | -0.15 | 0.08 | -0.30 | -0.41 | 0.55 | -0.71 | -0.11 |
| SNPP | 0.46 | 0.25 | -0.15 | 1.00 | 0.43 | 0.28 | 0.08 | 0.09 | 0.43 | -0.58 |
| PLAHE | 0.72 | -0.09 | 0.08 | 0.43 | 1.00 | 0.08 | 0.50* | 0.21 | 0.53 | -0.72 |
| Plant_Vigor | 0.34 | 0.43 | -0.30 | 0.28 | 0.08 | 1.00 | -0.02 | -0.21 | 0.30 | -0.26 |
| SE | 0.39 | 0.32 | -0.41 | 0.08 | 0.50 | -0.02 | 1.00 | -0.24 | 0.58 | -0.14 |
| MS | -0.34 | -0.54* | 0.55* | 0.09 | 0.21 | -0.21 | -0.24 | 1.00 | -0.42 | -0.32 |
| Fe | 0.81* | 0.67* | -0.71* | 0.43 | 0.53* | 0.30 | 0.58* | -0.42 | 1.00 | -0.32 |
| Zn | -0.52* | -0.02 | -0.11 | -0.58* | -0.72* | -0.26 | -0.14 | -0.32 | -0.32 | 1.00 |

| Foliar Zn | TTWP | TNTP | AWT | SNPP | PLAHE | Plant_Vigor | SE | MS | Fe | Zn |
|--------------------|-------------|-------------|------------|-------------|--------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| TTWP | 1.00 | 0.41 | -0.37 | 0.22 | 0.67* | 0.41 | 0.10 | -0.44 | 0.75 | 0.31 |
| TNTP | 0.41 | 1.00 | -0.90 | 0.35 | -0.19 | 0.57* | 0.17 | -0.76 | 0.66 | 0.81 |
| AWT | -0.37 | -0.90* | 1.00 | -0.25 | 0.18 | -0.44* | -0.18 | 0.71 | -0.73 | -0.78 |
| SNPP | 0.22 | 0.35 | -0.25 | 1.00 | 0.00 | 0.22 | 0.46* | -0.11 | 0.23 | 0.20 |
| PLAHE | 0.67 | -0.19 | 0.18 | 0.00 | 1.00 | 0.27 | 0.03 | 0.20 | 0.40 | -0.29 |
| Plant_Vigor | 0.41 | 0.57 | -0.44 | 0.22 | 0.27 | 1.00 | 0.09 | -0.18 | 0.34 | 0.16 |
| SE | 0.10 | 0.17 | -0.18 | 0.46 | 0.03 | 0.09 | 1.00 | -0.28 | 0.07 | 0.23 |
| MS | -0.44 | -0.76* | 0.71* | -0.11 | 0.20 | -0.18 | -0.28 | 1.00 | -0.56 | -0.86 |
| Fe | 0.75* | 0.66* | -0.73* | 0.23 | 0.40 | 0.34 | 0.07 | -0.56* | 1.00 | 0.65 |
| Zn | 0.31 | 0.81* | -0.78* | 0.20 | -0.29 | 0.16 | 0.23 | -0.86* | 0.65* | 1.00 |

ANEXO 15: Diseño split-plot en condiciones de invernadero.



ANEXO 16: Registro fotográfico.



