

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN SUELOS**



**“APLICACIÓN EDÁFICA DE ZINC PARA LA BIOFORTIFICACIÓN
DE CUATRO VARIEDADES DE PAPA (*Solanum tuberosum* L.) EN EL
VALLE DEL MANTARO”**

Presentada por:

FERNANDO BRAULIO CHUNG MONTOYA

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

Lima - Perú

2022

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN SUELOS**

**“APLICACIÓN EDÁFICA DE ZINC PARA LA BIOFORTIFICACIÓN
DE CUATRO VARIETADES DE PAPA (*Solanum tuberosum* L.) EN EL
VALLE DEL MANTARO”**

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

Presentada por:

FERNANDO BRAULIO CHUNG MONTOYA

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dra. Lily Tello Peramás
PRESIDENTE

Ph.D. Sady García Bendezú
ASESOR

Dr. Oscar Loli Figueroa
CO-ASESOR

Mg. Sc. Luis Tomassini Vidal
MIEMBRO

Mg. Sc. Rolando Egúsquiza Bayona
MIEMBRO

DEDICATORIA

Al Gran Creador; a mi padre Raúl; y a Pancho, en el cielo, con almendras.

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá Luz y mi padrastro Roger, por su apoyo durante todo este tiempo, gracias por todo.

A mis hermanos, Sujin y Jorge, por el amor infinito que siempre me han mostrado.

Al Dr. Sady García Bendezú, por su apoyo en la elaboración de este trabajo de investigación, con sus recomendaciones y consejos. Gracias por ser un buen mentor.

Al Dr. Óscar Loli Figueroa, por su gran labor como profesor y como ejemplo.

A los miembros del jurado, la Dra. Lily Tello Peramás, el Ing. Mg Sc. Luis Tomassini Vidal, y al Ing. Mg Sc. Rolando Egúsqiza Bayona por sus aportes y correcciones en el presente trabajo, los cuales no hicieron más que enriquecerlo y mejorarlo.

Al Sr. Mario Jiménez y al Sr. Óscar Sigil, por la ayuda que me brindaron en el Laboratorio e Invernadero de Fertilidad del Suelo.

Al Ing. Mg Sc. Jesús Vera, por el apoyo brindado en Quilcas (Huancayo), durante el ensayo de campo del presente trabajo de investigación.

A la Sra. Jesús Gutiérrez y la Sra. Rosmery Arteaga, por su empuje y su apoyo para poder llegar a concretar la sustentación de la tesis.

A Sussan, por tu apoyo y tus consejos para poder superar las últimas fases de la tesis, y lograr sustentarla. Muy agradecido.

A mis amigos César Padilla, Giorgio Cruz y Erick Dionisio.

A todos los que de alguna forma me ayudaron en la consecución del presente trabajo, les agradezco mucho.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1.	IMPORTANCIA DEL CULTIVO DE PAPA EN EL PAÍS.....	3
2.2.	HÁBITOS DE CONSUMO Y APORTE NUTRICIONAL DE LA PAPA.....	3
2.3.	PRODUCCIÓN, SUPERFICIE COSECHADA Y RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE PAPA.....	6
2.3.1.	Superficie cosechada nacional y de la región Junín	6
2.3.2.	Producción nacional y de la región Junín	8
2.3.3.	Rendimiento de la producción de papa a nivel nacional y de la región Junín ..	9
2.4.	ESTADO ACTUAL DE LA DESNUTRICIÓN EN EL MUNDO Y EN EL PAÍS	11
2.5.	LA BIOFORTIFICACIÓN COMO HERRAMIENTA PARA COMBATIR LA DESNUTRICIÓN.....	13
2.6.	EL ZINC EN LA ALIMENTACIÓN HUMANA	15
2.7.	EL ZINC EN EL SUELO Y EN LA PLANTA	16
2.8.	BIOFORTIFICACIÓN AGRONÓMICA.....	20
2.9.	BIOFORTIFICACIÓN CON ZINC EN PAPA	21
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
3.1.	UBICACIÓN DEL CAMPO EXPERIMENTAL.....	22
3.2.	MATERIALES	22
3.3.	TRATAMIENTOS.....	24
3.4.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	25
3.4.1.	Diseño experimental	25
3.4.2.	Tratamiento estadístico de datos	25
3.5.	DISTRIBUCIÓN DE LAS UNIDADES EXPERIMENTALES.....	26
3.6.	VARIABLES EVALUADAS	27
3.6.1.	Variables biométricas	27
3.6.2.	Variables químicas en la planta.....	27
3.7.	PROCEDIMIENTO	27
3.7.1.	Instalación del experimento de campo	27
3.7.2.	Evaluación de las características biométricas del cultivo.....	31
3.7.3.	Evaluación de las características químicas del cultivo	32
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
4.1.	VARIABLES BIOMÉTRICAS	35

4.1.1. Biomasa aérea.....	35
4.1.2. Rendimiento.....	36
4.2. VARIABLES QUÍMICAS EN LA PLANTA	41
4.2.1. Concentración de Zn en la planta.....	41
4.2.2. Concentración de Zn en tubérculo	42
4.2.3. Extracción de Zn	48
4.2.4. Eficiencia aparente de recuperación	49
V. CONCLUSIONES	51
VI. RECOMENDACIONES	52
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
VIII. ANEXOS	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Consumo per cápita, suministro energético, proteico y de grasa suministrado por el consumo de papa en el Perú y en el mundo en el 2018.	4
Tabla 2: Consumo per cápita, suministro energético, proteico y de grasa suministrado por el consumo de papa en el Perú.....	5
Tabla 3: Aporte de energía, proteínas y grasa de algunas variedades de papa (considerando 100 g de parte comestible).....	5
Tabla 4: Superficie cosechada de papa por regiones respecto a la superficie sembrada nacional, 2013-2020.	7
Tabla 5: Producción de papa por regiones respecto a la producción nacional, 2013-2020.	9
Tabla 6: Rendimiento de producción de papa por regiones y a nivel nacional, 2013-2020.	10
Tabla 7: Factores y niveles de factor del diseño experimental.....	24
Tabla 8: Tratamientos del diseño experimental.....	24
Tabla 9: Análisis de caracterización del suelo.....	28
Tabla 10: Fraccionamiento y fertilización base del campo experimental.	30
Tabla 11: Dosis de Zn y aplicación de $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	30
Tabla 12: Rangos de diámetros mayor y menor (mm) y peso (g) según el calibre y la variedad de papa (INDECOPI 2010).....	32
Tabla 13: Efecto de la aplicación edáfica de dosis crecientes de Zn sobre la producción de materia seca de la parte aérea en cuatro variedades de papa.	36
Tabla 14: Producción de materia seca de la parte aérea de cuatro variedades de papa.	36
Tabla 15: Rendimiento comercial y total de cuatro variedades de papa.	37
Tabla 16: Efecto de la aplicación edáfica de dosis crecientes de Zn sobre el rendimiento comercial de cuatro variedades de papa.	38
Tabla 17: Efecto de la aplicación edáfica de dosis crecientes de Zn sobre el rendimiento total de cuatro variedades de papa.....	38
Tabla 18: Efecto de la aplicación edáfica de dosis crecientes de Zn sobre la concentración de Zn en plantas de cuatro variedades de papa.....	41
Tabla 19: Efecto de la aplicación edáfica de dosis crecientes de Zn sobre la concentración de zinc en cáscara de tubérculo en cuatro variedades de papa.	43

Tabla 20: Efecto de la aplicación edáfica de dosis crecientes de Zn sobre la concentración de zinc en pulpa de tubérculo en cuatro variedades de papa.	43
Tabla 21: Efecto de la aplicación edáfica de dosis crecientes de Zn sobre el aporte de zinc (mg) por 100 g de materia seca de tubérculo en cuatro variedades de papa.	47
Tabla 22: Efecto de la aplicación edáfica de dosis crecientes de Zn sobre la extracción total de zinc de la parte aérea en cuatro variedades de papa.	48
Tabla 23: Efecto de la aplicación edáfica de dosis crecientes de Zn sobre la extracción total de zinc de tubérculos en cuatro variedades de papa.	49
Tabla 24: Extracción total (ET) y eficiencia aparente de recuperación (ER) de Zn en cuatro variedades de papa con dosis crecientes de Zn.....	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Superficie cosechada nacional y en Junín 1950-2020.....	6
Figura 2. Producción de papa a nivel nacional y en la región Junín 1950-2020.	8
Figura 3. Rendimiento de papa a nivel nacional y en la región Junín 1950-2020.....	11
Figura 4. División del campo experimental en parcelas, subparcelas y sus dimensiones. 26	
Figura 5. División del campo experimental en bloques.	26
Figura 6. División del campo experimental en unidades experimentales.	27
Figura 7. Relación entre el contenido promedio de zinc en la cáscara y en la pulpa del tubérculo y la dosis de Zn (kg ha^{-1}).	46

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Cuadro ANVA de rendimiento total.....	79
Anexo 2: Supuestos previos para el análisis de varianza del rendimiento total.....	80
Anexo 3: Cuadro de efectos simples de dosis en variedades (Niveles de B en A) para la rendimiento total.....	81
Anexo 4: Cuadro ANVA de rendimiento comercial.....	82
Anexo 5: Supuestos previos para el análisis de varianza del rendimiento comercial.....	83
Anexo 6: Cuadro de efectos simples de dosis en variedades (Niveles de B en A) para la rendimiento comercial.....	84
Anexo 7: Cuadro ANVA de concentración de zinc en planta.....	85
Anexo 8: Supuestos previos para el análisis de varianza de la concentración foliar de zinc.	86
Anexo 9: Cuadro de efectos simples de dosis en variedades (Niveles de B en A) para la concentración de Zn en planta.....	87
Anexo 10: Cuadro ANVA de la materia seca aérea.....	88
Anexo 11: Supuestos previos para el análisis de varianza de la materia seca aérea.....	89
Anexo 12: Cuadro de efectos simples de dosis en variedades (Niveles de B en A) para la materia seca aérea.....	90
Anexo 13: Cuadro ANVA de concentración de zinc en la cáscara de tubérculo.....	91
Anexo 14: Supuestos previos para el análisis de varianza de la concentración de zinc en la cáscara de tubérculo.....	92
Anexo 15: Cuadro de efectos simples de dosis en variedades (Niveles de B en A) para la concentración de zinc en cáscara de tubérculo.....	93
Anexo 16: Cuadro ANVA de concentración de zinc en pulpa de tubérculo.....	94
Anexo 17: Supuestos previos para el análisis de varianza de la concentración de zinc en pulpa de tubérculo.....	95
Anexo 18: Cuadro de efectos simples de dosis en variedades (Niveles de B en A) para la concentración de zinc en pulpa de tubérculo.....	96
Anexo 19: Cuadro ANVA de extracción de zinc en la materia seca aérea (g ha^{-1}) por unidad experimental.....	97
Anexo 20: Supuestos previos para el análisis de varianza de la extracción de zinc en la materia seca aérea (g ha^{-1}) por unidad experimental.....	98

Anexo 21: Cuadro de efectos simples de dosis en variedades (Niveles de B en A) para la extracción de zinc en la materia seca aérea (g ha^{-1}) por unidad experimental.	99
Anexo 22: Cuadro ANVA de extracción de zinc en tubérculos de papa (g ha^{-1}) por unidad experimental.	100
Anexo 23: Supuestos previos para el análisis de varianza de la extracción de zinc en tubérculos de papa (g ha^{-1}) por unidad experimental.	101
Anexo 24: Cuadro de efectos simples de dosis en variedades (Niveles de B en A) para la extracción de zinc en tubérculos de papa (g ha^{-1}) por unidad experimental.	102
Anexo 25: Cuadro ANVA de cantidad de Zn aportado (g) por 100 g de tubérculo seco por unidad experimental.	103
Anexo 26: Supuestos previos para el análisis de varianza de la cantidad de Zn aportado (g) por 100 g de tubérculo seco por unidad experimental.....	104
Anexo 27: Cuadro de efectos simples de dosis en variedades (Niveles de B en A) para la cantidad de Zn aportado (g) por 100 g de tubérculo seco por unidad experimental.	105
Anexo 28: Porcentaje de materia seca de tubérculos de las variedades Canchan y Perricholi.	106
Anexo 29: Porcentaje de materia seca de tubérculos de las variedades Peruanita y Yungay.	107
Anexo 30: Composición de Zinc en algunos alimentos (Reyes <i>et al.</i> 2017).....	108
Anexo 31: Descripción de la calicata.	109

RESUMEN

El zinc es uno de los elementos esenciales en la salud humana. Su deficiencia afecta a alrededor del 30 % de la población mundial y es causada por la mala calidad de la dieta y por la baja ingesta. La papa (*Solanum tuberosum* L.) es un cultivo de importancia económica y base de la alimentación en el Perú, por lo que la biofortificación agronómica es considerada una estrategia para aumentar el contenido Zn en los tubérculos de papa. Un ensayo de campo fue instalado durante la campaña 2017-2018 en un suelo ácido en el valle del Mantaro para evaluar la respuesta de cuatro variedades de papa (Canchán, Perricholi, Peruanita y Yungay), a la aplicación edáfica de cinco dosis de zinc (0, 4, 8, 16 y 32 kg Zn/ha). Se empleó un diseño en parcelas divididas con cuatro bloques, donde las variedades fueron ubicadas en parcelas y las dosis, en subparcelas. Se evaluó la biomasa aérea, el rendimiento total y comercial, y la concentración de Zn en plantas y tubérculos (cáscara y pulpa). La aplicación de Zn no afectó significativamente la biomasa aérea, el rendimiento comercial y total de papa, pero las variedades blancas (Canchán, Perricholi y Yungay) superaron en rendimiento a la variedad amarilla (Peruanita). La concentración de Zn en planta y cáscara de tubérculo se incrementó conforme la dosis de Zn aplicada. La dosis de 32 kg ha⁻¹ de Zn superó al testigo en la concentración de Zn en planta en todas las variedades. Las concentraciones de Zn en cáscara obtenidas con la aplicación de dosis de Zn a partir de 16 kg ha⁻¹ superaron al testigo en todas las variedades. La concentración de Zn en pulpa fue máxima con la aplicación de 16 kg Zn ha⁻¹ en las variedades Canchán, Perricholi y Yungay, y con 8 kg Zn ha⁻¹ en la variedad Peruanita. La eficiencia aparente de recuperación de Zn disminuye a medida que aumentan las dosis aplicadas, en todas las variedades. Los resultados indican un limitado efecto de la aplicación edáfica de zinc sobre la biofortificación de tubérculos de papa en el valle del Mantaro.

Palabras claves: Biofortificación agronómica, zinc, *Solanum tuberosum* L.

ABSTRACT

Zinc is one of the essential nutrients for human health. Its deficiency affects approximately 30 % of world population and is caused by poor diet quality and low Zn intake. Potato (*Solanum tuberosum* L.) is an economically important crop and is a staple food in Peru, thus agronomic biofortification is considered a suitable strategy to increase the content of Zn in potato tubers, enhancing human health. A field experiment was set up during the crop season 2017-2018 in an acidic soil of the Mantaro Valley to evaluate the response of four potato varieties (Canchán, Perricholi, Peruanita and Yungay), to soil application of five doses of zinc (0, 4, 8, 16 and 32 kg Zn/ha). A split-plot design with four blocks, was used. Potato varieties were placed in plots and Zn doses in subplots. Shoot biomass, total and commercial tuber yield and the content of Zn in shoots and tubers (skin and flesh) were measured. Zn fertilization did not significantly affect shoot biomass, commercial and total potato yield, but the yield of the white varieties (Canchán, Perricholi and Yungay) outperformed the yellow variety (Peruanita). The Zn content in shoot and tuber skin increased according to the applied Zn dose. Zinc applied at a rate of 32 kg ha⁻¹ exceeded the control in the Zn concentration in shoot in all varieties. The Zn concentrations in the skin obtained with the application of Zn doses from 16 kg ha⁻¹ exceeded the control in all varieties. Zn concentration in flesh was maximum with the application of 16 kg Zn ha⁻¹ in the Canchán, Perricholi and Yungay varieties and with 8 kg Zn ha⁻¹ in the Peruanita variety. The apparent efficiency of Zn recovery decreases as the applied doses increase, in all varieties. The results obtained seem to indicate a very limited effect of Zn application on the biofortification of potato tubers in the Mantaro valley.

Keywords: Agronomic biofortification, zinc, *Solanum tuberosum* L.

I. INTRODUCCIÓN

La desnutrición genera elevados costos que afectan a las personas, familias y naciones enteras, y estos costos son acentuados por la pobreza, la falta de educación, y el limitado acceso a la atención médica (Global Panel 2016; Rodríguez *et al.* 2011). Debido a ello, la desnutrición es una amenaza persistente para la vida de millones de niños (Moyer *et al.* 2020), convirtiéndose en un problema para la salud pública. Las consecuencias nutricionales que influyen en el desarrollo adecuado del niño se manifiestan en toda la vida del mismo; a corto plazo, mediante la ocurrencia de enfermedades graves o la muerte del menor; y a largo plazo, mediante un menor desempeño mental y una disminución en la capacidad laboral, lo que ocasiona menores ingresos económicos para la familia (Bhutta *et al.* 2013; Black *et al.* 2008; Elzouki *et al.* 2012). La deficiencia de zinc (Zn) es común en los países en desarrollo, y se atribuye a su baja ingesta, combinada con su baja biodisponibilidad producto de la presencia de fitatos en los alimentos. El fitato es un inhibidor de la absorción de Zn y otros cationes, y se encuentra en los principales alimentos básicos, como el arroz, las legumbres y los cereales (Gibson *et al.* 2010, 2018). La deficiencia de Zn puede afectar el desarrollo cognitivo, deteriorar el crecimiento, ocasionar un retardo en la maduración sexual, y afectar el sistema inmunológico (Krebs *et al.* 2014; Prasad 2020; Roohani *et al.* 2013).

La agricultura es fuente y base para la seguridad alimentaria. Además, contar con una biodiversidad de fuentes alimenticias vegetales es importante para una buena alimentación y una adecuada sostenibilidad de los diversos sistemas agropecuarios (Low *et al.* 2007). En el Perú, uno de los cultivos más importantes es la papa. Actualmente, es considerada el quinto cultivo alimenticio más importante del mundo, después del cultivo de caña de azúcar, el maíz, el trigo y el arroz, con una producción de 370.44 millones de toneladas (FAO 2021). El cultivo de la papa juega un papel importante en la seguridad alimentaria de los países en desarrollo; además, es un cultivo que produce alimentos nutritivos, de forma rápida, en menor extensión de tierra y bajo climas duros, en comparación con cualquier otro cultivo importante (Lutaladio y Castaldi 2009; Wijesinha-Bettoni y Mouillé

2019). En las zonas urbanas, las principales fuentes de proteínas, hierro y zinc provienen de las leguminosas, la carne y el pescado; mientras que en las zonas rurales, los tubérculos y las legumbres son las principales fuentes de estos nutrientes (CENAN 2003). La papa es un alimento que cuenta con diferentes presentaciones gastronómicas, además de ser rico en carbohidratos. Recién cosechado, presenta un contenido de agua cercano al 80%, y entre el 60 a 80 % de la materia seca es almidón. La papa también es una buena fuente de proteínas, vitamina B y C, y de hierro (Lutaladio y Castaldi 2009; Robertson *et al.* 2018).

La biofortificación agronómica es una estrategia que consiste en la aplicación de fertilizantes para mejorar el contenido de micronutrientes, entre ellos el Zn, en los cultivos (Cakmak 2009). Esta estrategia se considera a menudo como una solución a corto plazo para aumentar la disponibilidad de micronutrientes y, principalmente, para complementar la biofortificación genética, la cual es realizada a través del mejoramiento genético y es considerada como un enfoque más sostenible (García-Bañuelos *et al.* 2014; Velu *et al.* 2014).

Por las consideraciones expuestas y teniendo en cuenta la necesidad de realizar investigaciones en estrategias para atenuar las deficiencias nutricionales de la población, se llevó a cabo el presente trabajo de investigación en biofortificación agronómica de Zn en cuatro variedades de papa en el Valle del Mantaro. Los objetivos del presente trabajo son:

Objetivo general:

- Evaluar la aplicación edáfica de Zn como estrategia para lograr la biofortificación de la papa cultivada en los Andes centrales del Perú.

Objetivos específicos:

- Evaluar el efecto de la aplicación edáfica de dosis crecientes de Zn (0, 4, 8, 16 y 32 ppm Zn) sobre el rendimiento de tubérculos en cuatro variedades comerciales de papa cultivadas en un suelo ácido altoandino.
- Determinar el efecto de la aplicación de las dosis de Zn anteriores sobre la concentración y extracción de zinc por la planta y tubérculo (cáscara y pulpa).

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. IMPORTANCIA DEL CULTIVO DE PAPA EN EL PAÍS

La papa (*Solanum tuberosum* L.) pertenece a la familia Solanaceae, y tiene su origen en la región andina de América del Sur. Existen cerca de 5000 variedades de papa en todo el mundo, y una gran proporción de dichas variedades se encuentran en los Andes, principalmente en Perú, Bolivia, Ecuador, Chile y Colombia (Hijmans y Spooner 2001). Los cultivos de raíces y tubérculos que comprenden, además de la papa, yuca (*Manihot esculenta*), camote (*Ipomoea batatas*), ñames (*Dioscorea* spp.) y taro (*Colocasia esculenta*), ocuparon el sexto lugar en superficie cosechada en el año 2019, con un total de 67 millones de hectáreas y un volumen de producción de 861 millones de toneladas. El cultivo de papa, que se cultiva fuera y dentro de los trópicos, produjo 370 millones de toneladas (FAO 2021).

La papa es originaria de los Andes y se remonta a 7000 años antes de las civilizaciones pre-incas e incas; civilizaciones en las cuales desempeñó un rol importante como sustento alimenticio (Espinoza 1997; Graves 2006). La papa es una buena fuente de proteínas, carbohidratos, hierro, magnesio, potasio y vitaminas B y C. En la actualidad, está claro que un buen estado nutricional depende de varios factores, entre ellos el cumplimiento de los requisitos óptimos de todos los nutrientes; a pesar del hecho de que la papa es rica en carbohidratos, vitaminas y minerales, debe complementarse con otros alimentos (Navarro *et al.* 2010).

2.2. HÁBITOS DE CONSUMO Y APORTE NUTRICIONAL DE LA PAPA

La papa es actualmente el quinto cultivo alimenticio más importante del mundo, después del azúcar, el maíz, el trigo y el arroz, con una producción de 370 millones de toneladas (FAO 2021). El tubérculo de papa contiene aproximadamente 80 % de agua y 20 % de materia seca; y alrededor del 60–80 % de la materia seca es almidón (Robertson *et al.* 2018), aunque otros autores mencionan que puede alcanzar el 95 % de la materia seca (King y Slavín 2013). El contenido de proteína de la papa cocida es menor en comparación

con los fideos, el arroz y el maíz; sin embargo, la calidad de la proteína de la papa, reflejada en su digestibilidad y su contenido de aminoácidos, es muy buena (King y Slavin 2013). La papa es una buena fuente de hierro, potasio, fósforo, magnesio, ácido ascórbico, ácido pantoténico, vitamina A, vitamina C y vitaminas B1, B3 y B6 (Beals 2019; Burlingame *et al.* 2009; Hale *et al.* 2008; Woolfe 1987).

El consumo per cápita de papa en el Perú, anualmente, ha tenido fluctuaciones en los últimos treinta años. En 1992, el consumo per cápita estaba en menos de 50 kg persona⁻¹, debido al incremento de la población y a la disminución de la producción como consecuencia del terrorismo. En 1996 se incrementó a 63 kg persona⁻¹; y en el 2010, a 76.2 kg persona⁻¹ (Proexpansión 2011). En el 2016 el consumo per cápita de papa en el país llegó a los 89 kg (El Comercio 2016), y en el año 2021 se espera que el consumo alcance los 92 kg persona⁻¹ (El Peruano 2020).