Plantas en magentas



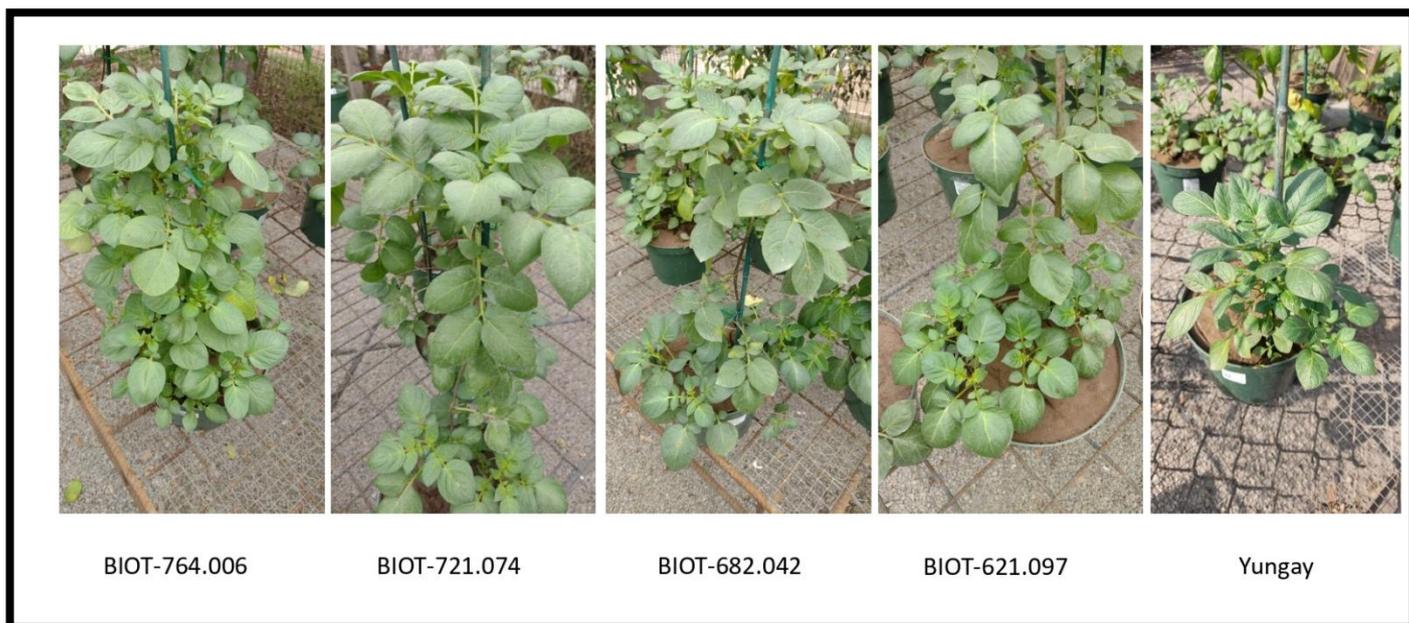
Trasplante de plantas a Jiffy's



Transplante e instalación de plantas en invernadero



Instalación de plantas en patio experimental



Genotipos biofortificados y Yungay



Aplicación foliar manual.



Proceso de cosecha y toma de datos



Cosecha, toma de fotografías y pesaje de tubérculos



Cosecha de tubérculos



Tubérculos de los genotipos biofortificados y Yungay



Empaquetado de tubérculos por planta



Tubérculos acondicionados en cámaras frías hasta su procesamiento y análisis



Procesamiento de tubérculos para determinación de materia seca

ANEXO 17: Respuesta de los cultivos al tratamiento con fertilizantes basados en micronutrientes.