Tabla 1: Consumo per cápita, suministro energético, proteico y de grasa suministrado por el consumo de papa en el Perú y en el mundo en el 2018.

Elemento	Unidades	Mundial	Perú
Consumo de papa	kg/persona/año	33	90
Energía	kcal/persona/día	62	242
Proteínas	g/persona/día	1.5	5.1
Grasa	g/persona/día	0.1	0.5

Fuente: FAO (2021)

De acuerdo a los datos de FAOSTAT (FAO 2021), se muestran los consumos per cápita de papa, el aporte de calorías, proteínas y grasa, a nivel mundial y en el Perú, en el año 2018 (Tabla 1). En el año 2018, Perú ocupó el décimo puesto en consumo per cápita de papa a nivel mundial. En la Tabla 2 se muestran las variables antes mencionadas, desde el año 2011 hasta el año 2018, para Perú. En dicha tabla se observa un aumento paulatino en el consumo de papa per cápita. En el Perú, el consumo diario de 247 g de papa puede cubrir la energía requerida por una niña de un año en un 27 %, y en un 25 % para un niño de un año. En un adulto, el mismo consumo de papa puede llegar a cubrir un 12 % del requerimiento de energía diario para una mujer, y 9 % para un varón. Para el caso de la ingesta de proteínas diarias recomendadas, con esos 247 g de papa se puede cubrir el 9.3 % del requerimiento de un joven de 50 kg de peso corporal, y un 8.3 % de un adulto de 75

kg de peso corporal. Estos cálculos han sido estimados en base a los datos ofrecidos por Domínguez y Aguilar (2015), WHO (2007) y Reyes *et al.* (2017).

Tabla 2: Consumo per cápita, suministro energético, proteico y de grasa suministrado por el consumo de papa en el Perú.

Elemento	Unidades	Año							
		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Cantidad de suministro de alimentos	kg/persona/año	81.1	80.9	82.5	89.2	91.7	87.2	91.0	90.1
Suministro alimentario de energía	kcal/persona/día	219	218	222	241	247	235	245	242
Cantidad de suministro de proteínas	g/persona/día	4.6	4.6	4.7	5.1	5.2	5.0	5.2	5.1
Cantidad de suministro de grasa	g/persona/día	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Fuente: FAO (2021)

La Tabla 3 muestra los aportes de energía, proteínas y grasa de algunas variedades de papa que se consumen en el país (Reyes *et al.* 2017).

Tabla 3: Aporte de energía, proteínas y grasa de algunas variedades de papa (considerando 100 g de parte comestible).

Variedad	Energía (kcal)	Proteínas (g)	Grasa total (g)
Canchán	66	2.4	0.1
Negra andina	63	1.8	0.4
Amarilis sin cáscara	64	2.1	0.1
Tumbay sin cáscara	86	2	0.1
Única sin cáscara	77	2.3	0.2
Yungay sin cáscara	86	2.1	0.1
Peruanita con cáscara	78	2	0.3

Fuente: Reyes *et al.* (2017)

2.3. PRODUCCIÓN, SUPERFICIE COSECHADA Y RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE PAPA

2.3.1. Superficie cosechada nacional y de la región Junín

La papa ocupa un lugar importante en la economía agrícola del Perú. Durante el 2019, el cultivo de papa tuvo un nivel de participación del 10.7 % en el valor bruto de producción del sub-sector agrícola, superado sólo por el arroz con el 11.5 % (MINAGRI 2020). El cultivo de papa es el sustento de más de 710 mil familias, según el IV Censo Nacional Agropecuario (2012), las cuales están afincadas predominantemente en zonas andinas del país.

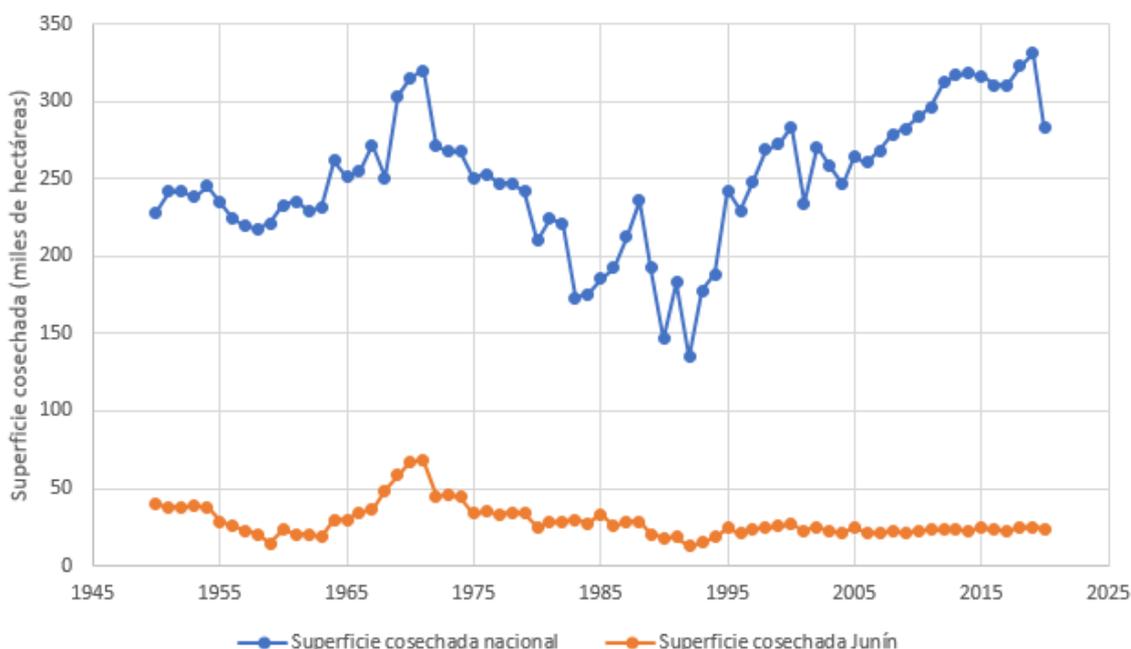


Figura 1. Superficie cosechada nacional y en Junín 1950-2020.

Fuente: DGIA (2017), DGSEP (2018,2019), SIEA (2021)

En el II Censo Nacional Agropecuario de 1972 y en el III Censo Nacional Agropecuario de 1994, el cultivo de papa ocupó el segundo lugar en superficie de siembra con respecto a los cultivos anuales, después del maíz, con 238 483 hectáreas (12.5 % del total nacional) y 349 261 hectáreas (16.3 % del total nacional), respectivamente (Egúsqiza 2000). En el IV Censo Nacional Agropecuario, la superficie sembrada con papa fue de 367 692 hectáreas (INEI 2012). Para las campañas agrícolas del 2014 al 2020, la superficie cosechada del cultivo de papa representó, en promedio, el 15 % de la superficie cosechada total nacional, ocupando el segundo lugar después del arroz (MINAGRI 2017; SIEA 2021).

En el año 2020, la superficie cosechada fue de 283 036 hectáreas, lo que significó una reducción en 11 % respecto al promedio obtenido entre las campañas de los años 2015-2019. Esta disminución puede ser una consecuencia de las condiciones de pandemia por el COVID-19, que se hicieron presentes a partir de fines de marzo del 2020 (Agencia Agraria de Noticias 2020). Para la campaña 2020-2021 se estimó una superficie sembrada de 282 940 hectáreas, lo que representa un 16.9 % del estimado de superficie sembrada total para dicha campaña agrícola (SIEA 2021).

La superficie cosechada de papa presenta variaciones que se han mantenido en un rango de 180 y 280 mil hectáreas desde los años 1950 hasta el año 2020. Sin embargo, entre el año 2016 y 2020, el área cosechada se ha mantenido en una media cercana a las 312 000 hectáreas. En el año 2020 se presentó una disminución de la superficie cosechada, respecto a la campaña anterior, de 14.5 % (Figura 1).

Tabla 4: Superficie cosechada de papa por regiones respecto a la superficie sembrada nacional, 2013-2020.

Años	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Superficie Nacional Sembrada	Miles de hectáreas							
	317.0	318.4	316.5	310.7	310.4	323.1	331.2	283.0
Región	Porcentaje respecto a la superficie nacional cosechada (%)							
Apurímac	6.2	6.6	6.2	7.1	7.2	7.9	7.1	6.9
Ayacucho	6.0	6.6	6.6	6.6	6.8	7.5	6.6	9.1
Cajamarca	9.4	9.3	8.9	8.4	8.0	8.7	8.2	7.7
Cuzco	10.5	10.0	9.8	9.7	9.8	9.4	9.5	10.5
Huancavelica	8.1	7.3	7.3	8.0	6.9	7.1	8.7	8.4
Huánuco	12.5	13.0	12.9	12.0	13.7	12.8	13.1	9.8
Junín	7.3	7.1	7.7	7.6	7.4	7.6	7.5	8.5
La Libertad	8.0	7.5	7.7	7.3	7.7	7.6	7.8	7.3
Puno	17.5	18.0	18.6	19.2	19.2	18.6	18.3	21.2

Fuente: DGIA (2017), DGSEP (2018,2019), SIEA (2021)

Puno, Huánuco, Cuzco, La Libertad, Cajamarca y Junín representan, entre los años 2013 y 2020, las regiones con mayor superficie cosechada de papa a nivel nacional (Tabla 4). Entre los años 1950 y 2020, en el departamento de Junín, la tendencia en el área cosechada del cultivo ha ido descendiendo, desde 67 000 hectáreas en el año 1971, hasta 23 984 hectáreas

en el 2020 (8.5 % de la superficie cosechada nacional). Entre los años 2016 y 2020, el promedio de superficie cosechada de papa en Junín fue cercano a las 24 000 hectáreas.

2.3.2. Producción nacional y de la región Junín

La producción nacional de papa, entre los años 1950 y 2020, ha tenido una alternancia alta y baja en los volúmenes de producción, obteniéndose 1 364 356 toneladas en 1950, llegando a 1 967 860 toneladas en 1971, para luego descender en el año 1990 a 1 003 082 toneladas. A partir del año 1990, la producción de papa fue aumentando progresivamente (Figura 2).

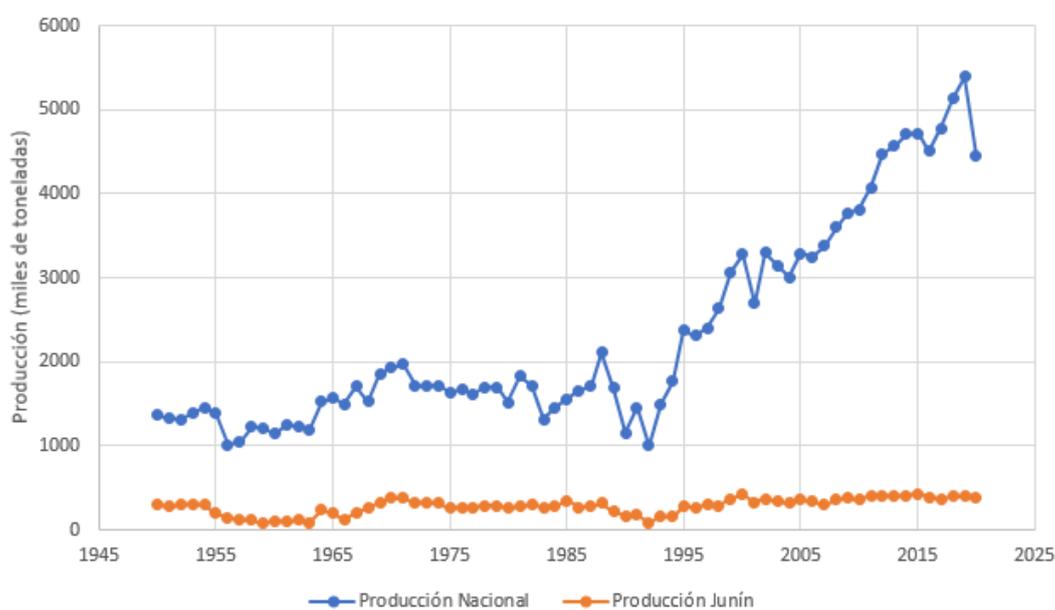


Figura 2. Producción de papa a nivel nacional y en la región Junín 1950-2020.

Fuente: DGIA (2017), DGSEP (2018,2019), SIEA (2021)

Desde 1950 hasta 2020, la producción nacional ha mostrado una tasa de crecimiento anual promedio de 3 %. En las dos últimas décadas (de 1997 al 2019), la producción de este tubérculo creció rápidamente, y en el año 2019 se registró una producción histórica de 5 398 185 toneladas. Dicho resultado fue obtenido debido a la expansión de la superficie cosechada, la cual creció a una tasa anual promedio de 2 % y, principalmente, de una mejora de los rendimientos por hectárea, que creció a una tasa anual promedio de 2 % en dicho periodo de tiempo. En el año 2020 se obtuvo una producción de 4 443 665 toneladas. Esta disminución en la producción de papa probablemente se deba a las condiciones de pandemia que presentó el país a partir de inicios del año 2020 (Agencia Agraria de Noticias 2020). Para el caso de Junín, existen fluctuaciones en sus volúmenes de producción, que

van desde 71 918 y 90 200 toneladas en los años 1959 y 1963, llegando a volúmenes de 383 743 y 431 981 toneladas en los años 2009 y 2015, respectivamente. Estas fluctuaciones en la producción son resultado de la influencia de los factores climáticos, el beneficio económico en la inversión hecha por el agricultor, una mejora en el manejo del cultivo y variedades de papa mejoradas.

En la Tabla 5 se observan las regiones con mayor producción de papa a nivel nacional. Dentro de estas regiones, Puno, Huánuco, La Libertad, Junín, Cuzco y Apurímac son las que presentan mayores volúmenes de producción.

Tabla 5: Producción de papa por regiones respecto a la producción nacional, 2013-2020.

Años	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Producción Nacional	Miles de toneladas							
	4569.6	4705.0	4715.9	4514.2	4776.3	5121.1	5389.2	4428.7
Región	Porcentaje respecto a la producción nacional (%)							
Apurímac	7.7	7.6	7.4	8.6	8.6	8.6	7.7	7.8
Ayacucho	6.3	7.0	6.9	6.7	6.5	8.3	6.8	9.8
Cajamarca	7.5	7.1	7.1	6.9	6.1	6.9	6.4	6.5
Cuzco	9.3	8.1	8.2	8.2	8.1	7.7	8.2	9.7
Huancavelica	5.9	5.0	5.1	5.7	4.9	4.7	6.1	6.6
Huánuco	13.5	14.0	13.3	11.1	14.0	12.6	13.3	9.0
Junín	8.8	8.7	9.2	8.6	7.7	7.7	7.3	8.6
La Libertad	8.9	9.4	9.2	9.4	9.8	9.7	10.1	9.8
Puno	14.1	14.2	15.3	15.3	15.6	15.6	15.6	18.6

Fuente: DGIA (2017), DGSEP (2018,2019), SIEA (2021)

2.3.3. Rendimiento de la producción de papa a nivel nacional y de la región Junín

Entre los años 1950 y 2020, la producción y el rendimiento han mostrado una tendencia ascendente; esto se atribuye a un mejor manejo del cultivo y al uso de variedades mejoradas (Figura 3). A nivel nacional, el rendimiento ha ido ascendiendo, desde 4.52 Mg ha⁻¹ en 1956, donde se obtuvo el rendimiento más bajo, hasta 16.3 Mg ha⁻¹ en el 2019.

En el año 2020, se obtuvo un rendimiento nacional de 15.7 Mg ha⁻¹, producto de la disminución de la superficie cosechada y la producción nacional de ese año. En la región Junín, el rendimiento más bajo se obtuvo en el año 1966, y correspondió a un rendimiento

de 3.3 Mg ha⁻¹. En el 2009 se obtuvo el rendimiento más alto, hasta ahora reportado, de la región Junín, el cual fue de 18.4 Mg ha⁻¹. En el año 2019 se obtuvo un rendimiento de 15.9 Mg ha⁻¹, un 2.5 % menos que el rendimiento nacional (16.3 Mg ha⁻¹) (Figura 3). Dicho rendimiento se mantuvo en el año 2020. Entre los años 2013-2020, el rendimiento en la producción de papa en la región Junín ha sido mayor que el rendimiento nacional. Junto a Apurímac, Arequipa, Ica, La Libertad, Lima (incluida Lima Metropolitana) y Tacna, Junín presenta los mejores rendimientos de los últimos 8 años (periodo 2013-2020), a nivel nacional (Tabla 6).

Tabla 6: Rendimiento de producción de papa por regiones y a nivel nacional, 2013-2020.

Años	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Rendimiento Nacional	Mg ha ⁻¹							
	14.4	14.8	14.9	14.5	15.4	15.9	16.3	15.7
Región	Mg ha ⁻¹							
Amazonas	14.5	14.4	15.0	15.2	15.1	18.3	19.1	18.2
Ancash	10.3	10.5	10.6	10.6	10.5	11.2	11.2	11.7
Apurímac	17.7	17.2	17.9	17.5	18.6	17.2	17.6	17.8
Arequipa	32.6	34.4	33.7	33.5	34.7	36.1	35.3	35.0
Ayacucho	14.9	15.6	15.6	14.8	14.6	17.7	16.8	17.0
Cajamarca	11.5	11.3	11.9	11.9	11.6	12.6	12.7	13.3
Callao	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cuzco	12.8	12.0	12.6	12.3	12.8	13.0	14.0	14.5
Huancavelica	10.4	10.2	10.4	10.4	10.9	10.6	11.5	12.4
Huánuco	15.6	15.9	15.3	13.5	15.7	15.6	16.6	14.4
Ica	35.3	33.1	33.1	32.4	32.5	35.1	37.2	35.0
Junín	17.5	18.0	17.7	16.4	16.0	16.1	15.9	15.9
La Libertad	16.3	18.4	18.0	18.7	19.5	20.2	21.0	20.9
Lambayeque	6.0	7.5	7.0	6.6	7.5	7.2	8.3	7.0
Lima	23.9	23.7	18.1	22.7	22.0	23.4	26.3	21.2
Lima Metropolitana	28.5	28.8	26.5	28.7	28.2	29.2	30.0	-
Loreto	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Madre de Dios	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Moquegua	13.5	14.8	14.4	12.4	12.7	13.0	12.1	11.9
Pasco	9.4	12.6	16.0	16.8	18.8	18.3	18.8	19.6
Piura	8.9	8.8	8.9	9.5	9.8	10.0	11.0	12.1
Puno	11.6	11.7	12.2	11.6	12.4	13.3	13.8	13.7
San Martín	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tacna	17.5	16.4	19.4	16.6	18.7	19.3	19.0	20.0
Tumbes	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ucayali	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: DGIA (2017), DGSEP (2018,2019), SIEA (2021)

Se puede apreciar que el incremento del rendimiento en Junín se ha dado en forma progresiva, y a pesar de que el área de cosecha de papa se ha reducido, la producción ha aumentado (Figura 3). Esto se debe a una mejora en el manejo del cultivo y variedades con alto rendimiento productivo. En las regiones de Arequipa, Ica, Lima (junto a Lima Metropolitana) y Tacna, los rendimientos son altos, a pesar de tener una baja superficie cosechada (Tabla 6). Esto es resultado de la disponibilidad de insumos y requerimientos, considerando que la mayoría de las zonas costeras sostienen su producción mediante inversiones altas en fertilizantes, plaguicidas y pesticidas y en canales de regadío, a diferencia de las regiones de la sierra, donde principalmente el cultivo se maneja bajo secano y con baja inversión en la instalación del cultivo.



Figura 3. Rendimiento de papa a nivel nacional y en la región Junín 1950-2020.

Fuente: DGIA (2017), DGSEP (2018,2019), SIEA (2021)

2.4. ESTADO ACTUAL DE LA DESNUTRICIÓN EN EL MUNDO Y EN EL PAÍS

La desnutrición, en todas sus formas, conlleva enormes costos directos e indirectos para individuos, familias y naciones enteras (Global Panel 2016). El impacto estimado en la economía mundial podría ser tan alto como \$ 3.5 billones por año, o \$ 500 por persona (FAO 2013). Tales costos enormes son el resultado del crecimiento económico perdido y la pérdida de inversiones en capital humano asociado con muertes infantiles prevenibles, de las cuales el 45 % puede atribuirse a una nutrición deficiente, así como a la mortalidad prematura de adultos vinculadas con enfermedades no transmisibles relacionadas con la

dieta (ENT) (Black *et al.* 2013). En 2017 se estimó que la cantidad de personas subnutridas aumentó a 821 millones, aproximadamente una de cada nueve personas en el mundo, a comparación del año 2016, donde hubo cerca de 804 millones de personas subnutridas (FAO *et al.* 2018). Bajo el contexto de COVID-19, se espera que esta situación se agudice. El Programa Mundial de Alimentos estimó que cerca de 130 millones de personas más podrían entrar en esta categoría para finales del año 2020 (WFO 2020a). La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) estimó una caída del PBI de al menos 7.7 % para el año 2020 (CEPAL 2020). Debido a ello, los países subdesarrollados se verán seriamente amenazados, no solo por los daños causados directamente por el COVID-19 en la salud, sino también por las consecuencias indirectas del mismo, como la falta de empleo, el cierre de escuelas, las restricciones comerciales y los cierres de países (Ahmed *et al.* 2020; GANESAN 2020; WFO 2020b). Estas condiciones afectan los sistemas alimentarios, al verse interrumpidos la producción, el transporte y la venta de alimentos nutritivos, frescos y asequibles, lo que obliga a millones de familias a depender de alternativas pobres en nutrientes (Fore *et al.* 2020). Es probable que se agrave una creciente desigualdad, empujando a millones de personas hacia una pandemia silenciosa de pobreza e inseguridad alimentaria, y afectando, sobretodo, a los niños (CEPAL 2020).

La desnutrición es una de las causas más comunes de mortalidad y morbilidad entre los niños menores de cinco años en los países en desarrollo, y cuyas consecuencias se manifiestan a lo largo de todo el ciclo vital de los niños. La desnutrición puede ocasionar, a corto plazo, la ocurrencia de enfermedades o muerte prematura en niños menores de cinco años; y a largo plazo puede perjudicar el desempeño escolar y la actividad laboral, generando así costos y pérdidas económicas a la familia y la sociedad (Bhutta *et al.* 2013; Black *et al.* 2008; Elzouki *et al.* 2012). Una mala nutrición, en los primeros años de vida puede ocasionar un deterioro en la salud del niño, en su habilidad para poder aprender, comunicarse, para desarrollar el pensamiento analítico, la socialización y la habilidad de adaptarse a nuevos ambientes (Gajate e Inurritegui 2002).

En el Perú, la desnutrición es más severa en las zonas rurales que en las zonas urbanas. En un estudio llevado a cabo por Tarqui *et al.* (2017) se observó que la mayoría de los niños peruanos entre 6 y 35 meses que tuvieron ingesta inadecuada de energía y nutrientes residen en el área rural y en condición de pobreza. Asimismo, se observó que el porcentaje de niños que cubren los requerimientos de Zn fue mayor en los niños que habitan en la zona urbana

y que no se encuentran bajo condición de pobreza. De igual forma, Beltrán y Seinfeld (2014) reportaron que 45 de cada 100 niños en la zona rural sufre de desnutrición crónica, mientras que solo 14 de cada 100 la padece en la zona urbana.

En muchas partes del mundo, la deficiencia de micronutrientes es un problema más extendido que la mala calidad de la dieta y la baja ingesta energética (Stewart *et al.* 2010), y alrededor del 20 % de las muertes en niños menores de cinco años se puede atribuir a la vitamina A, Zn, deficiencia de Fe y/o I (Prentice *et al.* 2008).