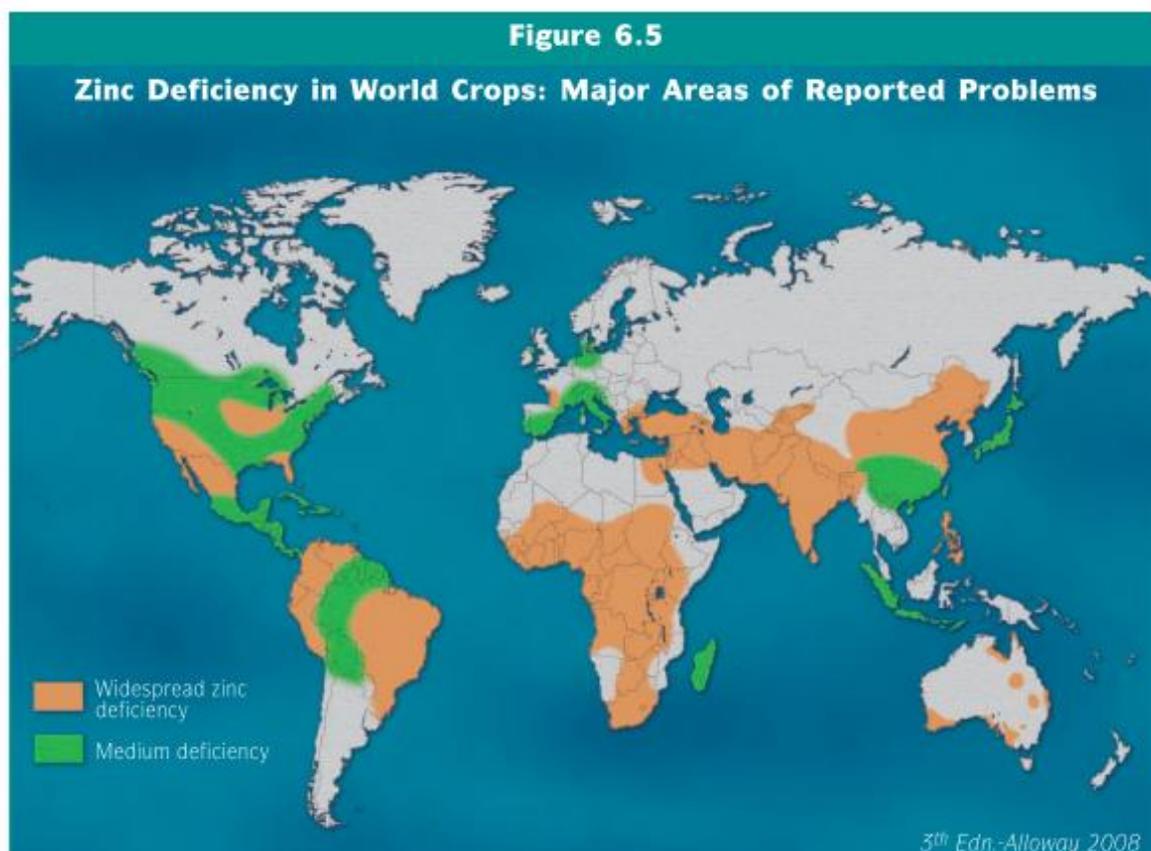
| Response of Crops to Treatment with Micronutrient Fertilisers | | | | | |
|--|-------------|---------------|--------------|------------------|-------------|
| | Zinc | Copper | Boron | Manganese | Iron |
| Alfalfa | Low | High | High | Med/Low | Medium |
| Apple | High | Medium | High | High | - |
| Barley | Medium | Medium | Low | Medium | High/Med |
| Oil Seed Rape* | Medium | Low | High | Medium | - |
| Clover | Medium | Medium | Medium | Medium | - |
| Grass | Low | Low | Low | Medium | High |
| Maize (Corn) | High | Medium | Low/Med | Medium | Medium |
| Oats | Low | High | Low | High | Medium |
| Pea | Low | Low | Low | High | Medium |
| Potato | Medium | Low | Low | High | - |
| Rice | High | Low | Low | Medium | Med/Low |
| Rye | Low | Low | Low | Low | Low |
| Spinach | Medium | High | Medium | High | High |
| Sorghum | High | Medium | Low | High/Med | High |
| Sugar beet | Medium | Medium | High | High | High |
| Vine (Grapes) | Low | Medium | High | High | High |
| Wheat | Med/Low | High | Low | High | Low |

* also called Canola

Source: Martens and Chesterman (6), Loué (27), Prasad and Power (28), Follet et al. (29).

Fuente: Alloway (2008).

ANEXO 18: Deficiencia de Zn en cultivos del mundo.



Fuente: Alloway (2008).

ANEXO 19: Dietas recomendadas con contenido de Zn, respecto a la edad de vida y dietas sugeridas por IZiNCG.

Table 2.4

Revised Recommended Dietary Allowances (RDAs) for zinc by life stage, and diet type as suggested by IZiNCG ⁽¹⁰²⁾

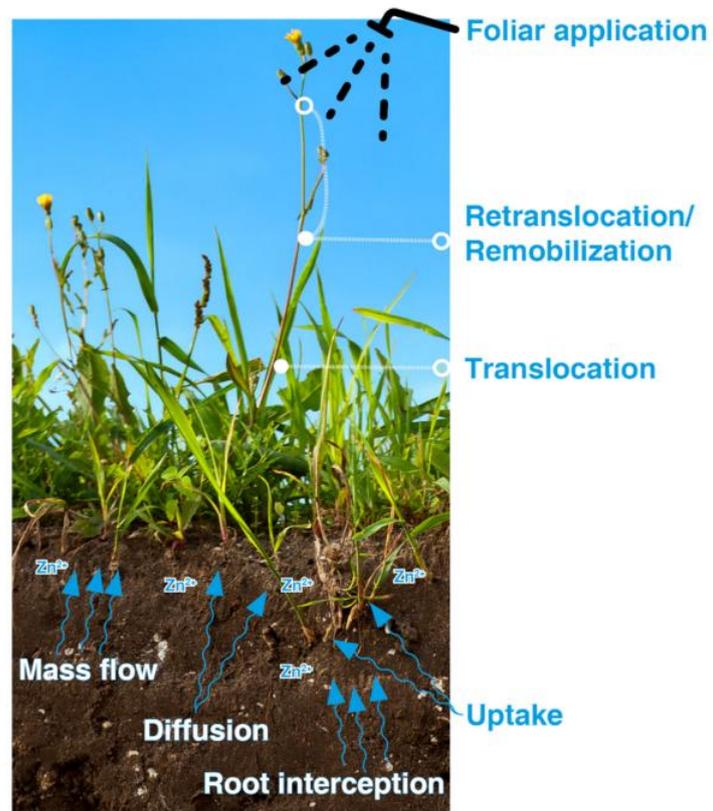
Revisions suggested by IZiNCG for RDA for zinc (mg day⁻¹)

| Age | Sex | Reference body Weight (kg) | Mixed or refined Vegetarian diets | Unrefined cereal-based diets |
|-------------|-------|----------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 6-11 months | M + F | 9 | 4 | 5 |
| 1-3 years | M + F | 12 | 3 | 3 |
| 4-8 years | M + F | 21 | 4 | 5 |
| 9-13 years | M + F | 38 | 6 | 9 |
| 14-18 years | M | 64 | 10 | 14 |
| 14-18 years | F | 56 | 9 | 11 |
| Pregnancy | F | - | 11 | 15 |
| Lactation | F | - | 10 | 11 |
| > 19 years | M | 65 | 13 | 19 |
| > 19 years | F | 55 | 8 | 9 |
| Pregnancy | F | - | 10 | 13 |
| Lactation | F | - | 9 | 10 |

M = male, F = female

Fuente: Alloway (2008).

ANEXO 20: Captación, translocación y removilización de Zn en plantas.



Fuente: Praharaj et al. (2021).

ANEXO 21: Contenido de zinc, densidad de zinc, contenido de fitato y proporciones molares de fitato a zinc de los alimentos de consumo común.

| Grupo Alimenticio | Contenido de Zn | | Contenido de Fitato | | Zinc Relación molar |
|---|-----------------------|--------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------|
| | mg 100g ⁻¹ | mg kcal ⁻¹ | 100 1 | mg 100g ⁻¹ Fitato: | |
| Hígado, riñón (carne de res, ave de corral) | 4.2 - 6.1 | 2.7 - 3.8 | 0 | 0 | |
| Carne (vaca, cerdo) | 2.9 - 4.7 | 1.1 - 2.8 | 0 | 0 | |
| Ave de corral (pollo, pato, etc) | 1.8 - 3.0 | 0.6 - 1.4 | 0 | 0 | |
| Mariscos (Pescado, etc.) | 0.5 - 5.2 | 0.3 - 1.7 | 0 | 0 | |
| Huevos (pollo, pato) | 1.1 - 1.4 | 0.7 - 0.8 | 0 | 0 | |
| Lácteos (leche de vaca, queso) | 0.4 - 3.1 | 0.3 - 1.0 | 0 | 0 | |
| Semillas, nueves (sésamo, calabaza, almendra) | 2.9 - 7.8 | 0.5 - 1.4 | 1760-4710 | 22 - 88 | |
| Pan (harina blanca, levadura) | 0.9 | 0.3 | 30 | 3 | |
| Cereal integral (trigo, maíz, arroz integral etc.) | 0.5 - 3.2 | 0.4 - 0.9 | 211 - 618 | 22 - 53 | |
| Frijoles, lentejas (soya, frijoles, garbanzos, etc) | 1.0 - 2.0 | 0.9 - 1.2 | 110 - 617 | 19 - 56 | |
| Cereales refinados (harina blanca, arroz blanco, etc) | 0.4 - 0.8 | 0.2 - 0.4 | 30 - 439 | 16 - 54 | |
| Raíz de yuca fermentada | 0.7 | 0.2 | 70 | 10 | |
| Tubérculos | 0.3 - 0.5 | 0.2 - 0.5 | 93 - 131 | 3-27 | |
| Vegetales | 0.1 - 0.8 | 0.3 - 3.5 | 0 - 116 | 0 - 42 | |
| Frutas | 0 - 0.2 | 0 - 0.6 | 0 - 63 | 0 - 31 | |

Fuente: Brown (2004).