2.5. LA BIOFORTIFICACIÓN COMO HERRAMIENTA PARA COMBATIR LA DESNUTRICIÓN

La agricultura es fuente y base para la seguridad alimentaria. Además, contar con sistemas productivos que promuevan la biodiversidad de fuentes alimenticias vegetales permite mejorar el estado nutricional y contar con una diversidad de dietas (Jones 2017). La biodiversidad agrícola se asocia positivamente a una diversidad dietética, y desempeña un papel importante en la productividad y los medios de vida de todos los agricultores, independientemente de la dotación de recursos o la ubicación geográfica (Hunter y Fanzo 2013; Jones *et al.* 2018). El Perú es un país que tiene el mayor número de variedades de papa, ají, maíz, granos, tubérculos y raíces andinas. Asimismo, el 70 % del consumo alimentario peruano proviene de la agricultura nacional rural, en su mayor parte cultivada por pequeños productores (Ordinola *et al.* 2014). Sin embargo, a pesar que la diversidad agrícola permite una mejora en la dieta y un aumento en la ingesta de micronutrientes (Pandey *et al.* 2016; Pradhan *et al.* 2021), dicha estrategia debe ser complementada con otras acciones.

Existe una diversidad de estrategias para poder mejorar el estado nutricional de la población y disminuir la desnutrición. La suplementación, la fortificación de alimentos y la biofortificación son estrategias que permiten aminorar las deficiencias de micronutrientes en la población (Khush *et al.* 2012; Miller y Welch 2013; Olson *et al.* 2021; Yadav *et al.* 2020). La suplementación de alimentos y la fortificación de alimentos requieren infraestructura, financiamiento ininterrumpido, entre otros requerimientos, lo que limita su alcance; debido a ello, dichos programas tienden a llegar solo a la población urbana, que es de fácil acceso, especialmente en los países en desarrollo (Das y Green 2013). Por otro lado, la biofortificación es una estrategia que se centra en mejorar el

contenido de micronutrientes de la parte comestible de los cultivos básicos, así como su biodisponibilidad (Khush *et al.* 2012), utilizando técnicas modernas de biotecnología, fitomejoramiento convencional y prácticas agronómicas (Das y Green 2013; Garg *et al.* 2018; Nakandalage *et al.* 2016).

Se han propuesto varias estrategias para prevenir la deficiencia de Zn en poblaciones en riesgo. El uso de suplementos de Zn es una estrategia, pero a menudo falta la infraestructura necesaria para una implementación exitosa y el cumplimiento puede ser deficiente. También se usa la fortificación de alimentos que la población consume de forma cotidiana, pero esta estrategia requiere de instalaciones de procesamiento y que el sabor de los alimentos fortificados no se vea afectado adversamente. La diversificación de los alimentos y los cambios en los métodos de preparación de los alimentos también pueden utilizarse para mejorar la ingesta y la biodisponibilidad de los micronutrientes, pero pueden causar problemas con la aceptabilidad. Otro enfoque es utilizar la biofortificación para incrementar el contenido de micronutrientes en los alimentos básicos, y así mejorar la ingesta total de micronutrientes (Hotz y McClafferty 2007; Mayer *et al.* 2008; Welch 2002).

La biofortificación es una estrategia utilizada para poder incrementar los contenidos de micronutrientes en los cultivos, entre ellos el Zn. Esto implica tanto la obtención de nuevas variedades de cultivos con el potencial genético de acumular una alta densidad de Zn, a través del mejoramiento genético convencional, y el uso de fertilizantes de Zn para aumentar la densidad del mismo, a través de prácticas agronómicas (Khush *et al.* 2012; Wakeel *et al.* 2018). Las intervenciones agronómicas son estrategias a corto plazo que se centran en el uso de fertilizantes minerales foliares y edáficos, pero se requieren aplicaciones regulares (Carvalho y Vasconcelos 2013; Joy *et al.* 2015), y depende en gran medida de la biodisponibilidad de los micronutrientes a lo largo de todo el camino, desde el suelo hasta las plantas, los alimentos y el cuerpo humano (De Valença *et al.* 2017). En los casos en que los enfoques agronómicos y de mejoramiento convencional no pueden lograr una mejora significativa en la concentración de minerales, las técnicas transgénicas ofrecen una alternativa útil (Zhao y Shewry 2011), siempre y cuando exista una variación genética limitada o nula en el contenido de nutrientes entre las variedades de plantas (Zhu *et al.* 2007).

La biofortificación se centra principalmente en cultivos básicos ricos en almidón (arroz, trigo, maíz, camote y legumbres), debido a que este tipo de cultivos dominan, en gran proporción, las dietas alimentarias en el mundo (Saltzman *et al.* 2013). Algunos cultivos biofortificados logran mejores resultados que otros. Sin embargo, los cultivos biofortificados pueden ayudar a aliviar la deficiencia de micronutrientes en poblaciones en riesgo de manera sostenible (Díaz-Gómez *et al.* 2017; Saltzman *et al.* 2013).

La pobreza puede contribuir a empeorar la desnutrición, al comprometer la calidad de la ingesta de alimentos y fomentar la deficiencia de vitaminas y minerales esenciales, debido que, al presentarse limitaciones financieras, se conduce al consumo de alimentos básicos baratos y de alto contenido energético, principalmente carbohidratos y grasas, en lugar de alimentos nutritivamente densos (Siddiqui *et al.* 2020). La biofortificación es una estrategia que puede ser utilizada para abordar la desnutrición mineral en personas con acceso limitado a alimentos enriquecidos y dietas variadas (Garg *et al.* 2018; Yadav *et al.* 2020).

2.6. EL ZINC EN LA ALIMENTACIÓN HUMANA

La falta crónica de micronutrientes puede causar problemas graves de salud, a menudo invisibles, especialmente entre las mujeres y los niños pequeños, y a partir de dicha condición se obtiene el nombre de "hambre oculta" (Black *et al.* 2013). El término "hambre oculta" hace referencia a la deficiencia de micronutrientes, y esta condición ocasiona un retardo en el crecimiento y el desarrollo en los humanos. La deficiencia de micronutrientes en el suelo limita la productividad de los cultivos y la calidad nutricional de los alimentos, que en conjunto afectan la nutrición y la salud humana (Sanchez y Swaminathan 2005).

Un adulto humano contiene entre 2 a 3 g de Zn, de los cuales aproximadamente el 0.1 % debe ser repuesto diariamente (Maret y Sandstead 2006). Considerando que la eficiencia de absorción de Zn por el tracto digestivo es aproximadamente 0.55 (Krebs 2000), la ingesta diaria de Zn recomendada varía entre 1 a 3 mg para los niños, y entre 3 a 5 mg para los adultos, siendo los valores más altos en el caso de madres gestantes y en lactancia (Roohani *et al.* 2013). El Zn está presente en todos los organismos biológicos donde interviene en actividades catalíticas, estructurales y reguladoras. Se requiere para la actividad de más de 300 enzimas involucradas en la mayoría de las vías metabólicas (Gibson 2012). Muchas células secretan Zn como una molécula de señalización, incluidas

las células del sistema inmune y nervioso (Cakmak 2008; Sánchez *et al.* 2014); asimismo, el Zn actúa como un componente integral de las proteínas con dedos de Zn que regulan la transcripción del ADN. Como resultado, el Zn es necesario para una amplia gama de funciones bioquímicas, inmunológicas y clínicas.

Una deficiencia en Zn puede ocasionar un deterioro del crecimiento, retraso en la maduración sexual, defectos en el sistema inmunológico, trastornos neurosensitivos, deterioro cognitivo, infecciones respiratorias y diarrea (Gibson 2012; La Frano *et al.* 2014; Prasad 2008). El riesgo de deficiencia de Zn es un problema de salud pública mundial, con un 17.3 % de la población en riesgo de ingesta inadecuada de Zn (La Frano *et al.* 2014) y se estima que hasta dos mil millones de personas pueden tener un retraso en el crecimiento, presentar una alteración en el sistema inmunológico, y complicaciones negativas en el embarazo en las mujeres debido a la deficiencia de Zn (Brown *et al.* 2004; Lönnerdal 2000). La deficiencia de Zn también es un problema bien documentado en los cultivos alimentarios, la cual causa una disminución en el rendimiento y la calidad nutricional de los cultivos. Por lo tanto, las regiones con suelos deficientes de Zn en todo el mundo se caracterizan por una deficiencia generalizada de Zn en humanos (Cakmak 2008; Sánchez *et al.* 2014). La deficiencia de Zn en humanos tiene su origen en el estado del Zn de los suelos agrícolas y las consecuentes cantidades bajas de Zn en los cultivos alimentarios estables. La corrección de dicho problema, por lo tanto, implica el uso de herramientas agrícolas (Cakmak *et al.* 2017).

2.7. EL ZINC EN EL SUELO Y EN LA PLANTA

El Zn que está disponible para las plantas se encuentra presente en la solución del suelo, y su disponibilidad depende de los procesos de sorción-desorción desde y hacia la solución del suelo (Sharma *et al.* 2012). En el suelo existen diferentes reservas de Zn. Las formas disponibles, las cuales se encuentran en solución y adsorbidas débilmente en las superficies de partículas de suelo orgánicas o inorgánicas; y las formas no disponibles, que son formas asociadas a óxidos de hierro, manganeso y aluminio; formas enlazadas a carbonatos, enlazadas fuertemente a la materia orgánica insoluble y la forma residual (Impa y Johnson-Beebout 2012; Sharma *et al.* 2012; Xiang *et al.* 1995). La forma residual de Zn, seguida de la fracción asociada a óxidos de hierro y aluminio, tienden a ser las formas más abundantes de Zn en los suelos (Alvarez *et al.* 2001; Behera *et al.* 2008; Han *et al.* 2011; Iyengar *et al.* 1981; Joshi *et al.* 2014; Kamali *et al.* 2011; Leite *et al.* 2020; Nascimento *et al.* 2002; Xiang

et al. 1995; Yang *et al.* 2013). La fracción residual de Zn agrupa a formas no disponibles para la planta, y corresponden a aquellas fracciones asociadas a minerales arcillosos (Alvarez *et al.* 2001; Iyengar *et al.* 1981).

La disponibilidad del Zn en el suelo depende de las propiedades fisicoquímicas del suelo, de la actividad de las raíces de las plantas y de otros factores no edáficos (Gupta *et al.* 2016). La fracción arcilla tiende a adsorber una mayor cantidad de Zn que las fracciones arena y limo. Por el contrario, el Zn acumulado desorbido de las fracciones de arena y limo tiende a ser más alto que el de la fracción de arcilla (Ghiri *et al.* 2012). El pH y la presencia de coloides orgánicos e inorgánicos gobiernan los procesos de adsorción de Zn y otros elementos en el suelo (McBride *et al.* 1997). El pH es una de las variables que influye en gran medida en la adsorción de Zn en los suelos. Al aumentar los valores del pH del suelo se produce una mayor capacidad de adsorción de Zn por las superficies sólidas del suelo (Alloway 2009; McBride *et al.* 1997; Rutkowska *et al.* 2014; Stahl y James 1991). Esto ocasiona una remoción del Zn en solución y su conversión a fracciones no intercambiables. Asimismo, la desorción de Zn nativo y añadido puede disminuir continuamente con el aumento del pH (Singh *et al.* 2008).

El movimiento del Zn en el suelo puede ser por flujo de masas, por difusión o por interceptación de raíces. Cuando la concentración de Zn en la solución cercana a la raíz es alta, el flujo de masas es el mecanismo dominante que lleva el Zn hacia la raíz; sin embargo, cuando la concentración de Zn es baja, la difusión juega un rol importante en el transporte de Zn y otros nutrientes (Broadley *et al.* 2007; Oliveira *et al.* 2010; Sadeghzadeh 2013).

La absorción de Zn por la plantas es en la forma de Zn^{2+} , y en algunas especies de plantas, el Zn es absorbido como un complejo Zn-fitosideróforo (Broadley *et al.* 2007; Clemens 2010; White y Broadley 2009). Se han caracterizado varias proteínas de transporte que participan en la absorción de Zn, entre las cuales se encuentran la familia de proteínas similares a ZRT-IRT (ZIP), la familia de CDF (facilitadores de difusión de cationes), y la familia de HMA (ATPasa de metales pesados) (Grotz y Guerinot 2006; Guerinot 2000; Tiong *et al.* 2014). En el citosol, el Zn puede formar complejos con proteínas (incluidas muchas que modulan las actividades enzimáticas o la transcripción de genes), glutatión, fitoquelatinas y nicotianamina (NA); asimismo, las concentraciones de Zn^{2+} en el

citoplasma son extremadamente bajas (Broadley *et al.* 2007; Clemens 2010; Roosens *et al.* 2008).

El transporte de Zn^{2+} puede realizarse de manera simplástica o apoplástica. El Zn^{2+} es transportado a través de los citoplasmas de las células adyacentes en los tejidos de la raíz, los cuales están conectados a través de los plasmodesmos, de manera que se forma un continuo simplástico sin barreras de membrana. También el Zn^{2+} puede ser transportado por los espacios intercelulares (vía apoplástica) (Gupta *et al.* 2016). Sin embargo, esta última vía de transporte está limitada por la formación de la banda de Casparian, la cual presenta suberina y lignina que reduce el flujo de agua y solutos hacia los tejidos vasculares (Naseer *et al.* 2012; Song *et al.* 2019). Por ello, el Zn solo se puede administrar extracelularmente por el apoplasto en regiones donde la banda de Casparian no está completamente formada (Claus *et al.* 2013; Sadeghzadeh 2013; White *et al.* 2002). Tanto el flujo simplástico como el apoplástico contribuyen a los flujos netos de Zn en el brote.

Para ingresar al xilema, el tejido vascular muerto que conduce al brote, el Zn debe exportarse desde el simplasto, que requiere transportadores activos; y una vez en el xilema, donde el pH es ligeramente ácido (alrededor de pH 5.5), el Zn puede transportarse como un catión libre (Olsen y Palmgren 2014). Dentro del xilema, el Zn puede transportarse como Zn^{2+} o formar complejos con ácidos orgánicos, histidina o nicotianamina (Clemens 2010; White y Broadley 2011).

El Zn se dirige hacia las hojas, en donde es absorbido desde el xilema hacia las células vivas del parénquima del xilema del simplasto foliar. Luego, el Zn se carga en el floema, a partir del cual se dirige hacia los órganos de reserva y semillas. Los transportadores de la familia ZIP son los que permiten la afluencia de Zn^{2+} a las células de las hojas y al floema (White y Broadley 2009). Dentro del floema, el Zn experimenta un movimiento impulsado por el flujo de masa desde la fuente (principalmente hojas fotosintéticas) hacia los tejidos de reserva. En el floema, es probable que el Zn se mueva como un complejo Zn-NA, o posiblemente se una a proteínas (Clemens 2010; Clemens *et al.* 2013). La movilidad del Zn en el floema determinará la acumulación de Zn en los tejidos alimentados por el floema, como frutos, semillas y tubérculos. Aunque generalmente se considera que el Zn tiene una baja movilidad en el floema (White 2012).

El Zn es importante en las plantas, ya que es un componente de las enzimas que participan en diversos procesos metabólicos. El Zn participa en la activación de enzimas, como ARN polimerasas, superóxido dismutasa, alcohol deshidrogenasa, anhidrasa carbónica; en la síntesis de proteínas y en el metabolismo de carbohidratos, lípidos y ácidos nucleicos (Brown *et al.* 1993; Escudero-Almanza *et al.* 2012; Mengel *et al.* 2001; Palmer y Guerinot 2009). La síntesis y el mantenimiento de ADN o ARN dependen del Zn, ya que la mayoría de las enzimas de Zn están involucradas en la transcripción y mantenimiento del ADN y del procesamiento y la traducción del ARN (Hänsch y Mendel 2009; Krämer y Clemens 2005). Asimismo, el Zn mantiene la integridad estructural de la membrana celular (Hänsch y Mendel 2009; Havlin *et al.* 2016). El Zn es esencial para la síntesis de triptófano, compuesto necesario para la producción de ácido indolacético, y participa en la síntesis de clorofila (Havlin *et al.* 2016). Además, el Zn juega un papel importante en la tolerancia de sequía en las plantas, aliviando el estrés en las mismas (Umair *et al.* 2020). Los efectos de la deficiencia de Zn no se han atribuido directamente al mal funcionamiento de las enzimas, sino a la disminución de la actividad de las enzimas en ciertos tejidos (Brown *et al.* 1993). Esto conduce a una reducción de la fotosíntesis, disminución de la formación de almidón, disminución del nivel de auxinas, acumulación de aminoácidos con disminución de la síntesis de proteínas, aumento de la permeabilidad de las biomembranas, aumento del contenido de P inorgánico y depresión de la fertilidad masculina (Brown *et al.* 1993).

Para el caso del cultivo de papa, se ha observado que en el tubérculo existe una mayor concentración de los minerales en la zona superficial del mismo, es decir, en la zona cercana al peridermo, en comparación con la médula del tubérculo (Subramanian *et al.* 2011). Esto quizá debido a la presencia del anillo vascular, el cual se encuentra cercano a la corteza y al peridermo (Egúsqiza 2014; Oey *et al.* 2017).

La absorción directa de minerales en el tubérculo maduro a través del peridermo es limitada debido a la naturaleza suberizada del mismo. Sin embargo, la absorción directa puede ser significativa si es que el tubérculo es expuesto a una mayor concentración de Zn (u otro elemento) o si aún no ha terminado de desarrollarse por completo el peridermo (Subramanian *et al.* 2011; Vergara Carmona *et al.* 2019).

2.8. BIOFORTIFICACIÓN AGRONÓMICA

La estrategia de biofortificación agronómica incluye la aplicación de fertilizantes con Zn y el desarrollo de genotipos que absorban más Zn del suelo y lo acumulen en las partes comestibles (Hotz 2009). La estrategia de biofortificación más simple es la aplicación de fertilizantes al suelo para mejorar el contenido de zinc en cultivos básicos (por ejemplo, trigo, maíz, sorgo, frijoles) cuando se cultivan en suelos deficientes de Zn, como se ha practicado en Turquía e India (Cakmak 2009). La respuesta a la aplicación de fertilizante varía según el cultivo, los genotipos de los mismos cultivos y las condiciones ambientales, por lo que es difícil extrapolar a todas las situaciones (Gibson 2012).

La biofortificación agronómica se considera a menudo como una solución a corto plazo para aumentar la disponibilidad de micronutrientes y principalmente para complementar la biofortificación genética, que se considera un enfoque más sostenible (Sánchez *et al.* 2014; Velu *et al.* 2014). Asimismo, existe evidencia convincente de que la aplicación de fertilizantes de Zn es efectiva para mejorar el contenido de Zn en la parte comestible de los cultivos (Sánchez *et al.* 2014; White y Broadley 2011).

Los elementos minerales en el suelo pueden estar presentes como iones libres, como iones adsorbidos en la superficie de las partículas del suelo, como compuestos disueltos o precipitados, como parte de estructuras reticulares o contenidos dentro de la biota del suelo (White y Broadley 2009). Una limitación común para la biofortificación es la disponibilidad generalmente baja de los micronutrientes minerales en el suelo, debido a la composición del suelo, la movilidad mineral en el suelo y en la planta, y su sitio de acumulación (Hirschi 2009; Zhu *et al.* 2007). Por lo tanto, los esfuerzos agronómicos se han dirigido hacia la aplicación de fertilizantes minerales y la mejora de la solubilización y la movilización de elementos minerales en el suelo. En general, los elementos minerales con una buena movilidad en el suelo y en la planta son buenos candidatos para una biofortificación agronómica exitosa (White y Broadley 2009). Este es el caso del Zn, donde el uso de fertilizantes inorgánicos ha sido particularmente exitoso (White y Broadley 2005). La biofortificación agronómica requiere de aplicaciones regulares de los fertilizantes. Como resultado de ello, esta estrategia es considerada costosa, difícil en términos logísticos (productos pesados y voluminosos) y potencialmente negativo para el medio ambiente, debido a las aplicaciones elevadas de fertilizantes (Hirschi 2009; White y Broadley 2009).

Además, la disponibilidad de ciertos elementos minerales puede verse limitada debido al riesgo de agotamiento de las reservas (White y Broadley 2009). Teniendo en cuenta todas las limitaciones antes mencionadas, inherentes a la biofortificación agronómica mediante la aplicación de fertilizantes, es importante explorar estrategias más rentables y de largo plazo para mejorar la densidad de micronutrientes en las porciones de plantas comestibles. No obstante, se ha recomendado que esta estrategia se combine con otros enfoques de biofortificación, particularmente cuando la fitodisponibilidad de los minerales puede restringir su concentración en las porciones de plantas comestibles (Graham *et al.* 2007; White y Broadley 2009).

2.9. BIOFORTIFICACIÓN CON ZINC EN PAPA

Diversas investigaciones (Bonierbale *et al.* 2009; Burgos *et al.* 2007) sugieren desarrollar valor agregado en la papa a través del mejoramiento de variedades o la biofortificación, como una alternativa para mejorar el estado nutricional en las comunidades andinas, donde las personas no pueden pagar o acceder a alimentos enriquecidos o suplementos vitamínicos (Bouis y Welch 2010). Debido a la importancia del Zn en el metabolismo de la planta, la utilización de fertilizantes que contienen este elemento permite aumentar el rendimiento cualitativo y cuantitativo de los tubérculos de papa (Banerjee *et al.* 2016; Gabriel *et al.* 2015; Hadi *et al.* 2014; Khan *et al.* 2019; López *et al.* 2014; Mousavi *et al.* 2007; Rahman *et al.* 2018). Frente a la escasez de Zn en algunos suelos, el rendimiento y la calidad de la papa disminuirán (Alloway 2008).

La papa, después del arroz, el trigo y el maíz, es el alimento más común que se consume en el mundo (FAO 2021). Debido a la importancia económica y nutricional que tiene la papa en el país, la biofortificación agronómica de dicho cultivo, a través de la acumulación razonable de micronutrientes como el Zn, puede ser considerada como un buen método para mejorar la calidad nutricional de los tubérculos de papa, desempeñando así un papel importante en la dieta humana (Hadi *et al.* 2015).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN DEL CAMPO EXPERIMENTAL

El ensayo se llevó a cabo en una parcela agrícola del anexo de Lacta, en el distrito de Quilcas, provincia de Huancayo, región Junín. La parcela estuvo ubicada en una ladera de la margen izquierda del Valle del Mantaro, con coordenadas de 11°55'16" LS y 75°14'32" LO, a una altitud de 3590 msnm.

3.2. MATERIALES

a) Material vegetal

Se empleó semilla vegetativa (tubérculos semilla) de las variedades Canchán, Perricholi, Peruanita y Yungay. Egúsquiza (2014) describe algunas características de dichas variedades:

Canchán

- Se adapta a costa y sierra.
- Planta de porte mediano, flores rojo violáceas, escasas y muy poca fructificación.
- Tubérculos redondeados, piel roja clara, ojos superficiales a semiprofundos, pulpa amarillenta a crema, brotes rojizos.
- Periodo vegetativo intermedio (4-5 meses).
- Tolerante a “rancha”; susceptible en zonas de alta presión de la enfermedad.
- Buena calidad comercial.

Perricholi

- Se siembra en costa y sierra.
- Planta de abundante floración pero escasa fructificación, flores moradas con acúmenes blancos.
- Tubérculos redondeados, piel con fondo cremoso y pigmentos morados de distribución irregular pero más concentrada en los ojos apicales.

- Periodo vegetativo intermedio (5 meses).
- Resistente a “rancha”.
- Excelente capacidad de producción pero bajo contenido de materia seca en los tubérculos.
- Los tubérculos tienen fuerte tendencia a ser muy grandes, por lo que son susceptibles a rajaduras, deformaciones y a presentar “corazón vacío”.

Peruanita

- Se encuentra sembrada sobre los 3 300 m.s.n.m., mayormente en los departamentos de Huánuco, Pasco, Junín, Huancavelica y Apurímac.
- Planta de porte mediano a alto, tallos numerosos.
- Floración temprana, abundante y muy escasa o nula fructificación, flores rojo intenso.
- Tubérculos redondeados, ojos semiprofundos a profundos; piel bicolor, áreas de color rojizo con borde definido y áreas amarillentas alrededor de los ojos; pulpa amarillenta, brotes rojizos con áreas cremosas en los nudos.
- Buen potencial de rendimiento, tubérculos numerosos y de tamaño mediano a chico.
- Muy buena calidad culinaria, periodo vegetativo intermedio.
- Requiere suelos de altura y bien mullidos.
- Tolera a la “rancha”, pero es muy susceptible a los golpes (daños mecánicos).
- Brota después de 2 o 3 semanas de ser cosechada.

Yungay

- Se adapta en toda la sierra central, hasta los 3700 msnm.
- Las plantas son erectas, con tallo verde claro; pigmentaciones rojizas en los nudos; hojas color verde oscuro.
- Las flores son de color rojizo claro, acúmenes blancos y estrella verde claro.
- Tubérculos ovalados y aplanados con ojos superficiales; piel de color amarillento con ojos rojos; carne amarillenta.
- Los brotes son de color morado intenso.
- Tiene un periodo vegetativo tardío, de 150 a 180 días.

b) Fertilizantes y enmiendas

- Nitrato de amonio
- Fosfato diamónico
- Cloruro de potasio
- Sulpomag
- Guano de ganado vacuno
- Sulfato de zinc heptahidratado

3.3. TRATAMIENTOS

Los tratamientos aplicados son resultado de la combinación de cuatro variedades de papa y cinco dosis de Zn (Tabla 7 y 8).

Tabla 7: Factores y niveles de factor del diseño experimental.

Factor	Niveles de factor
Variedades de papa	Canchán, Perricholi, Peruanita, Yungay
Dosis de Zn (kg Zn ha ⁻¹)	0, 4, 8, 16, 32

Tabla 8: Tratamientos del diseño experimental.

Tratamientos	Variedades de papa	Dosis de Zn (kg Zn ha ⁻¹)
T1		0
T2		4
T3	Canchán	8
T4		16
T5		32
T6		0
T7		4
T8	Perricholi	8
T9		16
T10		32
T11		0
T12		4
T13	Peruanita	8
T14		16
T15		32
T16		0
T17		4
T18	Yungay	8
T19		16
T20		32

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.4.1. Diseño experimental

Se empleó un diseño de parcelas divididas (split-plot) de dos factores con bloques completos al azar; a nivel de parcela se colocarán las variedades de papa, y a nivel de subparcela, las dosis de Zn. Se emplearon cuatro bloques.

Modelo aditivo lineal

$$Y_{ijk} = \mu + \gamma_k + \tau_i + (\gamma\tau)_{ki} + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Para:

$$i = 1, 2, 3, 4$$

$$j = 1, 2, 3, 4, 5$$

$$k = 1, 2, 3, 4$$

Donde:

$Y_{ijk(l)}$ = Variable respuesta en el k-ésimo bloque, al usar la i-ésima variedad de papa y la j-ésima dosis de Zn.

μ = Es el efecto de la media general.

γ_k = Es el efecto del k-ésimo bloque.

τ_i = Es el efecto de la i-ésima variedad de papa a nivel de parcela.

$(\gamma\tau)_{ki}$ = Error de la parcela [$E_{(a)}$]

β_j = Efecto de la j-ésima dosis de Zn a nivel de subparcela.

$(\tau\beta)_{ij}$ = Efecto de la interacción de la i-ésima variedad de papa con la j-ésima dosis de Zn.

ε_{ijk} = Error de la subparcela [$E_{(b)}$]

3.4.2. Tratamiento estadístico de datos

Los resultados obtenidos de las variables evaluadas fueron sometidos a un análisis de varianza (ANVA). Previamente se evaluó el cumplimiento de los supuestos de homogeneidad de varianza y normalidad de errores. Los promedios fueron sometidos a la prueba de comparación de medias HSD Tukey, con un nivel de significación de 0.05. Para el análisis estadístico se empleó el paquete *Agricolae* del ambiente para cómputo estadístico R versión 4.0.2 (R Core Team 2020).

3.5. DISTRIBUCIÓN DE LAS UNIDADES EXPERIMENTALES

Las unidades experimentales fueron parcelas de 16 m². Cada parcela constó de 4 surcos, de 1 m de ancho y 4 m de largo, con un distanciamiento entre plantas de 0.4 m, con 40 plantas por unidad experimental, y un espacio de 0.4 m entre unidades experimentales. La dimensión de los bloques fue de 345.6 m² y el área total fue de 1280 m². El área total neta fue de 1401.6 m².

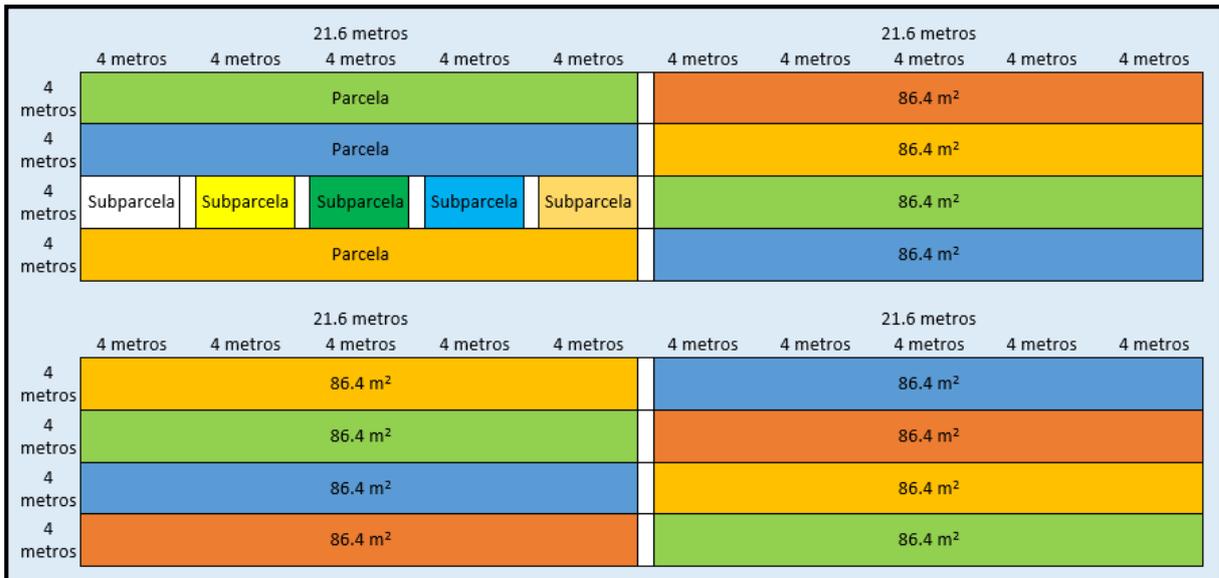


Figura 4. División del campo experimental en parcelas, subparcelas y sus dimensiones.

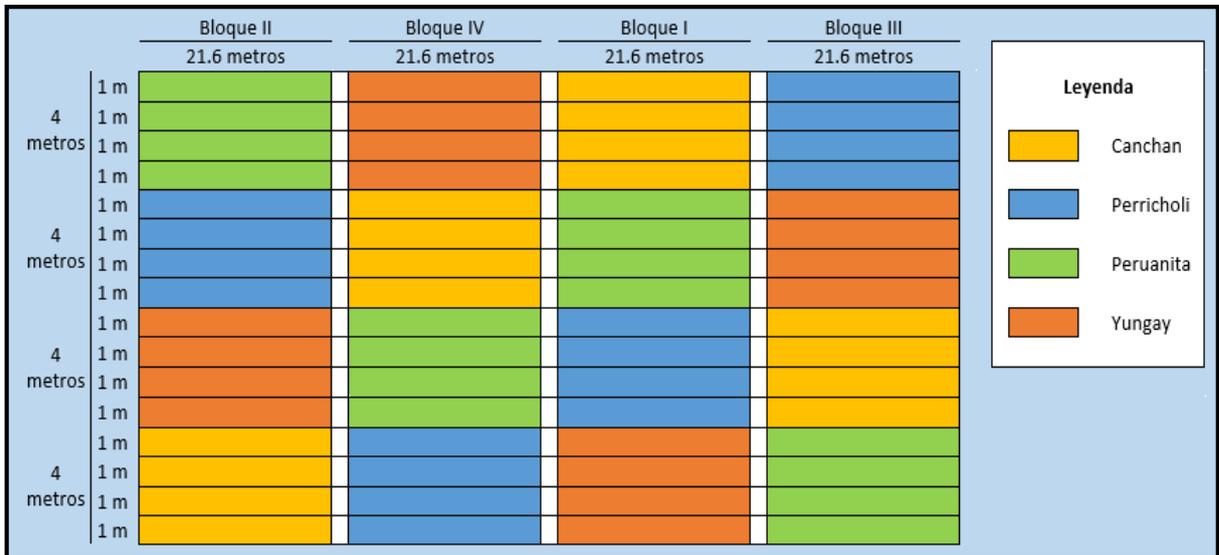


Figura 5. División del campo experimental en bloques.

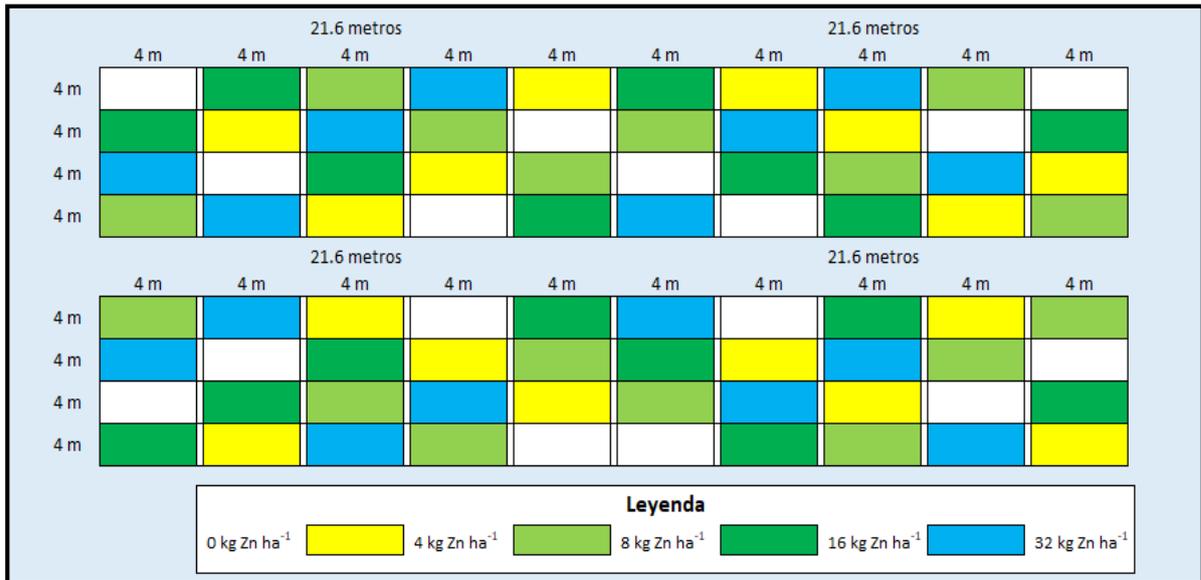


Figura 6. División del campo experimental en unidades experimentales.

3.6. VARIABLES EVALUADAS

3.6.1. Variables biométricas

- a) **Biomasa aérea:** Se evaluó la producción de biomasa aérea por planta (g).
- b) **Rendimiento:** Se evaluó el rendimiento total y comercial de cada unidad experimental (Mg ha⁻¹).

3.6.2. Variables químicas en la planta

- a) **Contenido de Zn en planta:** Contenido de Zn en planta, expresado en mg Zn kg⁻¹ de peso seco.
- b) **Contenido de Zn en cáscara y pulpa de tubérculo:** Contenido de Zn en cáscara y pulpa, expresado en mg Zn kg⁻¹ de peso seco.
- c) **Extracción de Zn:** Extracción de Zn por parte de la biomasa aérea y los tubérculos (g ha⁻¹).

3.7. PROCEDIMIENTO

3.7.1. Instalación del experimento de campo

a) Muestreo de suelo

El campo en donde se llevó a cabo el experimento fue muestreado para poder realizar un análisis de caracterización. Se tomaron 16 submuestras de los primeros 20 centímetros de profundidad del suelo, considerando dicha profundidad como una profundidad promedio a

la cual puede llegar la exploración radicular del cultivo. La toma de muestra se realizó con lampa, tomando en cuenta un muestreo de red rígida, que abarcó todo el campo experimental. Luego se combinaron las submuestras para lograr una muestra compuesta. A partir de esa muestra compuesta, se tomó una submuestra de 1 kg. Asimismo, se realizó una calicata para fines de clasificación del suelo. La calicata fue descrita empleando la Guía de Campo para la Descripción de Suelos del Perfil o Calicata del MINAG (2010), y los resultados de la descripción se encuentran en el Anexo 31. El suelo fue clasificado, basado en el sistema de clasificación Soil Taxonomy (2014), como un Oxíc Dystrustepts.

Tabla 9: Análisis de caracterización del suelo.

Características		Valores
Arena (%)		39
Limo (%)		29
Arcilla (%)		32
Clase textural		Franco arcilloso
pH (H ₂ O, 1:1)	(----)	4.55
C.E. 1:1	(dS m ⁻¹)	0.16
CaCO ₃	(%)	0.0
M.O.	(%)	0.95
Fósforo disponible	mg kg ⁻¹	10.5
Potasio disponible	mg kg ⁻¹	236
CIC	cmol _c kg ⁻¹	12.80
Ca ²⁺	“	1.18
Mg ²⁺	“	0.78
K ⁺	“	0.55
Na ⁺	“	0.11
Al+H	“	0.85
Al	“	0.61
PSB	(%)	77.5
Zn disponible	ppm	2.30

b) Análisis de caracterización del suelo

El material de suelo proveniente de las submuestras y de la calicata se dejó secar al sol, y se pasó a través de un tamiz de 2 mm. Las características físicas y químicas del suelo fueron determinadas según los métodos analíticos que se realizan en el Laboratorio de Análisis de

Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF) de la UNALM (Bazán 2017). Se determinó el pH (método potenciométrico), la conductividad eléctrica (C.E., método electrométrico), contenido de carbonatos (% CaCO_3 , método del calcímetro), contenido de fósforo disponible (método Olsen modificado) y potasio disponible (método de acetato de amonio 1 N), capacidad de intercambio catiónico total y cationes cambiables (Saturación con acetato de amonio 1 N pH 7.0), acidez intercambiable (método de Yuang), aluminio intercambiable (método de fluoruro de sodio) y Zn disponible (método ASI). Los resultados del análisis se encuentran en la Tabla 9.

El suelo tiene una textura franco arcilloso, es muy fuertemente ácido (pH entre 4.5-5.5), no salino (C.E. $< 2 \text{ dS m}^{-1}$), no calcáreo (% $\text{CaCO}_3 = 0$) (Schoeneberger *et al.* 2012). Presenta un nivel medio de porcentaje de saturación de bases (75.5 %), causado por la presencia de cationes de Al e H (acidez cambiante) en el complejo de cambio. Asimismo, tiene un nivel moderado de fósforo disponible (entre 7 y 14 ppm) y potasio disponible (100-240 ppm), y un contenido bajo de materia orgánica (% M.O. < 2). Los niveles de los cationes cambiables Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ son bajos. El contenido de Zn disponible es bajo (Zn ppm < 3) (Benton Jones Jr. 2001).

c) Delimitación de las unidades experimentales

Las unidades experimentales fueron delimitadas según los tratamientos, siguiendo las Figuras 4, 5 y 6. Para tal delimitación, se empleó wincha, pabilo y cal.

d) Siembra

Se procedió a realizar la siembra de los tubérculo semilla a un distanciamiento de 0.4 m entre tubérculo, en cada surco. Se colocó, por golpe, un tubérculo-semilla. La siembra fue realizada el día 25 de noviembre del 2017.

e) Fertilización base y aplicación edáfica de Zn

La fertilización base de nitrógeno, fósforo y potasio fue de 240-162-240, en la forma de N, P_2O_5 y K_2O ; y de 20 de MgO y 24 de S, utilizando nitrato de amonio, fosfato diamónico, cloruro de potasio y Sulpomag. Esta aplicación está en base a kilogramos por hectárea; sin embargo, para el cálculo de aplicación al campo y por surco, se realizaron las conversiones de acuerdo a las dimensiones del campo, mostradas en la Figura 5. El fraccionamiento de la fertilización se realizó según la Tabla 10. Asimismo, se aplicaron aproximadamente 300

kg de guano de vacuno en todo el campo. La aplicación de primera fertilización y del guano se realizó en el momento de la siembra, de manera uniforme y a lo largo del fondo de los surcos del campo experimental.

Para la aplicación de la fertilización con Zn, se calcularon las cantidades de Zn a aplicar por surco de cada unidad experimental. La dimensión de cada surco dentro de una unidad experimental es de 4 m². Recordar que cada unidad experimental constó de 4 surcos. La aplicación del sulfato de zinc heptahidratado [ZnSO₄.7H₂O] se realizó en la siembra, y a lo largo del fondo del surco, donde a su vez se colocaron los tubérculos semilla. El sulfato de zinc heptahidratado (ZnSO₄.7H₂O) es la fuente más común de zinc y contiene 21-22 % de Zn. Se caracteriza por una alta solubilidad, y en aplicaciones edáficas se recomienda su aplicación en banda para una mayor efectividad (Cakmak, 2009; Havlin *et al.* 2016). La dosis de Zn correspondiente a los tratamientos y la cantidad de sulfato de zinc heptahidratado aplicado se muestra en la Tabla 11. La aplicación se realizó de acuerdo a las Figuras 5 y 6, las cuales muestran la distribución de los surcos y de los tratamientos.

Tabla 10: Fraccionamiento y fertilización base del campo experimental.

Unidad elemental de los fertilizantes	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	S
Época de aplicación	Fertilización base (kg ha ⁻¹)				
	240	162	240	20	24
A la siembra	80	108	24.4	20	24
Al momento del aporque	80	54	107.8	-	-
Un mes después del aporque	80	-	107.8	-	-

Tabla 11: Dosis de Zn y aplicación de ZnSO₄.7H₂O.

Dosis de Zn (kg ha ⁻¹)	ZnSO ₄ .7H ₂ O (kg ha ⁻¹)	ZnSO ₄ .7H ₂ O (g 4m ²)
0	0	0
4	18.2	7.3
8	36.4	14.5
16	72.7	29.1
32	145.5	58.2

f) Manejo agronómico del cultivo

El manejo del cultivo fue homogéneo para todos los tratamientos. La siembra de tubérculos, la fertilización, el deshierbe, el aporque y la cosecha se realizaron manualmente. La aplicación de pesticidas se realizó con un aspersor. El experimento fue en secano. La aplicación de fungicida se realizó en dos ocasiones, y la aplicación fue por aspersión foliar de mancozeb (Manzate 200 WP), para controlar la “ranchara”. El aporque se realizó a los 66 días de la siembra. El aporque se realiza con la finalidad de aislar los tubérculos del daño que causa la ranchara en el follaje, de los gusanos de diferentes especies y también reducir la presencia de malas hierbas. Asimismo, el aporque permite como proporcionar soporte mecánico a las plantas y evitar el “verdeamiento” de los tubérculos (Egúsquiza 2014). La labor del aporque también sirve para poder aplicar fertilizantes o abonos, por ello se realizó la aplicación de la segunda fertilización nitrogenada, fosfórica y potásica cuando se realizó dicha labor.

3.7.2. Evaluación de las características biométricas del cultivo

a) Biomasa aérea

La parte aérea de dos plantas por unidad experimental fue extraída, 126 días después de la siembra (DDS). Las plantas seleccionadas se obtuvieron de los dos surcos centrales de cada unidad experimental. Se realizó un corte a nivel de cuello de planta. Se consideraron tallos y hojas de las plantas. La muestra fue lavada con agua desionizada para eliminar partículas de suelo adheridas a la planta. Luego la muestra fue colocada en una bolsa de papel kraft y llevada a la estufa, a 65°C, durante 48 horas. Se anotó el peso seco de la biomasa aérea. La variable biomasa aérea es expresada como el promedio del peso seco de las dos plantas.

b) Rendimiento

La cosecha se realizó de manera manual y se tomó en cuenta, para la determinación del rendimiento, todos los tubérculos producidos en los dos surcos centrales de la parcela experimental. Se evaluó el rendimiento total y el rendimiento comercial. El rendimiento comercial está constituido por todos los tubérculos que presentan los calibres mostrados en la Tabla 12. El rendimiento total está constituido por todos los tubérculos cosechados, sin considerar el calibre de los mismos. El resultado del rendimiento total y rendimiento comercial fue expresado en Mg ha^{-1} , para ello se realizaron los cálculos correspondientes,

considerando el rendimiento obtenido en la extensión de 5.6 m² (correspondiente a los dos surcos centrales), para luego llevarlo a una extensión de 1 ha (10 000 m²).

El rendimiento comercial hace referencia al peso de los tubérculos cosechados con calibres definidos según la norma técnica peruana NTP 0.11.119 2010 (INDECOPI 2010), donde se definen 3 calibres: extra, primera y segunda. Para el rendimiento comercial se consideró el peso de los tubérculos de calibres extra, primera y segunda. Para definir los calibres se midió, en campo, el diámetro mayor y el diámetro menor del tubérculo, los cuales hacen referencia a las dimensiones máximas y mínimas del eje longitudinal y transversal cuando se intersectan en un ángulo recto (INDECOPI 2010, Tabla 12).

Tabla 12: Rangos de diámetros mayor y menor (mm) y peso (g) según el calibre y la variedad de papa (INDECOPI 2010).