ANEXO 22: El contenido mineral de 200 g en papas frescas y su contribución a la Ingesta Dietética de Referencia (DRI) en EE. UU.

| | | DRI | Papa (estadounidense) | Papa (Reino Unido) | Porcentaje DRI |
|----|------|------|--------------------------|-----------------------|-------------------|
| N | (mg) | NS | - | 660 | - |
| S | (mg) | NS | - | 60 | - |
| K | (mg) | 4700 | 850 | 720 | 18 |
| Cl | (mg) | 2300 | - | 132 | - |
| Ca | (mg) | 1000 | 22 | 10 | 2.2 |
| P | (mg) | 700 | 118 | 74 | 17 |
| Na | (mg) | 1500 | 12 | 14 | 0.8 |
| Mg | (mg) | 420 | 45 | 34 | 11 |
| Fe | (mg) | 8 | 1.4 | 0.8 | 5.5 |
| Zn | (mg) | 11 | 0.6 | 0.6 | 13 |
| Mn | (mg) | 2.3 | 0.3 | 0.2 | 26 |
| Cu | (µg) | 900 | 231 | 160 | 25 |
| I | (µg) | 150 | 37 | 6 | 25 |

Fuente: White et al. (2009).

ANEXO 23: Resultado de análisis de agua.

| PARÁMETRO | RESULTADO | UNIDAD | MÉTODO | TÉCNICA |
|--|------------------|-----------|--------------------|-----------------------|
| pH a 23.4 °C | 8.16 | | EPA 150.1 | Electrométrico |
| Conductividad Eléctrica a 25 °C. | 0.77 | mS / cm | EPA 120.1 | Electrométrico |
| Calcio (Ca) | 5.15 | mEq-g / L | EPA 215.1 | FAAS |
| Magnesio(Mg) | 1.30 | mEq-g / L | EPA 242.1 | FAAS |
| Sodio(Na) | 1.97 | mEq-g / L | EPA 273.1 | FAAS |
| Potasio(K) | 0.12 | mEq-g / L | EPA 258.1 | FAAS |
| Amonio (NH ₄ ⁺) | < 0.01 | mEq-g / L | UNE 77028:1983 | Volumétrico |
| Cloruro (Cl ⁻) | 2.03 | mEq-g / L | SM 4500 Cl- B | Argentométrico |
| Sulfato(SO ₄ ⁻²) | 3.10 | mEq-g / L | EPA 375.4 | Turbidimétrico |
| Nitrato (NO ₃ ⁻) | 0.62 | mEq-g / L | MEA - 001 | Colorimétrico |
| Carbonato (CO ₃ ⁻²) | 0.12 | mEq-g / L | SM 2320 B | Volumétrico |
| Bicarbonato(HCO ₃ ⁻¹) | 2.73 | mEq-g / L | SM 2320 B | Volumétrico |
| Fósforo (H ₂ PO ₄ ⁻¹) | < 0.01 | mEq-g / L | SM 4500-P B,E | Colorimétrico |
| Cobre (Cu) | < 0.01 | ppm | EPA 220.1 | FAAS |
| Zinc (Zn) | 0.04 | ppm | EPA 289.1 | FAAS |
| Manganeso (Mn) | < 0.01 | ppm | EPA 243.1 | FAAS |
| Hierro (Fe) | 0.04 | ppm | EPA 236.1 | FAAS |
| Boro (B) | 0.33 | ppm | ISO 9390 : 1990 | Colorimétrico |
| R. A. S. | 1.10 | | MEA - 002 | Cálculo Matemático |

Metales pesados

| PARÁMETROS | RESULTADO | UNIDAD | MÉTODO | TÉCNICA |
|-----------------|-----------|--------|------------|---------|
| Plomo (Pb) | 0.067 | mg / L | MFES - 070 | FAAS |
| Cadmio (Cd) | 0.005 | mg / L | MFES - 071 | FAAS |
| Cromo (Cr) | 0.067 | mg / L | MFES - 072 | FAAS |
| Mercurio(Hg) | 0.001 | mg / L | MFES - 073 | CVAAS |
| Arsénico (As) | 0.001 | mg / L | MFES - 074 | HGAAS |

Dureza total

| RESULTADO | UNIDAD | MÉTODO | TÉCNICA |
|-----------|--------------------------|-----------|------------|
| 300.00 | ppm CaCO ₃ | EPA 130.2 | Volumetria |

DONDE:

R.A.S. : Relación de Adsorción de Sodio. ppm : mg / L

MEA : Método propio del Laboratorio.