Variedad		Calibres		
		Extra	Primera	Segunda
Canchan	Diámetro mayor (mm)	102-134	75-101	49-74
	Diámetro menor (mm)	72-107	51-71	38-50
	Peso (g)	320-639	155-319	29-154
Perricholi	Diámetro mayor (mm)	101-127	76-100	55-75
	Diámetro menor (mm)	80-108	55-79	44-54
	Peso (g)	382-615	179-381	50-178
Peruanita	Diámetro mayor (mm)	88-130	60-87	50-59
	Diámetro menor (mm)	63-98	45-62	40-44
	Peso (g)	265-509	56-264	45-55
Yungay	Diámetro mayor (mm)	104-151	73-103	45-72
	Diámetro menor (mm)	61-101	45-60	32-44
	Peso (g)	321-710	132-320	20-131

3.7.3. Evaluación de las características químicas del cultivo

a) Contenido de Zn en la planta

Para la evaluación de la concentración de Zn en la planta se realizó la molienda de las muestras obtenidas para el análisis de biomasa aérea. Porciones de materia seca molida fueron atacadas con una solución ácida para la obtención de la concentración de Zn.

b) Contenido de Zn en cáscara y pulpa de tubérculos

Después de la cosecha, se tomó una muestra de los tubérculos cosechados para el análisis de la concentración de Zn. Los tubérculos seleccionados fueron aquellos cosechados a partir de los dos surcos centrales de las unidades experimentales. Los tubérculos obtenidos fueron seleccionados al azar, y tuvieron un peso total que se encontraba en el rango de 1.5 a 3.5 kg, considerando aquellos tubérculos que representaban todos los calibres definidos en la Tabla 12, e incluidos los de menor calibre (que no se encuentran dentro de esa clasificación). Los tubérculos colectados fueron lavados con agua corriente y agua desionizada para eliminar los residuos que podrían encontrarse adheridos a la superficie. Luego se separó la cáscara y la pulpa, teniendo en cuenta que al momento de pelar, la cáscara no presente parte de la pulpa. Para el caso de la pulpa, se cortó en partes pequeñas, en tajadas, para que pueda permitir un mejor secado. Las cáscaras y la pulpa se colocaron en bandejas de aluminio y se secaron en la estufa por 48 horas a 70 °C. Posteriormente, las muestras fueron molidas para luego ser atacadas con una solución ácida.

c) Determinación de los contenidos de Zn en los extractos vegetales

Porciones de 1 g de muestra molida (tanto de plantas y cáscara y pulpa de tubérculos) fueron colocadas en un matraz Erlenmeyer, al cual se le agregó 8 ml de una solución de ácido nítrico y ácido perclórico, en proporción 5:1, respectivamente (Zasoski y Burau 1977). Luego, los matraces fueron colocados en una plancha de calentamiento, la cual alcanzó los 200 °C. Luego de la eliminación del material orgánico de la muestra, se retiraron los matraces de la plancha de calentamiento y se les agregó agua destilada caliente; luego las muestras se filtraron a través de papel filtro cuantitativo. Posteriormente, la solución obtenida de la filtración se llevó a un volumen final de 50 ml, y se determinó la concentración de zinc empleando espectrofotometría de absorción atómica (espectrofotómetro de absorción atómica Contraa 300 – Analytik Jena). El límite de detección fue de 0.007 ppm.

d) Extracción de Zn de la biomasa aérea y de los tubérculos

Para la extracción de Zn de la parte aérea se utilizó la biomasa aérea de los brotes registrada anteriormente, y se utilizó la concentración de Zn de las plantas. La extracción de Zn por

los tubérculos se calculó a partir del rendimiento total de papa y la concentración total de Zn de los tubérculos.

e) Determinación de la eficiencia aparente de recuperación del nutriente (ER)

Para poder calcular la ER se utilizó la fórmula establecida por Baligar *et al.* (2001) y Gonzalez *et al.* (2008), la cual es:

$$ER = \frac{\text{Extracción de Zn } T_x - \text{Extracción de Zn } T_0}{\text{Cantidad de nutriente aplicado}} \times 100$$

Donde Tx representa al tratamiento donde se aplicó Zn (4, 8, 16 y 32 kg Zn ha⁻¹) y T0 representa al tratamiento control (0 kg Zn ha⁻¹). Tanto la extracción de Zn y la cantidad de nutriente aplicado se expresa en kg ha⁻¹. La extracción de Zn se obtendrá a partir de la suma de la extracción de Zn por la biomasa aérea y la extracción de Zn por los tubérculos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. VARIABLES BIOMÉTRICAS

4.1.1. Biomasa aérea

La aplicación edáfica de Zn no afectó significativamente la producción de materia seca en la parte aérea de la papa a ninguna de las dosis evaluadas (Tabla 13). La mayor producción de materia seca en la parte aérea se alcanzó con la dosis de 8 kg Zn ha⁻¹ en la variedad Canchán (68.32 g planta⁻¹); con la dosis de 16 kg Zn ha⁻¹ en la variedad Yungay (55.70 g planta⁻¹), y con la dosis de 32 kg Zn ha⁻¹ en las variedades Perricholi y Peruanita (60.47 y 62.40 g planta⁻¹, respectivamente). Entre las variedades de papa sí se observaron diferencias significativas en la materia seca de la parte aérea. La mayor producción de materia seca se obtuvo con la variedad Canchán, con 65.56 g planta⁻¹ (Tabla 14). Estos resultados pueden explicarse por las diferencias genéticas y las características de crecimiento inherentes de los cultivares.

En un suelo de pH 7.35, de textura franco arcillo arenosa y con 1.10 kg ha⁻¹ de Zn disponible (DTPA), la aplicación edáfica de Zn incrementó la materia seca total (hoja, tallo y tubérculos) del cultivar “Kufri Jyoti”, obteniéndose un incremento del 32.3 % de la materia seca total a los 90 DDS, respecto al control, con la aplicación de 4.5 kg Zn ha⁻¹ (Banerjee *et al.* 2017). Sin embargo, White *et al.* (2012) no reportaron un incremento significativo en la biomasa aérea de la papa (variedad “Maris Piper”) por la aplicación vía foliar de Zn. Por otro lado, Hajiboland y Amirazad (2010) observaron que la privación de Zn redujo el peso seco de los brotes y raíces en col morada (var. capitata f. rubra) en 62 % y 42 %, respectivamente, en comparación con el control. La aplicación edáfica de Zn incrementó la biomasa aérea en cultivos de maíz (Wang y Jin 2007), arroz (Coffin y Slaton 2020; Wissuwa *et al.* 2007), trigo harinero (*Triticum aestivum*) y trigo duro (*Triticum durum*) (Cakmak *et al.* 1996; Liu *et al.* 2019; Yilmaz *et al.* 1997); y lechuga (De Almeida *et al.* 2020). En contraste, Anderson *et al.* (2018) no encontraron efectos significativos de la fertilización edáfica o foliar con Zn sobre el rendimiento de paja en el cultivo de lenteja (*Lens culinaris*). Gonzalez *et al.* (2008) observaron una respuesta significativa a la

aplicación edáfica de Zn en el cultivo de frijol blanco (*Phaseolus vulgaris* L.), obteniéndose una mayor producción de materia seca aérea en un suelo ligeramente ácido, pero en un suelo moderadamente alcalino no se presentaron diferencias significativas en la producción de materia seca aérea.

Tabla 13: Efecto de la aplicación edáfica de dosis crecientes de Zn sobre la producción de materia seca de la parte aérea en cuatro variedades de papa.

Dosis de Zn (kg ha ⁻¹)	Canchán Perricholi Peruanita Yungay							
	----- g planta ⁻¹ -----							
0	68.24	a	55.65	a	62.13	a	54.46	a
4	65.89	a	55.52	a	60.16	a	49.23	a
8	68.32	a	52.93	a	60.54	a	53.56	a
16	66.74	a	55.51	a	55.75	a	55.70	a
32	58.61	a	60.47	a	62.40	a	52.87	a

Valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$) de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey.

Tabla 14: Producción de materia seca de la parte aérea de cuatro variedades de papa.

Variedad	Materia seca	
	(g planta ⁻¹)	
Canchán	65.56	a
Perricholi	56.02	ab
Peruanita	60.20	ab
Yungay	53.16	b

Valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$) de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey.

4.1.2. Rendimiento

Las variedades Canchán, Perricholi y Yungay presentaron rendimientos comerciales estadísticamente similares entre sí, pero superiores al obtenido con la variedad Peruanita (Tabla 15). La variedad Yungay obtuvo el mayor rendimiento de tubérculos comerciales (13.70 Mg ha⁻¹). La variedad Canchán obtuvo el mayor rendimiento total, con 18.02 Mg ha⁻¹, siendo estadísticamente similar a Yungay y Perricholi, pero mayor y significativamente diferente a la variedad Peruanita (12.56 Mg ha⁻¹).

Tabla 15: Rendimiento comercial y total de cuatro variedades de papa.

Variedad	Rendimiento comercial		Rendimiento total	
	----- Mg ha ⁻¹ -----			
Canchán	13.30	a	18.02	a
Perricholi	13.52	a	15.48	a
Peruanita	8.91	b	12.46	b
Yungay	13.70	a	17.89	a

Valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$) de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey.

La diferencia en el rendimiento entre variedades de papa también ha sido demostrada en otros trabajos. Los cultivares de papa CIP-388453-3(A), CIP-388453-3(B), Al-624, y Al-436 también mostraron diferencias significativas para rendimiento total, rendimiento comercial y no comercial de tubérculos, en un suelo con pH 7.2 (Tekalign y Hammes 2005). En un ensayo llevado a cabo en dos lugares de estudio, con 21 variedades de papa (Tessema *et al.* 2020), se observaron diferencias significativas en el rendimiento total de tubérculos entre las variedades estudiadas en función de la ubicación y en la interacción de la variedad y la ubicación. Abbas *et al.* (2011), en un estudio llevado a cabo 32 genotipos de papa, obtuvieron diferencias significativas en los rendimientos comerciales y no comerciales de tubérculo entre genotipos. Islam *et al.* (2020) analizaron 32 genotipos de papa en tres regiones de Corea del Sur, en suelos con un pH entre 4.48 y 5.85, y observaron diferencias significativas entre genotipos y entre regiones para el rendimiento de tubérculos. Asimismo, Muhinyuza *et al.* (2014) observaron diferencias en el rendimiento, el tiempo de emergencia, la floración y la maduración entre 15 genotipos locales de papa en Ruanda.

En el presente trabajo, la aplicación edáfica de Zn no afectó significativamente el rendimiento comercial ni el rendimiento total de las variedades de papa (Tabla 16 y 17). Si bien es cierto, la concentración de Zn en el suelo es bajo (2.3 ppm), no afectó el rendimiento de tubérculos, lo que parece indicar que el rendimiento de la papa no está limitado por la disponibilidad de Zn del suelo.

Tabla 16: Efecto de la aplicación edáfica de dosis crecientes de Zn sobre el rendimiento comercial de cuatro variedades de papa.

Dosis (kg Zn ha ⁻¹)	Canchán		Perricholi		Peruanita		Yungay	
	----- Mg ha ⁻¹ -----							
0	13.02	a	13.04	a	8.92	a	13.71	a
4	13.50	a	13.04	a	8.83	a	13.90	a
8	13.10	a	14.33	a	9.79	a	13.77	a
16	13.51	a	14.09	a	8.73	a	12.82	a
32	13.38	a	13.11	a	8.30	a	14.29	a

Valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$) de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey.

Tabla 17: Efecto de la aplicación edáfica de dosis crecientes de Zn sobre el rendimiento total de cuatro variedades de papa.

Dosis (kg Zn ha ⁻¹)	Canchán		Perricholi		Peruanita		Yungay	
	----- Mg ha ⁻¹ -----							
0	16.53	a	14.78	a	11.35	a	17.74	a
4	19.54	a	14.67	a	13.25	a	19.35	a
8	18.00	a	16.40	a	13.33	a	17.60	a
16	17.39	a	16.47	a	11.96	a	16.10	a
32	18.67	a	15.09	a	12.41	a	18.65	a

Valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$) de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey.

Probablemente, el factor limitante en el rendimiento de tubérculos de papa fue el pH del suelo, el cual es 4.55 (muy fuertemente ácido). En suelos arcillosos y con pH ácidos, el P tiende a ser adsorbido a la superficie de las partículas de arcilla y los óxidos de Fe y Al, o precipitar con Al y Fe en solución (Gérard 2016; Guedes *et al.* 2015; Gustafsson *et al.* 2012; Messiga *et al.* 2011; Penn y Camberato 2019; Sánchez 2019), ocasionando una disminución en el P disponible para ser absorbido por el cultivo de papa (Mugo *et al.* 2020). Debido a ello, la cantidad de fósforo disponible para la planta, después de la fertilización, puede disminuir con el paso del tiempo en un suelo ácido (Ara *et al.* 2018). El P es un macronutriente vegetal crucial, involucrado en procesos metabólicos como la generación de ATP, la fotosíntesis, la respiración y la síntesis de macromoléculas clave, como ácidos nucleicos, fosfolípidos y almidón (Malhotra *et al.* 2018; White y Hammond 2008).

Existen diferentes formas de aluminio en el suelo; sin embargo, cuando el pH del suelo cae por debajo de 5, el Al se solubiliza en la especie mononuclear Al^{3+} , la cual es tóxica para las plantas (Gupta *et al.* 2013; Panda y Matsumoto 2007; Silva 2012). Si bien es cierto, el cultivo de papa puede desarrollarse en suelos con pH ácidos (Lazarevic *et al.* 2014; van Lierop *et al.* 1982), la presencia de aluminio en el suelo puede tener efectos negativos en el crecimiento del cultivo. La inhibición del alargamiento de la raíz es el primer síntoma ocasionado por el estrés por Al (Matsumoto y Yamamoto 2013; Panda y Matsumoto 2007); además, el aluminio puede inducir estrés oxidativo (Kochian *et al.* 2005; Silva 2012) y estrés por sequía (Tamás *et al.* 2006). Asimismo, el efecto tóxico del aluminio en las raíces puede producirse por la presencia de concentraciones micromolares de Al^{3+} (Jaskowiak *et al.* 2018; Ma *et al.* 2004), y producir efectos negativos en la raíz a los minutos de la exposición o después de horas o días (Arroyave *et al.* 2011; Blarney *et al.* 2004; Kopittke *et al.* 2007; Jaskowiak *et al.* 2018; Panda y Matsumoto 2007). En papa, se ha observado que el aluminio puede perjudicar el crecimiento y desarrollo de la planta (Dorneles *et al.* 2016; Dorneles *et al.* 2019; He *et al.* 2019; Schmohl *et al.* 2000). A nivel de sistema radicular, la restricción del crecimiento de las raíces por la toxicidad causada por el aluminio ocasiona la reducción de la absorción y translocación de macro y micronutrientes, como el Zn (Mariano y Keltjens 2005; Tabaldi *et al.* 2009). La respuesta a la toxicidad de aluminio puede variar entre diferentes clones o genotipos de papa (Tabaldi *et al.* 2007, 2009). Si bien es cierto no se conoce la respuesta a la toxicidad por aluminio de las variedades de papa ensayadas en el presente trabajo, no se podría descartar un posible efecto negativo del aluminio en el suelo en el desarrollo de la planta.

Diversos ensayos han demostrado una respuesta a la aplicación de Zn en el rendimiento del cultivo de papa. En un ensayo llevado a cabo por White *et al.* (2012), reportaron que la aplicación foliar de Zn no afectó el rendimiento de tubérculos de diferente calibre. La aplicación edáfica de Zn no influyó en el rendimiento de papa (cultivar Longshu 3) en un suelo de textura franca, con pH de 8.16 y con un contenido de Zn disponible (DTPA) de 0.73 mg kg^{-1} (Mao *et al.* 2014). De la misma forma, a través de ensayos realizados en 5 zonas distintas, en suelos de textura franco arenosa y con un nivel de pH (1:2.5 suelo-agua) que va desde los 5.59 hasta 7.28, Kromann *et al.* (2016) encontraron que la aplicación edáfica de Zn no afectó el rendimiento de papa en 5 cultivares. Sin embargo, estos últimos autores observaron diferencias significativas en los rendimientos entre los diferentes cultivares ensayados.

En contraste con estos resultados, en un experimento llevado a cabo por Rahman *et al.* (2018), se observó que la aplicación foliar de Zn incrementó significativamente el rendimiento de papa de la variedad Asterix, en un suelo franco arenoso, moderadamente ácido (pH 5.7). Por otro lado, Banerjee *et al.* (2016) encontraron que la aplicación edáfica de Zn incrementó significativamente el rendimiento total de tubérculos del cultivar Kufri Jyoti, alcanzando el rendimiento máximo con una dosis de 4.5 kg Zn ha⁻¹, en un suelo franco arcillo arenoso, con un pH de 7.3. De la misma forma, Gabriel *et al.* (2015) encontraron un incremento significativo en el rendimiento de tubérculos de los cultivares Waych'a y Pinta Boca con la aplicación edáfica de Zn (de 5 a 15 kg Zn ha⁻¹). Hadi *et al.* (2014) observaron que la aplicación de Zn mediante irrigación aumentó el peso de tubérculos totales por maceta (cultivar Marfona). López *et al.* (2014) reportaron que tanto la aplicación edáfica como la aplicación foliar de Zn incrementaron el rendimiento comercial de papa (cultivar Criolla) en un suelo de textura franca y moderadamente ácido (pH 5.57) de Colombia. En un experimento llevado a cabo por Mousavi *et al.* (2007), la aplicación foliar de Zn (8 ppt Zn ha⁻¹), en un suelo de textura franco arcillosa y ligeramente alcalino, incrementó significativamente el rendimiento de tubérculos en el cultivo de papa. Asimismo, Khan *et al.* (2019) obtuvieron un aumento significativo en el rendimiento de tubérculos (variedad Allaudin) por la aplicación edáfica de Zn, en un suelo franco limoso y ligeramente ácido. En dicho ensayo, el rendimiento más alto se obtuvo con una aplicación de 10 kg Zn ha⁻¹; sin embargo, dicho rendimiento fue significativamente similar al obtenido con la aplicación de 5 kg Zn ha⁻¹.

Diversos trabajos realizados en otros cultivos han mostrado que la aplicación edáfica de Zn no aumentó significativamente los rendimientos. Trabajos en el cultivo de maíz, soya, repollo y canola (Mao *et al.* 2014); en trigo (Mao *et al.* 2014; Zhao *et al.* 2014); en arroz (Coffin y Slaton 2020; Goloran *et al.* 2019; Phattarakul *et al.* 2012); y en lenteja (Anderson *et al.* 2018) demuestran que la aplicación edáfica de Zn no incrementó los rendimientos de los cultivos. Por otro lado, también se han encontrado aumentos significativos en el rendimiento de diferentes cultivos por la aplicación edáfica de Zn. Trabajos realizados en el cultivo de arroz (Guo *et al.* 2015; Shivay *et al.* 2008; Shivay y Prasad 2012; Wissuwa *et al.* 2007); en trigo (*Triticum aestivum*) (Cakmak *et al.* 1996; Ekiz *et al.* 1998; Hussain *et al.* 2012; Khattak *et al.* 2015; Pahlavan-Rad y Pessarakli 2009; Ramzan *et al.* 2020; Yilmaz *et al.* 1997; Zulfiqar *et al.* 2020); en lechuga (De Almeida *et al.* 2020); en cebada, triticale, y avena (Ekiz *et al.* 1998); en garbanzo (Pal *et al.* 2019); en *Triticum durum* (Ekiz *et al.*

1998; Yilmaz *et al.* 1997); en camote (Adekiya *et al.* 2018); en maíz para ensilado (Drissi *et al.* 2017); y en maíz (Liu *et al.* 2016, 2020; Ruffo *et al.* 2015) mostraron incrementos significativos en los rendimientos. Sin embargo, las diversas respuestas a la aplicación de Zn en el rendimiento obtenidas en los trabajos anteriores se ven influenciadas por la localidad, el año de siembra, las características del suelo, la forma de aplicación de Zn, la dosis de Zn utilizada, el tipo de fertilizante de Zn y la especie vegetal, variedad y cultivar.

4.2. VARIABLES QUÍMICAS EN LA PLANTA

4.2.1. Concentración de Zn en la planta

La aplicación de Zn al suelo tuvo respuestas diferentes en las cuatro variedades de papa sobre la concentración de Zn en planta (Tabla 18). Para todas las variedades, la mayor concentración se obtuvo con la dosis de 32 kg Zn ha⁻¹. La concentración de Zn en la mayoría de las plantas varía entre 30 a 100 mg Zn kg⁻¹ MS, mientras que contenidos superiores a 300 mg Zn kg⁻¹ son generalmente tóxicos (Broadley *et al.* 2007; Noulas *et al.* 2018). Un exceso en la dosis de Zn aplicado a la planta puede ocasionar efectos negativos en el proceso fotosintético (Assche y Clijsters, 1986 a, b; Vassilev *et al.* 2011) y perjudicar la producción de fotosintatos, lo que podría ocasionar una disminución en los rendimientos de tubérculos. Las concentraciones de Zn en planta encontradas en nuestro estudio variaron entre 31.62 y 100.45 mg kg⁻¹ (Tabla 18). No se observaron síntomas de toxicidad por Zn en las plantas, como clorosis, necrosis o una disminución en el rendimiento (Broadley *et al.* 2007).

Tabla 18: Efecto de la aplicación edáfica de dosis crecientes de Zn sobre la concentración de Zn en plantas de cuatro variedades de papa.

Dosis (kg Zn ha ⁻¹)	Canchán		Perricholi		Peruanita		Yungay	
	----- Zn (mg kg ⁻¹) -----							
0	31.62	d	38.34	d	38.40	d	30.54	b
4	36.87	cd	45.78	cd	48.45	c	36.39	b
8	46.90	bc	53.77	c	52.87	c	39.39	b
16	53.41	b	68.35	b	67.43	b	50.22	a
32	67.01	a	98.08	a	100.45	a	58.59	a

Valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes (P > 0.05) de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey.

Cakmak *et al.* (1996) observaron que la aplicación edáfica de Zn (10 mg Zn kg⁻¹ suelo) tuvo un resultado positivo y significativo en la concentración de Zn foliar en los brotes de 2 genotipos de *Triticum aestivum* y 2 genotipos de *Triticum durum*, en suelos de pH (promedio) moderadamente alcalino. Ekiz *et al.* (1998), observaron un aumento en la concentración de Zn (mg kg⁻¹ MS) de los brotes de cultivares de trigo harinero, trigo duro, centeno, cebada, triticale, como consecuencia de aplicación edáfica de Zn en un suelo franco arcilloso, bajo irrigación, y con un pH moderadamente alcalino. Liu *et al.* (2019), en el cultivo de trigo, observaron que la aplicación edáfica de Zn incrementó la concentración (mg kg⁻¹) y extracción (g ha⁻¹) de Zn en paja de trigo, en un suelo franco limoso, con pH 8.0. En un trabajo realizado por De Almeida *et al.* (2020), se observó que la aplicación de Zn edáfico en 3 genotipos de lechuga produjo un incremento lineal en la concentración de Zn (mg kg⁻¹) en el peso seco de los brotes, conforme la dosis de Zn aplicada aumentaba, en dos suelos fuertemente ácidos. Yilmaz *et al.* (1997) observaron que la aplicación edáfica, foliar y edáfica-foliar de Zn aumentó las concentraciones de Zn (mg kg⁻¹ MS) en los brotes de tres cultivares de *Triticum aestivum* y un cultivar de *Triticum durum*, en un suelo moderadamente alcalino y de textura franco arcillosa. Kromann *et al.* (2016) observaron que la aplicación edáfica y foliar de Zn aumentó significativamente las concentraciones de Zn (mg kg⁻¹) en los tallos del cultivo de papa (cultivar INIAP-Natividad), en dos suelos, ambos con pH ligeramente ácido y de textura franco arenosa. Banerje *et al.* (2016) encontraron que la concentración de Zn en los tallos del cultivar de papa Kufri Jyoti aumentó progresivamente a medida que la aplicación edáfica de Zn aumentaba, en un suelo de textura franco arcillo arenoso y de pH ligeramente alcalino.

4.2.2. Concentración de Zn en tubérculo

Las dosis de Zn aplicadas aumentaron significativamente la concentración de Zn en la cáscara de los tubérculos; si bien los efectos f entre variedades (Tabla 19). En la variedad Canchán y Yungay, la concentración de Zn en la materia seca de la cáscara aumentó progresivamente con las dosis de Zn aplicadas, mientras que en las variedades Perricholi y Peruanita, la concentración aumentó solo hasta la dosis de 16 kg Zn ha⁻¹.

En la Tabla 20 se observa que la aplicación de Zn incrementó la concentración de Zn en pulpa de tubérculo en todas las variedades, pero no se apreciaron diferencias significativas con aplicaciones de Zn sobre los 16 kg Zn ha⁻¹.

Diversos trabajos han demostrado que existe una variabilidad en la concentración de Zn en tubérculos entre genotipos de papa y también en la interacción entre el genotipo y el ambiente (Burgos *et al.* 2007; Haynes *et al.* 2012; Tekalign y Hammes 2005; White *et al.* 2009, 2012). Sin embargo, cabe mencionar que esta variabilidad no solamente es exclusiva para la concentración de Zn, también se puede presentar una variabilidad entre genotipos en la concentración de otros nutrientes en los tubérculos (Balemi y Schenk 2009; Bellumori *et al.* 2020).

Tabla 19: Efecto de la aplicación edáfica de dosis crecientes de Zn sobre la concentración de zinc en cáscara de tubérculo en cuatro variedades de papa.

Dosis (kg Zn ha ⁻¹)	Canchán		Perricholi		Peruanita		Yungay	
	----- Zn (mg kg ⁻¹) -----							
0	13.30	d	18.35	c	16.10	b	14.03	d
4	15.58	cd	21.70	bc	18.78	ab	15.23	cd
8	17.88	c	21.33	bc	18.05	ab	18.65	bc
16	28.43	b	28.78	a	20.95	a	20.50	ab
32	34.30	a	23.23	b	19.73	a	22.23	a

Valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$) de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey

Tabla 20: Efecto de la aplicación edáfica de dosis crecientes de Zn sobre la concentración de zinc en pulpa de tubérculo en cuatro variedades de papa.

Dosis (kg Zn ha ⁻¹)	Canchán		Perricholi		Peruanita		Yungay	
	----- Zn (mg kg ⁻¹) -----							
0	9.38	b	8.45	d	13.93	b	10.43	b
4	10.20	b	13.33	c	13.63	b	11.25	ab
8	10.83	b	14.65	bc	15.78	a	10.98	ab
16	12.70	a	16.95	a	14.53	ab	12.25	a
32	13.10	a	15.73	ab	16.10	a	11.95	ab

Valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$) de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey

La concentración de Zn en el tubérculo de papa presenta diversas respuestas a la aplicación edáfica. En un experimento de aplicación edáfica de Zn, la concentración de Zn en los tubérculos y la extracción total de Zn se incrementaron progresivamente con las dosis aplicadas (Banerjee *et al.* 2016, 2017), en un suelo de textura franco arcillo arenoso y de

pH ligeramente alcalino. En un experimento llevado a cabo por Hadi *et al.* (2014) se observó que la aplicación de Zn, mediante irrigación o vía foliar, aumentó la concentración de Zn en el tubérculo. En trabajos llevados a cabo por Ierna *et al.* (2020) y Mousavi *et al.* (2007) se observó que la aplicación foliar de Zn también incrementó la concentración de Zn en el tubérculo. Experimentos llevados a cabo por Kromann *et al.* (2016) mostraron una tendencia de aumentar la concentración de Zn (en cáscara y en pulpa) a medida que aumentan las dosis de Zn aplicadas, de forma edáfica y foliar, en suelos de textura franco arenoso, con pH ligeramente ácido. Asimismo, en dichos ensayos se observaron respuestas diferentes a la aplicación de Zn (edáfica o foliar) entre cultivares de papa. En un experimento llevado a cabo por Mao *et al.* (2014) no se observó un aumento significativo en la concentración de Zn en los tubérculos de papa por la aplicación edáfica de Zn, en un suelo de textura franca, con un pH moderadamente alcalino. White *et al.* (2017), en experimentos llevados a cabo en cuatro genotipos de papa, se observó un incremento en la concentración de Zn en el tubérculo por aplicación foliar de Zn. Las concentraciones de los elementos en los tubérculos no solo están influenciadas por las características genéticas del cultivar o variedad, sino también por la interacción entre dichas características con las condiciones locales (ambientales y edáficas) y las prácticas de manejo del cultivo (Amoros *et al.* 2020; Gąsiorowska *et al.* 2018; Kromann *et al.* 2016; Swain *et al.* 2014).

Existen diferencias genéticas distintas en el requerimiento de Zn, la eficiencia de Zn y la tolerancia a concentraciones altas de Zn en los tejidos de las diferentes especies vegetales (Gupta *et al.* 2016). Se han llevado a cabo experimentos en diversos cultivos, en los cuales se observa una respuesta positiva a la aplicación edáfica de Zn en la concentración de Zn de la parte cosechable del cultivo. Se observan aumentos en la concentración de Zn por la aplicación de Zn edáfico en repollo (Mao *et al.* 2014); canola (Mao *et al.* 2014; Wang *et al.* 2009); arroz (Coffin y Slaton 2020; Fageria 2002; Shivay *et al.* 2008; Shivay y Prasad 2012; Wissuwa *et al.* 2007); frijol común (Fageria 2002); trigo harinero (Ekiz *et al.* 1998; Graham *et al.* 1992; Hussain *et al.* 2012; Liu *et al.* 2019); cebada (Ekiz *et al.* 1998; Graham *et al.* 1992); avena (Ekiz *et al.* 1998); triticale, trigo duro y centeno (Ekiz *et al.* 1998). Estos resultados dependen de las condiciones edáficas, las dosis de Zn aplicadas y las variedades utilizadas. La aplicación foliar de Zn también ha tenido resultados positivos en el incremento de la concentración de Zn en las partes comestibles de diversos cultivos. Se ha observado que la aplicación foliar de Zn puede aumentar de forma significativa las concentraciones de Zn en los granos de trigo, en comparación con aplicaciones edáficas de

Zn (Pahlavan-Rad y Pessaraki 2009; Yang *et al.* 2011; Zhao *et al.* 2014; Zou *et al.* 2012, 2019). Hidoto *et al.* (2017) observaron que la aspersión foliar de Zn es un método eficaz para la biofortificación del garbanzo, en comparación con la aplicación al suelo y la técnica de semillas embebidas en solución de Zn. En un experimento llevado a cabo por Phattarakul *et al.* (2012) se observó que la aplicación foliar o aplicación edáfica+foliar, aumentó de manera significativa las concentraciones de Zn en grano de arroz, en comparación con las aplicaciones edáficas de Zn. Diversos estudios también han demostrado que la aplicación foliar en combinación con la aplicación edáfica presentan un mayor efecto en el incremento del rendimiento y la concentración de Zn en las partes comestibles de algunos cultivos (Guo *et al.* 2015; Imran y Rehim 2016; Mathpal *et al.* 2016; Pal *et al.* 2019; Yilmaz *et al.* 1997). Sin embargo, en algunos trabajos, la aplicación de Zn no produce un aumento significativo en la concentración de la parte comestible del cultivo, en suelos de pH alcalino (Anderson *et al.* 2018; Mao *et al.* 2014).

El Zn aplicado al suelo, mediante fertilización, aumenta todas las formas y reservas de Zn del suelo (Kamali *et al.* 2011). Estas formas son disponibles y no disponibles. Las formas de Zn disponibles se encuentran en solución y débilmente adsorbidas a la superficie de las partículas orgánicas e inorgánicas. Por otro lado, las formas no disponibles de Zn se encuentran asociadas a óxidos de hierro, manganeso y aluminio; enlazadas a carbonatos, enlazadas fuertemente a la materia orgánica insoluble y el Zn residual (Impa y Johnson-Beebout, 2012; Sharma *et al.* 2012; Xiang *et al.* 1995), siendo esta última la forma más abundante de Zn en el suelo, la cual está relacionada a fracciones de Zn asociadas a minerales arcillosos (Alvarez *et al.* 2001; Behera *et al.* 2008; Han *et al.* 2011; Iyengar *et al.* 1981; Joshi *et al.* 2014; Kamali *et al.* 2011; Leite *et al.* 2020; Xiang *et al.* 1995; Yang *et al.* 2013). La aplicación de Zn en dosis cada vez mayores tiende a aumentar la proporción de las formas de Zn intercambiables y adsorbidas en la materia orgánica en el suelo (Leite *et al.* 2020; Nascimento *et al.* 2002); además, la sorción de Zn también aumenta a medida que aumenta la concentración de Zn añadido, y esta sorción depende de la CIC del suelo, que a su vez refleja los contenidos de arcilla y carbono orgánico en los suelos (Rupa *et al.* 2000; Singh *et al.* 2006). El tiempo de contacto del Zn en el suelo también puede influir en su disponibilidad. Singh *et al.* (2006), en un ensayo con periodo de incubación de 90 días, determinaron que cuanto más largo sea el período de tiempo de contacto del Zn con el suelo, menor será la desorción de Zn, tanto del Zn del suelo nativo como del agregado. El resultado de ello podría reflejarse en una menor disponibilidad de Zn en la solución suelo,

debido a las reacciones del suelo que convierten formas disponibles de Zn a formas no disponibles.

Kromann *et al.* (2016) observaron que la concentración de Zn en la biomasa aérea de la papa fue entre 7 a 11 veces más alta que la concentración en tubérculos pelados en ensayos con Zn aplicado de forma edáfica. De la misma forma, White *et al.* (2012) encontraron una mayor concentración de Zn en brotes que en tubérculos, mediante la aplicación foliar de Zn, y sugieren que la concentración de Zn en el tubérculo fue limitada por la translocación de Zn en el floema de los brotes a los tubérculos. Una consecuencia de esta diferencia en la concentración de Zn en brotes y tubérculos es la baja movilidad de Zn en el floema (White y Broadley 2009, 2011). En nuestro estudio, las variaciones entre la concentración de Zn en la biomasa aérea y la concentración de Zn en tubérculo pelado ($Zn_{aéreo}:Zn_{tubérculo}$) se encuentran entre 3.37 a 5.12 para la variedad Canchán, 4.54 a 6.24 para la variedad Perricholi, 2.76 a 6.24 para la variedad Peruanita, y 2.93 a 4.9 para la variedad Yungay. Se observa que las mayores relaciones Zn foliar/Zn tubérculo se obtienen con las dosis más altas. Esta diferencia en la proporción $Zn_{aéreo}:Zn_{tubérculo}$ probablemente sea por las diferencias genéticas entre variedades.

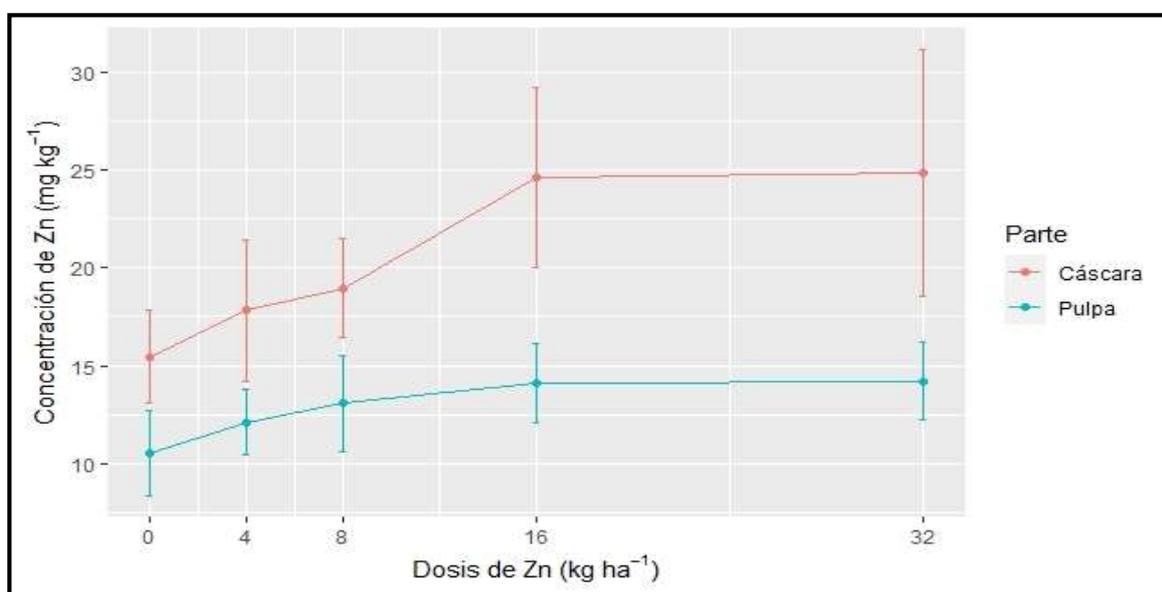


Figura 7. Relación entre el contenido promedio de zinc en la cáscara y en la pulpa del tubérculo y la dosis de Zn (kg ha⁻¹).

Las barras representan la desviación estándar de la media de las concentraciones de Zn (mg kg⁻¹) de todas las variedades de papa para una misma dosis.

En la Figura 7 se observa que la cáscara presenta mayores concentraciones de Zn, en comparación con la pulpa. La cáscara representó entre el 14.56 y el 27.34 % del peso fresco de las muestras de tubérculos, mientras que la pulpa representó entre el 72.66 y 85.44 % del peso fresco. La misma tendencia se observa en el peso seco del tubérculo. La concentración de Zn en la cáscara es consistentemente más alta que la pulpa de los tubérculos (Subramanian *et al.* 2011; Šrek *et al.* 2012; Wszelaki *et al.* 2005). Si bien es cierto, el uso de la papa para la gastronomía muchas veces es en forma de papa sin cáscara, observamos que la cáscara tiene una concentración significativa de Zn; por lo tanto, se debería considerar no descartar la cáscara del tubérculo de papa. La cáscara de papa también es considerada una fuente importante de fibra y antioxidantes (Beals 2019; Samotyja 2019).

Utilizando datos de materia seca total, y materia seca de cáscara y pulpa (Anexo 28 y 29), se obtuvo el aporte de Zn de los tubérculos de las cuatro variedades (Tabla 21). Se observa que el aporte de Zn, por 100 g de materia seca de tubérculo, no es significativo para dosis mayores a 16 kg Zn ha⁻¹ en las variedades Canchán, Perricholi y Yungay. En Peruanita, el aporte de Zn es significativo hasta la aplicación de 8 kg Zn ha⁻¹.

Tabla 21: Efecto de la aplicación edáfica de dosis crecientes de Zn sobre el aporte de zinc (mg) por 100 g de materia seca de tubérculos en cuatro variedades de papa.

Dosis (kg Zn ha ⁻¹)	Canchán		Perricholi		Peruanita		Yungay	
	----- Zn (mg) -----							
0	1.01	c	1.01	d	1.43	c	1.10	b
4	1.11	bc	1.47	c	1.48	bc	1.19	b
8	1.21	b	1.58	bc	1.62	ab	1.23	ab
16	1.54	a	1.89	a	1.58	abc	1.39	a
32	1.67	a	1.70	b	1.68	a	1.36	a

Valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$) de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey

Observamos que el aporte de Zn varía de 1.01 a 1.89 mg por 100 g de materia seca de tubérculo. El consumo per cápita de papa en el Perú, según los datos de FAOSTAT (FAO 2021), es de 246.5 g al día. Considerando que la materia seca de los tubérculos de papa es, en promedio, 23 %, se estaría consumiendo 56.7 g de materia seca, a partir de los 246.5 g

de consumo diario de papa. A partir de dicho dato, y considerando los contenidos de Zn obtenidos en las cuatro variedades, el aporte diario de Zn, con el consumo de las papas biofortificadas obtenidas, varía entre 0.57 y 1.07 mg Zn por día. Sin embargo, estos aportes son bajos, comparados con otros alimentos, como el frejol, el hígado de cerdo o las menudencias de pollo (Anexo 30). Los requerimientos nutricionales de Zn por día, según el NIH (2021), son de 8 mg y 11 mg diarios para una mujer adulta y hombre adulto, respectivamente. Por lo tanto, los tubérculos obtenidos en nuestro ensayo podrían cubrir entre el 7.1 y 13.4 % de los requerimientos diarios de Zn para una mujer adulta, y entre 5.2 y 9.7 % de los requerimientos diarios de Zn para un hombre adulto.

4.2.3. Extracción de Zn

La extracción de Zn (g ha^{-1}) por la parte aérea en todas las variedades aumenta progresivamente conforme se incrementan las dosis de Zn aplicadas (Tabla 22). A pesar de que los tubérculos representan un mayor peso que la parte aérea de la planta, las concentraciones de Zn en la parte aérea tienden a ser mayores. Debido a ello, la extracción de la parte aérea es mayor en comparación con la extracción de Zn por los tubérculos (Tabla 22 y 23).

Tabla 22: Efecto de la aplicación edáfica de dosis crecientes de Zn sobre la extracción total de zinc de la parte aérea en cuatro variedades de papa.

Dosis (kg Zn ha ⁻¹)	Canchán		Perricholi		Peruanita		Yungay	
	----- Zn (g ha ⁻¹) -----							
0	54.37	b	53.32	c	59.21	c	41.43	b
4	60.85	b	63.70	c	73.22	bc	44.72	b
8	80.40	ab	70.64	bc	80.59	bc	52.72	ab
16	89.01	a	95.68	b	94.96	b	69.57	a
32	98.00	a	148.02	a	155.99	a	76.81	a

Valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$) de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey

Tabla 23: Efecto de la aplicación edáfica de dosis crecientes de Zn sobre la extracción total de zinc de tubérculos en cuatro variedades de papa.

Dosis (kg Zn ha ⁻¹)	Canchán		Perricholi		Peruanita		Yungay	
	Zn (g ha ⁻¹)							
0	41.16	c	30.25	c	44.28	a	39.45	a
4	51.14	bc	42.38	bc	51.90	a	46.22	a
8	52.66	bc	53.19	ab	58.86	a	43.24	a
16	64.66	ab	62.66	a	51.66	a	44.20	a
32	76.08	a	53.69	ab	56.33	a	51.42	a

Valores dentro de una columna seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($P > 0.05$) de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey

La aplicación edáfica de Zn incrementó significativamente la extracción de Zn por parte de los tubérculos en las variedades Canchán y Perricholi, obteniéndose la extracción más alta con las dosis de 32 y 16 kg Zn ha⁻¹, respectivamente. Estos resultados muestran un comportamiento marcadamente diferente entre las variedades Canchán y Perricholi (variedades que responden a la biofortificación, con incrementos entre 84 % y 107 % en la extracción de Zn, respectivamente) vs. Yungay y Peruanita (variedades que no responden a la biofortificación, con incrementos de aproximadamente 30% en la extracción de Zn).

4.2.4. Eficiencia aparente de recuperación

La eficiencia aparente de recuperación (ER), en las cuatro variedades de papa, tiende a disminuir conforme las dosis de aplicación edáfica de Zn aumentan (Tabla 24). Las eficiencias son bajas debido a que las dosis ensayadas son muy altas, al tratar de buscar una mayor absorción de Zn en la planta, y como resultado de ello, una mayor concentración de Zn en los tubérculos. La baja eficiencia en la recuperación de Zn puede ser producida por una baja capacidad de absorción por parte de la planta, o una baja disponibilidad de Zn en el suelo, lo que podría ocasionar una baja capacidad de biofortificación de cultivo.

Tabla 24: Extracción total (ET) y eficiencia aparente de recuperación (ER) de Zn en cuatro variedades de papa con dosis crecientes de Zn.

Dosis (kg Zn ha ⁻¹)	Canchán		Perricholi		Peruanita		Yungay	
	ET (g Zn ha ⁻¹)	ER (%)						
0	95.53	-	83.57	-	103.49	-	80.88	-
4	111.99	0.41	106.08	0.56	125.12	0.54	90.94	0.25
8	133.06	0.47	123.83	0.50	139.45	0.45	95.96	0.19
16	153.67	0.36	158.34	0.47	146.62	0.27	113.77	0.21
32	174.08	0.25	201.71	0.37	212.32	0.34	128.23	0.15

A pesar de que a un pH bajo se presente una mayor solubilidad y disponibilidad de Zn para los cultivos (Gupta *et al.* 2016), el Zn puede reaccionar con los diferentes componentes del suelo y reducir su disponibilidad. Un alto contenido de arcilla puede ocasionar una mayor adsorción de Zn en el suelo (Ghiri *et al.* 2012), ocasionando una lenta reversibilidad del Zn sorbido, es decir, una liberación lenta del Zn desde la fase sólida hacia la fase líquida. Asimismo, la presencia de fósforo en el suelo puede promover la adsorción de Zn, debido a la formación de complejos P-Zn en las superficies coloidales orgánicas e inorgánicas (Sacristán *et al.* 2018), reduciendo de esta forma la solubilidad y disponibilidad de Zn (Pérez-Novo *et al.* 2011a). En suelos ácidos, la adsorción de Zn puede ser mayor en presencia de P (Pérez-Novo *et al.* 2011b). Además, debido a las condiciones del suelo de presentar un pH ácido y por la presencia de aluminio (acidez cambiante), se puede observar la restricción del crecimiento de las raíces por la toxicidad causada por el aluminio, la cual produce una reducción de la absorción y translocación de macro y micronutrientes, como el Zn (Mariano y Keltjens 2005; Tabaldi *et al.* 2009).

V. CONCLUSIONES

- Para las condiciones del presente experimento, la aplicación edáfica de Zn no afectó los rendimientos total ni comercial de tubérculos en las variedades ensayadas; sin embargo, el rendimiento de las variedades blancas de papa (Canchán, Perricholi y Yungay) superó al de la variedad amarilla (Peruanita).
- La concentración de Zn en la planta de papa se incrementó conforme aumentó la dosis de aplicación, con la dosis de 32 kg Zn ha⁻¹ superando significativamente a las demás dosis.
- Las concentraciones de Zn en cáscara obtenidas con dosis de aplicación de Zn mayores a 16 kg ha⁻¹ superaron al testigo en todas las variedades. La concentración de Zn en pulpa fue máxima con la aplicación de 16 kg Zn ha⁻¹ en las variedades Canchán, Perricholi y Yungay y con 8 kg Zn ha⁻¹ en la variedad Peruanita.
- La aplicación edáfica de Zn no contribuyó a la biofortificación agronómica de tubérculos en las variedades de Peruanita y Yungay (variedades que no responden). En Canchán y Perricholi (variedades que responden), la biofortificación de los tubérculos se alcanza a partir de 8 kg Zn ha⁻¹.

VI. RECOMENDACIONES

- Dado que los resultados hallados apuntan a una limitada capacidad de la aplicación edáfica para la biofortificación de Zn en papa, se recomienda ensayar la aplicación foliar como estrategia en la biofortificación.
- Se recomienda la biofortificación en sistemas de producción de papa donde los factores limitantes en el rendimiento se hayan atendido.
- Se deben realizar ensayos que involucren el uso de clones de papa obtenidos del programa de mejoramiento del Centro Internacional de la Papa. Dichos clones, según los estudios hasta ahora desarrollados, muestran una acumulación significativa de Zn en tubérculo.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbas, G; Hafiz, IA; Abbasi, NA; Hussain, A. 2011. Determination of processing and nutritional quality attributes of potato genotypes in Pakistan. *Pakistan Journal of Botany* 44(1): 201-208.
- Adekiya, AO; Aboyeji, CM; Agbede, TM; Dunsin, O; Adebisi, OTV. 2018. Effect of ZnSO₄ fertilizer on soil chemical properties, performance and proximate quality of sweet potato in a derived savanna ecology of Nigeria. *Open Agriculture* 3(1): 644–651.
- Ahmed, F; Ahmed, N; Pissarides, C; Stiglitz, J. 2020. Why inequality could spread COVID-19. *Lancet Public Health* 5(5):e240.
- Alloway, BJ. 2008. *Zinc in soils and crop nutrition* (2nd ed.). International Zinc Association (IZA), International Fertilizer Industry Association (IFA).
- Alloway, BJ. 2009. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. *Environmental Geochemistry and Health* 31(5): 537–548.
- Álvarez, JM; Novillo, J; Obrador, A; López-Valdivia, LM. 2001. Mobility and leachability of zinc in two soils treated with six organic zinc complexes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 49(8): 3833–3840.
- Amoros, W; Salas, E; Hualla, V; Burgos, G; De Boeck, B; Eyzaguirre, R; zum Felde, T; Bonierbale, M. 2020. Heritability and genetic gains for iron and zinc concentration in diploid potato. *Crop Science* 60:1884-1896.
- Anderson, S; Schoenau, J; Vandenberg, A. 2018. Effects of zinc fertilizer amendments on yield and grain zinc concentration under controlled environment conditions. *Journal of Plant Nutrition* 41(14): 1842–1850.
- Andre, CM; Ghislain, M; Bertin, P; Oufir, M; del Rosario Herrera, M; Hoffmann, L; Hausman, JF; Larondelle, Y; Evers, D. 2007. Andean potato cultivars (*Solanum*

- tuberosum* L.) as a source of antioxidant and mineral micronutrients. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 55(2): 366–378.
- Ara, I; Islam, MS; Kashem, MA; Osman, KT. 2018. A comparative study of phosphorus availability in an acidic soil and an alkaline soil amended with organic and inorganic phosphorus sources. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 18(2): 466-478.
- Arroyave, C; Barceló, J; Poschenrieder, C; Tolrà, R. 2011. Aluminium-induced changes in root epidermal cell patterning, a distinctive feature of hyperresistance to Al in *Brachiaria decumbens*. *Journal of Inorganic Biochemistry* 105(11): 1477–1483.
- Assche, F; Clijsters, H. 1986a. Inhibition of photosynthesis in *Phaseolus vulgaris* by treatment with toxic concentrations of zinc: Effects on electron transport and photophosphorylation. *Physiologia Plantarum* 66(4): 717–721.
- Assche, F; Clijsters, H. 1986b. Inhibition of photosynthesis in *Phaseolus vulgaris* by treatment with toxic concentration of zinc: Effect on Ribulose-1, 5-bisphosphate Carboxylase/ Oxygenase. *Journal of Plant Physiology* 125(3-4): 355–360.
- Balemi, T; Schenk, MK. 2009. Genotypic variation of potato for phosphorus efficiency and quantification of phosphorus uptake with respect to root characteristics. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 172(5): 669–677.
- Banerjee, H; Sarkar, S; Deb, P; Chakraborty, I; Sau, S; Ray, K. 2017. Zinc fertilization in potato: A physiological and bio-chemical study. *International Journal of Plant and Soil Science* 16(2): 1-13.
- Banerjee, H; Sarkar, S; Deb, P; Dutt, a SK; Ray, K; Rana, L; Majumdar, K. 2016. Impact of zinc fertilization on potato (*Solanum tuberosum* L.) yield, zinc use efficiency, quality and economics in Entisol of West Bengal. *Journal of the Indian Society of Soil Science* 64(2): 176-182.
- Bazán, R. 2017. *Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego*. Ministerio de Agricultura, Instituto Nacional de Innovación Agraria.
- Beals, KA. 2019. Potatoes, nutrition and health. *American Journal of Potato Research* 96: 102–110.
- Behera, SK; Singh, D; Dwivedi, BS; Singh, S; Kumar, K; Rana, DS. 2008. Distribution of fractions of zinc and their contribution towards availability and plant uptake of zinc

under long-term maize (*Zea mays* L.)–wheat (*Triticum aestivum* L.) cropping on an Inceptisol. *Australian Journal of Soil Research* 46(1): 83.