FAAS : Espectrometría de Absorción Atómica.

HGAAS : Espectrometría de Absorción Atómica por Generador de Hidruros

CVAAS : Espectrometría de Absorción Atómica por Vapor Frio

MFES : Método Propio del Laboratorio

ANEXO 24: Resultado de análisis de suelo.

| PARÁMETRO | RESULTADO | UNIDAD | MÉTODO | TÉCNICA |
|--|---------------------------------------|-------------|----------------|-------------------------------|
| Textura | | | | |
| Arena | 51.97 | % | | |
| Limo | 25.02 | % | | |
| Arcilla | 23.01 | % | MES - 001 | Bouyoucos |
| Clase Textural | FRANCO ARCILLO ARENOSA | | | |
| Porcentaje de Saturación de Agua | 34.88 | % | MES - 002 | Gravimétrico |
| Carbonato de Calcio Total | 1.86 | % | MES - 003 | Gravimétrico |
| Conductividad Eléctrica (E.S) a 25 °C. | 4.58 | dS / m | MES - 004 | Electrométrico |
| pH (1/1) a Temp = 19.8 °C | 7.88 | | MES - 005 | Electrométrico |
| Fósforo Disponible | 39.00 | ppm | MES - 006 | Olsen |
| Materia Orgánica | 1.48 | % | MES - 007 | Walkley y Black |
| Nitrógeno Total | 0.086 | % | MES - 008 | Kjeldahl |
| Potasio Disponible | 343.60 | ppm | MES - 009 | Acetato de Amonio |
| Cationes Cambiables | | | | Extractante:Ac. Amonio |
| Calcio | 12.89 | mEq / 100 g | MES - 010 | FAAS |
| Magnesio | 1.24 | mEq / 100 g | MES - 011 | FAAS |
| Sodio | 0.28 | mEq / 100 g | MES - 012 | FAAS |
| Potasio | 0.80 | mEq / 100 g | MES - 013 | FAAS |
| P.S.I | 1.81 | % | MES - 015 | Cálculo Matemático |
| C.I.C.E | 15.21 | mEq / 100 g | MES - 017 | Cálculo Matemático |
| Sales Disueltas | | | | |
| Cloruro | 7.75 | mEq / L | SM 4500 CL - B | Argentométrico |
| Sulfato | 17.92 | mEq / L | EPA 375.4 | Turbidimétrico |
| Nitrato | 25.11 | mEq / L | MEA - 001 | Colorimétrico |
| Carbonato | < 0.02 | mEq / L | SM 2320 B | Volumétrico |
| Bicarbonato | 2.72 | mEq / L | SM 2320 B | Volumétrico |
| Calcio | 34.97 | mEq / L | EPA 215.1 | FAAS |
| Magnesio | 6.92 | mEq / L | EPA 242.1 | FAAS |
| Sodio | 8.46 | mEq / L | EPA 273.1 | FAAS |
| Potasio | 2.30 | mEq / L | EPA 258.1 | FAAS |
| Boro | 0.78 | ppm (*) | ISO 9390.1990 | Colorimétrico |

Análisis de micronutrientes disponibles

| PARÁMETRO | RESULTADOS | UNIDAD | MÉTODO | TÉCNICA |
|------------------------------|--------------|--------|-----------|---|
| Cobre Disponible (Cu) | 5.04 | ppm | MES - 018 | Extractante: DTPA FAAS |
| Zinc Disponible (Zn) | 15.75 | ppm | MES - 019 | FAAS |
| Manganeso Disponible (Mn) | 13.59 | ppm | MES - 020 | FAAS |
| Hierro Disponible (Fe) | 8.87 | ppm | MES - 021 | FAAS |
| Boro Disponible (B) | 3.80 | ppm | MES - 022 | Extractante: CaCl₂.2H₂O Colorimétrico |

DONDE:

E.S : Extracto de Saturación. MES y MEA : Método Propio del Laboratorio.

DTPA : Pentaacetato de Dietilentiámina. MES : Método propio del Laboratorio.

FAAS : Espectrometría de Absorción Atómica por Llama.

ppm : mg kg⁻¹