Bellumori, M; Chasquibol Silva, NA; Vilca, L; Andrenelli, L; Cecchi, L; Innocenti, M; Balli, D; Mulinacci, N. 2020. A Study on the biodiversity of pigmented Andean potatoes: Nutritional profile and phenolic composition. *Molecules* 25(14): 3169.

Beltrán, A; Seinfeld, J. 2014. *Desnutrición crónica infantil en el Perú: un problema persistente*. Universidad del Pacífico.

Benton Jones Jr, J. 2001. *Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis*. CRC Press.

Bhutta, ZA; Das, JK; Rizvi, A; Gaffey, MF; Walker, N; Horton, S; Web, P; Lartey, A; Black, R; the Lancet Nutrition Interventions Review Group; the Maternal and Child Nutrition Study Group. 2013. Evidence-based interventions for improvement of maternal and child nutrition: what can be done and at what cost? *The Lancet* 382(9890): 452-77.

Black, R; Allen, LH; Bhutta, ZA; Caulfield, LE; de Onis, M; Ezzati M; Mathers, C; Rivera, J; Maternal and Child Undernutrition Study Group. 2008. Maternal and child undernutrition: global and regional exposures and health consequences. *The Lancet* 371(9608): 243-60.

Black, RE; Victora, CG; Walker, SP; Bhutta, ZA; Christian, P; de Onis, M; Ezzati, M; Grantham-McGregor, S; Katz, J; Martorell, R; Uauy, R; Maternal and Child Nutrition Study Group. 2013. Maternal and child undernutrition and overweight in low-income and middle-income countries. *The Lancet* 382(9890): 427-451.

Blarney, FPC; Nishizawa, NK; Yoshimura, E. 2004. Timing, magnitude, and location of initial soluble aluminum injuries to Mungbean roots. *Soil Science and Plant Nutrition* 50(1): 67–76.

Bonierbale, M; Grüneberg, W; Amoros, W; Burgos, G; Salas, E; Porrás, E; Felde, T zum. 2009. Total and individual carotenoid profiles in *Solanum phureja* cultivated potatoes: II. Development and application of near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) calibrations for germplasm characterization. *Journal of Food Composition and Analysis* 22(6): 509-516.

- Bouis, HE; Welch, RM. 2010. Biofortification—a sustainable agricultural strategy for reducing micronutrient malnutrition in the global south. *Crop Science* 50(April): S-20-S-32.
- Broadley, MR; White, PJ; Hammond, JP; Zelko, I; Lux, A. 2007. Zinc in plants. *New Phytologist* 173(4): 677–702.
- Brown, PH; Cakmak, I; Zhang, Q. 1993. Form and function of zinc plants. In A.D. Robson (Ed.), *Zinc in soils and plants* (pp. 93–106). Springer.
- Brown, KH; Rivera, JA; Bhutta, Z; Gibson, RS; King, JC; Lönnnerdal, B; Ruel, MT; Sandström, B; Wasantwisut, E; Hotz, C. 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 Nutrition Bulletin* 25 (1 Suppl. 2): S99–203.
- Burgos, G; Amoros, W; Morote, M; Stangoulis, J; 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.
- Burlingame, B; Mouillé, B; Charrondière, R. 2009. Review: Nutrients, bioactive non-nutrients and anti-nutrients in potatoes. *Journal of Food Composition and Analysis* 22: 494–502.
- Cakmak, I. 2008. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? *Plant and Soil* 302(1-2): 1-17.
- Cakmak, I. 2009. Enrichment of fertilizers with zinc: An excellent investment for humanity and crop production in India. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* 23(4): 281-289.
- Cakmak, I; McLaughlin, MJ; White, P. 2017. Zinc for better crop production and human health. *Plant and Soil* 411(1-4).
- Cakmak, I; Yılmaz, A; Ekiz, H; Torun, B; Erenoglu, B; Braun, HJ. 1996. Zinc deficiency as a critical nutritional problem in wheat production in Central Anatolia. *Plant and Soil* 180:165-172.

- Carvalho, SMP; Vasconcelos, MW. 2013. Producing more with less: Strategies and novel technologies for plant-based food biofortification. *Food Research International* 54(1): 961-971.
- Centro Nacional de Alimentación y Nutrición, Instituto Nacional de Salud, Ministerio de Salud, 2003. *Encuesta Nacional de Consumo de Alimentos en Niños de 12 a 35 meses y Mujeres in Edad Fértil. Informe Final*. CENAN.
- Claus, J; Bohmann, A; Chavarría-Krauser, A. 2013. Zinc uptake and radial transport in roots of *Arabidopsis thaliana*: A modelling approach to understand accumulation. *Annals of Botany* 112(2): 369–380.
- Clemens, S. 2010. Zn – a versatile player in plant cell biology. In R. Hell & R.R. Mendel (Eds.), *Cell Biology of Metals and Nutrients* (pp. 281-298). Springer.
- Clemens, S; Deinlein, U; Ahmadi, H; Höreth, S; Uruguchi, S. 2013. Nicotianamine is a major player in plant Zn homeostasis. *Biometals* 26: 623–632.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). 2020. *Balance preliminar de las economías de américa latina y el caribe*.
- Coffin, MD; Slaton, NA. 2020. Effect of low-use-rate zinc fertilization on rice growth and grain yield. *Agrosystems, Geosciences & Environment* 3(1).
- Consumo per cápita local de papa llegaría a 100 kilos el 2021. 2016. Diario El Comercio, Lima, Perú. 24 may.
- Dahiya, S; Shanwal, AV; Hegde, AG. 2005. Studies on the sorption and desorption characteristics of Zn(II) on the surface soils of nuclear power plant sites in India using a radiotracer technique. *Chemosphere* 60(9): 1253–1261.
- Das, S; Green, A. 2013. Importance of zinc in crops and human health. *Journal of SAT Agricultural Research* 11(December): 31-40.
- De Almeida, HJ; Vergara Carmona, VM; Ferreira Inocêncio, M; Furtini Neto, AE; Cecílio Filho, AB; Mauad, M. 2020. Soil type and zinc doses in agronomic biofortification of lettuce genotypes. *Agronomy* 10(1): 124.
- De Valença, AW; Bake, A; Brouwer, ID; Giller, KE. 2017. Agronomic biofortification of crops to fight hidden hunger in sub-Saharan Africa. *Global Food Security* 12: 8–14.

- Devaux, A; Goffart, JP; Petsakos, A; Kromann, P; Gatto, M; Okello, J; Suarez, V; Hareau, G. 2020. Global food security, contributions from sustainable potato agri-food systems. In H. Campos & O. Ortiz (Eds.), *The potato crop. Its agricultural, nutritional and social contribution to humankind* (pp 3-6). Springer.
- Dirección General de Información Agraria (DGIA). 2017. *Datos estadísticos del cultivo de papa*. MINAGRI.
- Dirección General de Seguimiento y Evaluación de Políticas (DGSEP). 2019. *Anuario estadístico de producción agrícola 2018*. MINAGRI.
- Dirección General de Seguimiento y Evaluación de Políticas (DGSEP). 2018. *Anuario estadístico de producción agrícola 2017*. MINAGRI.
- Domínguez, CH; Aguilar, LA. 2015. *Requerimiento de energía para la población peruana. Centro Nacional de Alimentación y Nutrición*. MINSA.
- Dorneles, AOS; Pereira, AS; Rossato, LV; Possebom, G; Sasso, VM; Bernardy, K; Sandri, RQ; Nicoloso, FT; Ferreira, PAA; Tabaldi, LA. 2016. Silicon reduces aluminum content in tissues and ameliorates its toxic effects on potato plant growth. *Ciência Rural* 46(3): 506–512.
- Dorneles, AOS; Pereira, AS; Sasso, VM; Possebom, G; Tarouco, CP; Schorr, MRW; Rossato, L; Ferreira, PAA; Tabaldi, LA. 2019. Aluminum stress tolerance in potato genotypes grown with silicon. *Bragantia* 78(1): 12–25.
- Drissi, S; Aït Houssa, A; Bamouh, A; Benbella, M. 2017. Response of corn silage (*Zea mays* L.) to zinc fertilization on a sandy soil under field and outdoor container conditions. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 16(2): 145–153.
- Egúsqüiza, B.R. 2000. *La papa, producción, transformación y comercialización*. Proyecto MSP. UNALM/ADEX. USAID.
- Egúsqüiza, R. 2014. *La papa en el Perú* (2nd ed.). Oficina Académica de Extensión y Extensión de la Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Ekiz, H; Bagci, SA; Kiral, AS; Eker, S; Gultekin, I; Alkan, A; Cakmak, I. 1998. Effects of zinc fertilization and irrigation on grain yield and zinc concentration of various cereals grown in zinc-deficient calcareous soil. *Journal of Plant Nutrition* 21: 2245-2256.

- Elzouki, AY; Harfi, HA; Nazer, H; Oh, W; Stapleton, FB; Whitley, RJ. 2012. *Textbook of Clinical Pediatrics* (2nd ed.). Springer.
- Escudero-Almanza, DJ; Ojeda-Barrios, DL; Hernández-Rodríguez, AO; Sánchez Chávez, E; Ruíz-Anchondo, T; Sida-Arreola, JP. 2012. Carbonic anhydrase and zinc in plant physiology. *Chilean Journal of Agricultural Research* 72(1): 140–146.
- Espinoza, W. 1997. *Los Incas. Economía, sociedad y estado en la era del Tahuantinsuyo*. Editorial Amaru.
- Fageria, NK. 2002. Influence of micronutrients on dry matter yield and interaction with other nutrients in annual crops. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 37: 1765–1772.
- FAO. 2013. *State of food and agriculture 2013: Food systems for better nutrition*.
- FAO. 2021. FAOSTAT Database. Roma, Italy.
- FAO; IFAD; UNICEF; WFP; WHO. 2018. *The state of food security and nutrition in the world 2018. Building climate resilience for food security and nutrition*.
- Fore, HH; Dongyu, Q; Beasley, DM; Ghebreyesus, TA. 2020. Child malnutrition and COVID-19: The time to act is now. *The Lancet* 396(10250): 517–518.
- Gabriel, J; Arce, M; Angulo, A; Botello, R; Casazola, JL; Velasco, J; Veramendi, S; Rodríguez, F. 2015. Agronomic biofortificación in two native potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.). *Revista Latinoamericana de la Papa* 19(2): 1-17.
- Gajate, G; Inurritegui. 2002. *El impacto de los programas alimentarios sobre el nivel de nutrición infantil: una aproximación a partir de la metodología del Propensity Score Matching*. GRADE.
- García-Bañuelos, ML; Sida-Arreola, JP; Sánchez, E. 2014. Biofortification - promising approach to increasing the content of iron and zinc in staple food crops. *Journal of Elementology* (3):865-888.
- Garg, M; Sharma, N; Sharma, S; Kapoor, P; Kumar, A; Chunduri, V; Arora, P. 2018. Biofortified crops generated by breeding, agronomy, and transgenic approaches are improving lives of millions of people around the world. *Frontiers in Nutrition* 5:12.

- Gąsiorowska, B; Plaza, A; Rzażewska, E; Cybulska, A; Górski, R. 2018. The potato tuber content of microelements as affected by organic fertilization and production system. *Environmental Monitoring and Assessment* 190(9): 522.
- Gérard, F. 2016. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils — A myth revisited. *Geoderma* 262: 213–226.
- Ghiri, MN; Rezaei, M; Sameni, A. 2012. Zinc sorption–desorption by sand, silt and clay fractions in calcareous soils of Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science* 58(9): 945–957.
- Gibson, RS; Bailey, KB; Gibbs, M; Ferguson, EL. 2010. A review of phytate, iron, zinc, and calcium concentrations in plant-based complementary foods used in low-income countries and implications for bioavailability. *Food Nutrition Bulletin* 31(2 Suppl): S134-46.
- Gibson, RS; Raboy, V; King, JC. 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.
- Gibson, RS. 2012. Zinc deficiency and human health: Etiology, health consequences, and future solutions. *Plant and Soil* 361(1-2): 291-299.
- Global Panel. 2016. *The cost of malnutrition. Why policy action is urgent*. Global Panel on Agriculture and Food Systems for Nutrition.
- Goloran, JB; Johnson-Beebout, SE; Morete, MJ; Impa, SM; Kirk, GJD; Wissuwa, M. 2019. Grain Zn concentrations and yield of Zn-biofortified versus Zn-efficient rice genotypes under contrasting growth conditions. *Field Crops Research* 234: 26-32.
- Gonzalez, D; Obrador, A; Lopez-Valdivia, LM; Alvarez, JM. 2008. Effect of zinc source applied to soils on its availability to navy bean. *Soil Science Society of America Journal* 72:641-649.
- Graham, RD; Ascher, JS; Hynes, SC. 1992. Selection of zinc efficient cereal genotypes for soils of low zinc status. *Plant and Soil* 146:241-250.
- Graham, RD; Senadhira, D; Beebe, S; Iglesias, C; Monasterio, I. 1999. Breeding for micronutrient density in edible portions of staple food crops: Conventional approaches. *Field Crops Research* 60: 57–80.

- Graham, RD; Welch, RM; Saunders, DA; Ortiz-Monasterio, I; Bouis, HE; Bonierbale, M; de Haan, S; Burgos, G; Thiele, G; Liria, R; Meisner, CA; Beebe, SE; Potts, MJ; Kadian, M; Hobbs, PR; Gupta, RK; Twomlow, S. 2007. Nutritious subsistence food systems. *Advances in Agronomy* 92(04):1-74.
- Graves, C. 2006. *La papa, tesoro de los Andes* (2nd ed.). Centro Internacional de la Papa.
- Grotz, N; Guerinot, ML. 2006. Molecular aspects of Cu, Fe and Zn homeostasis in plants. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular Cell Research* 1763:595-608.
- Grupo de Alto Nivel de Expertos en Seguridad Alimentaria y Nutrición (GANESAN). 2020. *Impacto del COVID-19 en la seguridad alimentaria y la nutrición (SAN)*.
- Guedes, RS; Fernandes, AR; Souza, ES; Silva, JRR. 2015. Maximum phosphorus adsorption capacity adjusted to isotherm models in representative soils of Eastern Amazon. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 46(20): 2615–2627.
- Guerinot, ML. 2000. The ZIP family of metal transporters. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes* 1465(1-2):190-198.
- Guo, JX; Feng, XM; Hu, XY; Tian, GL; Ling, N; Wang, JH; Shen, QR; Guo, SW. 2015. Effects of soil zinc availability, nitrogen fertilizer rate and zinc fertilizer application method on zinc biofortification of rice. *The Journal of Agricultural Science* 154(04): 584–597.
- Gupta, N; Gaurav, SS; Kumar, A. 2013. Molecular basis of aluminium toxicity in plants: A review. *American Journal of Plant Science* 4: 21–37.
- Gupta, N; Ram, H; Kumar, B. 2016. Mechanism of zinc absorption in plants: Uptake, transport, translocation and accumulation. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 15(1): 89–109.
- Gustafsson, JP; Mwamila, LB; Kergoat, K. 2012. The pH dependence of phosphate sorption and desorption in Swedish agricultural soils. *Geoderma* 189-190: 304–311.
- Hadi, MR; Taheri, R; Balali, GR. 2015. Effects of iron and zinc fertilizers on the accumulation of Fe and Zn ions in potato tubers. *Journal of Plant Nutrition* 38(2): 202-211.

- Hajiboland, R; Amirazad, F. 2010. Growth, photosynthesis and antioxidant defense system in Zn-deficient red cabbage plants. *Plant, Soil and Environment* 56(5): 209–217.
- Hale, AL; Reddivari, L; Nzaramba, MN; Bamberg, JB; Miller, JC. 2008. Interspecific variability for antioxidant activity and phenolic content among *Solanum* species. *American Journal of Potato Research* 85(5): 332–341.
- Han, X; Li, X; Uren, N; Tang, C. 2011. Zinc fractions and availability to soybeans in representative soils of Northeast China. *Journal of Soils and Sediments* 11(4): 596–606.
- Hänsch, R; Mendel, RR. 2009. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Current Opinion in Plant Biology* 12(3): 259–266.
- Havlin, JL; Tisdale, SL; Nelson, WL; Beaton, JD. 2016. *Soil fertility and fertilizers*. Pearson Education India.
- Haynes, KG; Yenko, GC; Clough, ME; Henninger, MR; Sterrett, SB. 2012. Genetic variation for potato tuber micronutrient content and implications for biofortification of potatoes to reduce micronutrient malnutrition. *American Journal of Potato Research* 89(3): 192–198.
- He, H; Li, Y; He, LF. 2019. Aluminum toxicity and tolerance in Solanaceae plants. *South African Journal of Botany* 123: 23–29.
- Hidoto, L; Worku, W; Mohammed, H; 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(1): 112-126.
- Hijmans, RJ; Spooner, DM. 2001. Geographic distribution of wild potato species. *American Journal of Botany* 88: 2101–2112.
- Hirschi, KD. 2009. Nutrient biofortification of food crops. *Annual Review of Nutrition* 29(1): 401-421.
- Hotz, C. 2009. The potential to improve zinc status through biofortification of staple food crops with zinc. *Food and Nutrition Bulletin* 30(1). S172-S178.

- Hotz, C; McClafferty, B. 2007. From harvest to health: Challenges for developing biofortified staple foods and determining their impact on micronutrient status. *Food and Nutrition Bulletin* 28 (2 Suppl.), S271–9.
- Hunter, D; Fanzo, J. 2013. Introduction: Agricultural biodiversity, diverse diets and improving nutrition. In J. Fanzo, D. Hunter, T. Borelli, F. Mattei (Eds.), *Diversifying food and diets: Using agricultural biodiversity to improve nutrition and health* (pp. 1-13). Earthscan.
- Hussain, S; Maqsood, MA; Rengel, Z; Aziz, T. 2012. Biofortification and estimated human bioavailability of zinc in wheat grains as influenced by methods of zinc application. *Plant and Soil* 361(1-2): 279–290.
- Ierna, A; Pellegrino, A; Mauro, RP; Leonardi, C. 2020. Micronutrient foliar fertilization for the biofortification of raw and minimally processed early potatoes. *Agronomy* 10(11): 1744.
- Impa, SM; Johnson-Beebout, SE. 2012. Mitigating zinc deficiency and achieving high grain Zn in rice through integration of soil chemistry and plant physiology research. *Plant and Soil* 361(1-2): 3–41.
- Impacto del Covid-19 en el sector papero del Perú. 2020. Agencia Agraria de Noticias. Lima, Perú. 1 jun.
- Imran, M.; Rehim, A. 2016. Zinc fertilization approaches for agronomic biofortification and estimated human bioavailability of zinc in maize grain. *Archives of Agronomy and Soil Science* 63(1): 106–116.
- Instituto Nacional de Estadística Informática (INEI). 2012. *Perú: Consumo per cápita de los principales alimentos 2008-2009*. Dirección Técnica de Demografía e Indicadores Sociales.
- Instituto Nacional de Estadística Informática (INEI). 2012. *IV Censo nacional agropecuario*.
- Islam, J; Choi, SP; Azad, OK; Kim, JW; Lim, Y-S. 2020. Evaluation of tuber yield and marketable quality of newly developed thirty-two potato varieties grown in three different ecological zones in South Korea. *Agriculture* 10: 327.

- Iyengar, SS; Martens, DC; Miller, WP. 1981. Distribution and plant availability of soil zinc fractions. *Soil Science Society of America Journal* 45(4): 735.
- Jaskowiak, J; Tkaczyk, O; Slota, M; Kwasniewska, J; Szarejko, I. 2018. Analysis of aluminum toxicity in *Hordeum vulgare* roots with an emphasis on DNA integrity and cell cycle. *PLoS ONE* 13(2): e0193156.
- Jones, AD. 2017. Critical review of the emerging research evidence on agricultural biodiversity, diet diversity, and nutritional status in low- and middle-income countries. *Nutrition Reviews* 75(10): 769–782.
- Joshi, D; Chandra Srivastava, P; Dwivedi, R; Pratap Pachauri, S. 2014. Chemical speciation of Zn in acidic soils: Suitable soil extractant for assessing Zn availability to maize (*Zea mays* L.). *Chemical Speciation & Bioavailability* 26(3): 148–157.
- Joy, EJM; Stein, AJ; Young, SD; Ander, EL; Watts, MJ; Broadley, MR. 2015. Zinc-enriched fertilizers as a potential public health intervention in Africa. *Plant and Soil* 389(1-2): 1–24.
- Kamali, S; Ronaghi, A; Karimian, N. 2011. Soil zinc transformations as affected by applied zinc and organic materials. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 42(9): 1038–1049.
- Khan, MW; Rab, A; Ali, R; Sajid, M; Aman, F; Khan, I; Hussain I; Ali, A. 2019. Effect of potassium and zinc on growth yield and tuber quality of potato. *Sarhad Journal of Agriculture* 35(2): 330-335.
- Khattak, SG; Dominy, PJ; Ahmad, W. 2015. Assessment of ZN interaction with nutrient cations in alkaline soil and its effect on plant growth. *Journal of Plant Nutrition* 38(7): 1110–1120.
- Khush, GS; Lee, S; Cho, JI; Jeon, JS. 2012. Biofortification of crops for reducing malnutrition. *Plant Biotechnology Reports* 6(3): 195–202.
- King, JC; Slavin, JL. 2013. White potatoes, human health, and dietary guidance. *Advances in Nutrition* 4(3): 393S–401S.
- Kochian, LV; Piñeros, MA; Hoekenga, OA. 2005. The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity. *Plant and Soil* 274(1-2): 175–195.

- Kopittke, PM; Blamey, FPC; Menzies, NW. 2007. Toxicities of soluble Al, Cu, and La include ruptures to rhizodermal and root cortical cells of cowpea. *Plant and Soil* 303(1-2): 217–227.
- Krämer, U; Clemens, S. 2005. Functions and homeostasis of zinc, copper, and nickel in plants. In M.J. Tamas & E. Martinoia (Eds.), *Molecular Biology of Metal Homeostasis and Detoxification* (pp. 215–271). Springer.
- Krebs, NF. 2000. Overview of zinc absorption and excretion in the human gastrointestinal tract. *Journal of Nutrition* 130: 1374S-1377S.
- Krebs, NF; Miller, LV; Hambidge, KM. 2014. Zinc deficiency in infants and children: A review of its complex and synergistic interactions. *Paediatrics and International Child Health* 34(4):279-88.
- Kromann, P; Valverde, F; Alvarado, S; Vélez, R; Pisuña, J; Potosí, B; Taípe, A; Caballero, D; Cabezas, A; Devaux, A. 2016. Can Andean potatoes be agronomically biofortified with iron and zinc fertilizers? *Plant and Soil* 411(1-2):121-138.
- La Frano, MR; de Moura, FF; Boy, E; Lönnnerdal, B; Burri, BJ. 2014. Bioavailability of iron, zinc, and provitamin A carotenoids in biofortified staple crops. *Nutrition Reviews* 72(5):289-307.
- Lazarević, B; Horvat, T; Poljak, M. 2014. Effect of acid aluminous soil on photosynthetic parameters of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Potato Research* 57(1): 33–46.
- Leite, CMC; Muraoka, T; Colzato, M; Alleoni, LRF. 2020. Soil-applied Zn effect on soil fractions. *Scientia Agricola* 77(2): 20180124.
- Lindsay, W. 1991. Inorganic equilibria affecting micronutrients in soils. In J. Mortvedt (Ed.), *Micronutrients in agriculture* (2nd ed.) (pp. 89-112). Soil Science Society of America.
- Liu, DY; Zhang, W; Yan, P; Chen, XP; Zhang, FS; Zou, CQ. 2016. Soil application of zinc fertilizer could achieve high yield and high grain zinc concentration in maize. *Plant and Soil* 411(1-2): 47–55.
- Liu, DY; Liu, YM; Zhang, W; Chen, XP; Zou, CQ. 2019. Zinc uptake, translocation, and remobilization in winter wheat as affected by soil application of Zn fertilizer. *Frontiers in Plant Science* 10:426.

- Liu, DY; Zhang, W; Liu, YM; Chen, XP; Zou, CQ. 2020. Soil application of zinc fertilizer increases maize yield by enhancing the kernel number and kernel weight of inferior grains. *Frontiers in Plant Science* 11:188.
- Liu, H; Gan, W; Rengel, Z; Zhao, P. 2016. Effects of zinc fertilizer rate and application method on photosynthetic characteristics and grain yield of summer maize. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 16(2): 550-562.
- Lönnerdal, B. 2000. Dietary factors influencing zinc absorption. *The Journal of Nutrition* 130 (5S Suppl.): 1378S–83S.
- López, A; Gómez, MI; Rodríguez, LE. 2014. Effect of edaphic and foliar applications of different doses of zinc on the yield of the Criolla Colombia cultivar. *Agronomía Colombiana* 32(1): 70-77.
- Low, JW; Arimond, M; Osman, N; Cunguara, B; Zano, F; Tschirley, D. 2007. Ensuring the supply of and creating demand for a biofortified crop with a visible trait: Lessons learned from the introduction of orange-fleshed sweet potato in drought-prone areas of Mozambique. *Food and Nutrition Bulletin* 28 (2 Suppl.): S258-S270.
- Lutaladio, N; Castaldi, L. 2009. Potato: The hidden treasure. *Journal of Food Composition and Analysis* 22(6): 491–493.
- Ma, JF; Shen, R; Nagao, S; Tanimoto, E. 2004. Aluminum targets elongating cells by reducing cell wall extensibility in wheat roots. *Plant and Cell Physiology* 45(5): 583–589.
- Malhotra, H; Vandana, Sharma, S; Pandey, R. 2018. Phosphorus nutrition: Plant growth in response to deficiency and excess. In M. Hasanuzzaman, M. Fujita, H. Oku, K. Nahar, B. Hawrylak-Nowak (Eds.), *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance* (pp. 171–190). Springer.
- Mao, H; Wang, J; Wang, Z; Zan, Y; Lyons, G; Zou, C. 2014. Using agronomic biofortification to boost zinc, selenium, and iodine concentrations of food crops grown on the loess plateau in China. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 14 (2): 459-470.
- Maret, W; Sandstead, HH. 2006. Zinc requirements and the risks and benefits of zinc supplementation. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* 20(1): 3-18.

- Mariano, ED; Keltjens, WG. 2005. Long-term effects of aluminum exposure on nutrient uptake by maize genotypes differing in aluminum resistance. *Journal of Plant Nutrition* 28(2): 323–333.
- Mathpal, B; Srivastava, PC; Shankhdhar, D; Shankhdhar, SC. 2016. Zinc enrichment in wheat genotypes under various methods of zinc application. *Plant, Soil and Environment* 61(4): 171–175.
- Matsumoto, H; Yamamoto, Y. 2013. Plant roots under aluminium stress: Toxicity and tolerance. In A. Eshel, T. Beeckman (Eds.), *Plant roots: The hidden half* (4th ed.) (pp. 513-536). CRC Press.
- Mayer, JE; Pfeiffer, WH.; Beyer, P. 2008. Biofortified crops to alleviate micronutrient malnutrition. *Current Opinion in Plant Biology* 11: 166–70.
- McBride, M; Sauve, S; Hendershot, W. 1997. Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils. *European Journal of Soil Science* 48(2): 337–346.
- Mengel, K; Kosegarten, H; Kirkby, EA; Appel, T. 2001. *Principles of plant nutrition*. Springer.
- Messiga, AJ; Ziadi, N; Angers, DA; Morel, C; Parent, LE. 2011. Tillage practices of a clay loam soil affect soil aggregation and associated C and P concentrations. *Geoderma* 164(3-4): 225–231.
- Miller, BDD; Welch, RM. 2013. Food system strategies for preventing micronutrient malnutrition. *Food Policy* 42: 115–128.
- MINAG. 2010. *Guía de campo para la descripción de suelos del perfil o calicata*. Dirección de Evaluación de Recursos Naturales, Dirección General de Asuntos Ambientales. Ministerio de Agricultura.
- MINAGRI busca que el consumo de papa sea de 92 kilos por persona al año. 2020. Diario El Peruano, Lima, Perú. 30 may.
- MINAGRI. 2017. *Encuesta Nacional de Intenciones de Siembra 2017: Campaña agrícola agosto 2017 – julio 2018*. Dirección General de Seguimiento y Evaluación de Políticas. Dirección de Estadística Agraria.

- MINAGRI. 2018. *Encuesta Nacional de Intenciones de Siembra 2018: Campaña agrícola agosto 2018 – julio 2019*. Dirección General de Seguimiento y Evaluación de Políticas. Dirección de Estadística Agraria.
- MINAGRI. 2020. *Análisis de mercado – papa 2020*. Sierra y Selva Exportadora, Unidad de Inteligencia Comercial.
- Mousavi, SR; Galavi, M; 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.
- Moyer, JD; Bohl, DK; Petry, C; Scott, A; Solórzano, JR; Kuhn, R. 2020. The persistent global burden of severe acute malnutrition: Cross-country estimates, models and forecasts. *Global Transitions* 2:167–179.
- Mugo, JN; Karanja, NN; Gachene, CK; Dittert, K; Nyawade, SO; Schulte-Geldermann, E. 2020. Assessment of soil fertility and potato crop nutrient status in central and eastern highlands of Kenya. *Scientific Reports* 10(1): 7779.
- Muhinyuza, JB; Shimelis, H; Melis, R; Sibiyi, J; Daphrose, G; Nzaramba, MN. 2014. Yield and yield components response of potato genotypes in selected agro-ecologies of Rwanda. *Research on Crops* 15(1): 180-191.
- Nakandalage, N; Nicolas, M; Norton, RM; Hirotsu, N; Milham, PJ; Seneweera, S. 2016. Improving rice zinc biofortification success rates through genetic and crop management approaches in a changing environment. *Frontiers in Plant Science* 7(June):1-13.
- Nascimento, CWA; Fontes, RLF; Neves, JCL; Melício, ACDF. 2002. Fractionation, desorption and chemical extraction of zinc from Oxisols. *Brazilian Journal of Soil Science* 26: 599–606 (in Portuguese).
- Naseer, S; Lee, Y; Lapierre, C; Franke, R; Nawrath, C; Geldner, N. 2012. Casparian strip diffusion barrier in *Arabidopsis* is made of a lignin polymer without suberin. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109(25): 10101–10106.

- National Institutes of Health (NIH). 2021. *Zinc. Fact sheet for health professionals*. Consultado 25 ago. 2021. Disponible en <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Zinc-HealthProfessional/>
- Navarro, JC; Prado, SM; Cárdenas, PA; Santos, RD; Caramelli, B. 2010. Pre-historic eating patterns in Latin America and protective effects of plant-based diets on cardiovascular risk factors. *Clinics* 65(10):1049–1054.
- Noulas, C; Tziouvalekas, M; Karyotis, T. 2018. Zinc in soils, water and food crops. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* 49: 252–260.
- Oey, I; Faridnia, F; Leong, SY; Burritt DJ; Liu, T. 2017. Determination of pulsed electric fields effects on the structure of potato tubers. In D. Miklavčič (Ed.), *Handbook of Electroporation* (pp. 1489-1507). Springer.
- Oliveira, EMM; Ruiz, HA; Alvarez VVH; Ferreira, PA; Costa, FO; Almeida, ICC. 2010. Nutrient supply by mass flow and diffusion to maize plants in response to soil aggregate size and water potential. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo* 34(2): 317–328.
- Olsen, LI; Palmgren, MG. 2014. Many rivers to cross: The journey of zinc from soil to seed. *Frontiers in Plant Science* 5: 30.
- Olson, R; Gavin-Smith, B; Ferraboschi, C; Kraemer, K. 2021. Food fortification: The advantages, disadvantages and lessons from sight and life programs. *Nutrients* 13(4):1118.
- Ordinola, M.; Fonseca, C; Vela, AM; Devaux, A. 2014. *Desarrollando innovaciones para la seguridad alimentaria y nutricional con base en la biodiversidad*. Centro Internacional de la Papa (CIP)
- Pahlavan-Rad, MR; Pessarakli, M. 2009. Response of wheat plants to zinc, iron, and manganese applications, uptake, and concentration of zinc, iron, and manganese in wheat grains. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 40(7-8): 1322–1332.
- Pal, V; Singh, G; Dhaliwal, SS. 2019. Agronomic biofortification of chickpea with zinc and iron through application of zinc and urea. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 50(15): 1864-1877.

- Palmer, CM; Guerinot, ML. 2009. Facing the challenges of Cu, Fe and Zn homeostasis in plants. *Nature Chemical Biology* 5:333–340.
- Panda, SK; Matsumoto, H. 2007. Molecular physiology of aluminum toxicity and tolerance in plants. *Botanical Review* 73(4): 326–347.
- Pandey, VL; Mahendra Dev, S; Jayachandran, U. 2016. Impact of agricultural interventions on the nutritional status in South Asia: A review. *Food Policy* 62: 28–40.
- Penn, CJ; Camberato, JJ. 2019. A critical review on soil chemical processes that control how soil ph affects phosphorus availability to plants. *Agriculture* 9(6):120.
- Pérez-Novo, C; Bermúdez-Couso, A; López-Periago, E; Fernández-Calviño, D; Arias-Estévez, M. 2011a. Zinc adsorption in acid soils: Influence of phosphate. *Geoderma* 162(3-4): 358–364.
- Phattarakul, N; Rerkasem, B; Li, LJ; Wu, LH; Zou, CQ; Ram, H; Sohu, VS; Kang, BS; Surek, H; Kalayci, M; Yazici, A; Zhang, FS; Cakmak, I. 2012. Biofortification of rice grain with zinc through zinc fertilization in different countries. *Plant and Soil* 361: 131–141.
- Pradhan, A; Raju, S; Nithya, DJ; Panda, AK; Wagh, RD; Maske, MR; Bhavani, RV. 2021. Farming system for nutrition-a pathway to dietary diversity: Evidence from India. *PLoS ONE* 16(3): e0248698.
- Prasad, AS. 2008. Zinc in human health: Effect of zinc on immune cells. *Molecular Medicine* 14(5-6): 353–357.
- Prasad, AS. 2020. Lessons Learned from Experimental Human Model of Zinc Deficiency. *Journal of Immunology Research* 2020:1–12.
- Prentice, AM; Gershwin, ME; Schaible, UE; Keusch, GT; Victora, CG; Gordon, JI. 2008. New challenges in studying nutrition-disease interactions in the developing world. *Journal of Clinical Investigation* 118(4):1322-1329.
- Proexpansión. 2011. *Cambios del sector papa en el Perú en la última década: Los aportes del proyecto Innovación y Competitividad de la Papa (INCOPA)*. Centro Internacional de la Papa (CIP).

- Rahman, MW; Islam, MM; Sheikh, MM; Hossain, MI; Kawochar, MA; Alam, MS. 2018. Effect of foliar application of zinc on the yield, quality and storability of potato in Tista Meander Floodplain Soil. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science* 41 (4): 1779-1793.
- Ramzan, Y; Hafeez, MB; Khan, S; Nadeem, M; Saleem-ur-Rahman; Batool, S; Ahmad, J. 2020. Biofortification with zinc and iron improves the grain quality and yield of wheat crop. *International Journal of Plant Production* 14: 501–510.
- R Core Team, 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>
- Reyes, M; Gómez-Sánchez, I; Espinoza, C. 2017. *Tablas peruanas de composición de alimentos* (10ma ed.). Ministerio de Salud, Instituto Nacional de Salud.
- Robertson, TM; Alzaabi, AZ; Robertson, MD; Fielding, BA. 2018. Starchy carbohydrates in a healthy diet: The role of the humble potato. *Nutrients* 10(11):1764.
- Rodríguez, L; Cervantes, E; Ortiz, R. 2011. Malnutrition and gastrointestinal and respiratory infections in children: A public health problem. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 8(4): 1174–1205.
- Roohani, N; Hurrell, R; Kelishadi, R; Schulin, R. 2013. Zinc and its importance for human health: An integrative review. *Journal of Research in Medical Sciences* 18(2): 144-157.
- Roosens, NHCJ; Willems, G; Saumitou-Laprade, P. 2008. Using Arabidopsis to explore zinc tolerance and hyperaccumulation. *Trends in Plant Science* 13: 208–215.
- Ruffo, M; Olson, R; Daverede, I. 2015. Maize yield response to zinc sources and effectiveness of diagnostic indicators. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 47(2): 137–141.
- Rupa, TR; Tomar, KP; Reddy, DD; Rao, AS. 2000. Time-dependent zinc desorption in soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 31(15-16): 2547–2563.
- Rutkowska, B; Szulc, W; Bomze, K; Gozdowski, D; Szychaj-Fabisiak, E. 2014. Soil factors affecting solubility and mobility of zinc in contaminated soils. *International Journal of Environmental Science and Technology* 12(5): 1687–1694.

- Sacristán, D; González–Guzmán, A; Barrón, V; Torrent, J; Del Campillo, MC. 2018. Phosphorus-induced zinc deficiency in wheat pot-grown on noncalcareous and calcareous soils of different properties. *Archives of Agronomy and Soil Science* 65(2): 208-223.
- Sadeghzadeh, B. 2013. A review of zinc nutrition and plant breeding. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 13(4): 905-927
- Saltzman, A; Birol, E; Bouis, HE; Boy, E; De Moura, FF; Islam, Y; Pfeiffer, WH. 2013. Biofortification: Progress toward a more nourishing future. *Global Food Security* 2(1):9-17.
- Samotyja, U. 2019. Potato peel as a sustainable resource of natural antioxidants for the food industry. *Potato Research* 62: 435-451
- Sanchez, PA. 2019. *Properties and management of soils in the tropics* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Sanchez, PA; Swaminathan, M. 2005. Hunger in Africa: The link between unhealthy people and unhealthy soils. *The Lancet* 365(9457):442-444.
- Sharma, A; Patni, B; Shankhdhar, D; Shankhdhar, SC. 2012. Zinc – an indispensable micronutrient. *Physiology and Molecular Biology of Plants* 19(1): 11–20.
- Schmohl, N; Pilling, J; Fisahn, J; Horst, WJ. 2000. Pectin methylesterase modulates aluminium sensitivity in *Zea mays* and *Solanum tuberosum*. *Physiologia Plantarum* 109(4): 419–427.
- Schoeneberger, PJ; Wysocki, DA; Benham, EC; Soil Survey Staff. 2012. *Field book for describing and sampling soils, Version 3.0*. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center.
- Shivay, YS; Kumar, D; Prasad, R. 2008. Effect of zinc-enriched urea on productivity, zinc uptake and efficiency of an aromatic rice-wheat cropping system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 81:229-243.
- Shivay, YS; Prasad, R. 2012. Zinc-coated urea improves productivity and quality of basmati rice (*Oryza sativa* L.) under zinc stress condition. *Journal of Plant Nutrition* 35(6): 928–951.

- Silva, S. 2012. Aluminium toxicity targets in plants. *Journal of Botany* 2012: 1–8.
- Sims, JT. 1986. Soil pH effects on the distribution and plant availability of manganese, copper, and zinc. *Soil Science Society of America Journal* 50(2): 367-373.
- Singh, D; McLaren, RG; Cameron, KC. 2006. Zinc sorption–desorption by soils: Effect of concentration and length of contact period. *Geoderma* 137(1-2): 117–125.
- Singh, D; McLaren, RG; Cameron, KC. 2008. Effect of pH on zinc sorption–desorption by soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 39(19-20): 2971–2984.
- Sistema Integrado de Estadísticas Agrarias (SIEA). 2021. Datos estadísticos del cultivo de papa. MINAGRI.
- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to soil taxonomy* (12th ed.). United States Department of Agriculture.
- Song, C; Shen, W; Du, L; Wen, J; Lin, J; Li, R. 2019. Development and chemical characterization of Casparian strips in the roots of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*). *Trees* 33: 827–836.
- Šrek, P; Hejcman, M; Kunzová, E. 2012. Effect of long-term cattle slurry and mineral N, P and K application on concentrations of N, P, K, Ca, Mg, As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn in peeled potato tubers and peels. *Plant, Soil and Environment* 58:167–173.
- Stahl, RS; James, BR. 1991. Zinc sorption by B horizon soils as a function of pH. *Soil Science Society of America Journal* 55(6): 1592.
- Stewart, CP; Dewey, KG; Ashorn, P. 2010. The undernutrition epidemic: An urgent health priority. *The Lancet* 375(9711):282.
- Subramanian, NK; White, PJ; Broadley, MR; Ramsay, G. 2011. The three-dimensional distribution of minerals in potato tubers. *Annals of Botany* 107(4): 681–691.
- Swain, EY; Rempelos, L; Orr, CH; Hall, G; Chapman, R; Almadni, M; Stockdale, EA; Kidd, J; Leifert, C; Cooper, JM. 2014. Optimizing nitrogen use efficiency in wheat and potatoes: Interactions between genotypes and agronomic practices. *Euphytica* 199(1-2): 119–136.

- Tabaldi, LA; Castro, GY; Carnelutti, D; Skrebsky, EC; Goncalves, JF; Rauber, R; Rossato, L; Schetinger, MRC; Bisognin, DA; Nicoloso, FT. 2009. Micronutrient concentration in potato clones with distinct physiological sensitivity to Al stress. *Ciência Rural* 39: 379–385.
- Tabaldi, LA; Cargnelutti, D; Gonçalves, JF; Pereira, LB; Castro, GY; Maldaner, J; Rauber, R; Rossato, LV; Bisognin, DA; Schetinger, MRC; Nicoloso, FT. 2009. Oxidative stress is an early symptom triggered by aluminum in Al-sensitive potato plantlets. *Chemosphere* 76(10): 1402–1409.
- Tabaldi, LA; Nicoloso, FT; Castro, GY; Cargnelutti, D; Goncalves, JF; Rauber, R; Skrebsky, EC; Schetinger, MRC; Morsch, VM; Bisognin, DA. 2007. Physiological and oxidative stress responses of four potato clones to aluminum in nutrient solution. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 19: 211–222.
- Tamás, L; Huttová, J; Mistrík, I; Šimonovicová, M; Široká, B. 2006. Aluminium-induced drought and oxidative stress in barley roots. *Journal of Plant Physiology* 163(7): 781–784.
- Tarqui, C; Alvarez, D; Rosales, S; Espinoza, P. 2017. Ingesta de nutrientes y estado nutricional de niños peruanos entre 6 a 35 meses. *Nutrición Clínica y Dietética Hospitalaria* 37(1):156-164.
- Tekalign, T; Hammes, PS. 2005. Growth and productivity of potato as influenced by cultivar and reproductive growth. *Scientia Horticulturae* 105(1): 29–44.
- Tessema, L; Mohammed, W; Abebe, T. 2020. Evaluation of potato (*Solanum tuberosum* L.) varieties for yield and some agronomic traits. *Open Agriculture* 5(1): 63–74.
- Tiong, J; McDonald, GK; Genc, Y; Pedas, P; Hayes, JE; Toubia, J; Langridge, P; Huang, CY. 2014. HvZIP7 mediates zinc accumulation in barley (*Hordeum vulgare* L.) at moderately high zinc supply. *New Phytologist* 201: 131–143.
- Umair Hassan, M; Aamer, M; Umer Chattha, M; Haiying, T; Shahzad, B; Barbanti, L; Nawaz, M; Rasheed, A; Afzal, A; Liu, Y; Guoqin, H. 2020. The critical role of zinc in plants facing the drought stress. *Agriculture* 10(9):396.
- UNICEF. 2006. *Un buen inicio de la vida*.

- van Lierop, W; Tran, TS; Banville, G; Morissette, S. 1982. Effect of liming on potato yields as related to soil pH, Al, Mn, and Ca. *Agronomy Journal* 74(6):1050–1055.
- Vassilev, A; Nikolova, A; Koleva, L; Lidon, F. 2011. Effects of excess Zn on growth and photosynthetic performance of young bean plants. *Journal of Phytology* 3: 58–62.
- Vega, FA; Covelo, EF; Vázquez, JJ; Andrade, L. 2007. Influence of mineral and organic components on copper, lead, and zinc sorption by acid soils. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 42(14): 2167–2173.
- Velu, G; Ortiz-Monasterio, I; Cakmak, I; Hao, Y; Singh, RP. 2014. Biofortification strategies to increase grain zinc and iron concentrations in wheat. *Journal of Cereal Science* 59(3): 365-372.
- Vergara Carmona, VM; Cecílio Filho, AB; de Almeida, HJ; Lupino Gratão, P. 2019. Fortification and bioavailability of zinc in potato. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 99(7): 3525-3529.
- Wakeel, A; Farooq, M; Bashir, K; Oztürk, L. 2018. Micronutrient malnutrition and biofortification: recent advances and future perspectives. In M.A. Hossain, T. Kamiya, D.J. Burritt, L.S.P Tran, T Fujiwara (Eds.), *Plant micronutrient use efficiency: molecular and genomic perspectives in crop plants* (pp. 225-243). Elsevier.
- Wang, C; Zhang, SH; Wang, PF; Hou, J; Zhang, WJ; Li, W; Lin, ZP. 2009. The effect of excess Zn on mineral nutrition and antioxidative response in rapeseed seedlings. *Chemosphere* 75(11): 1468–1476.
- Wang, H; Jin, J. 2007. Effects of zinc deficiency and drought on plant growth and metabolism of reactive oxygen species in maize (*Zea mays* L). *Agricultural Sciences in China* 6(8): 988–995.
- Welch, RM. 2002. Breeding strategies for biofortified staple plant foods to reduce micronutrient malnutrition globally. *The Journal of Nutrition* 132: 495S–499S.
- White, PJ. 2012. Long-distance transport in the xylem and phloem. In P. Marschner (Ed). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.) (pp. 49-70). Academic Press.

- White, PJ; Bradshaw, JE; Finlay, M; Dale, B; Ramsay, G; Hammond, JP; Broadley, MR. 2009. Relationships between yield and mineral concentrations in potato tubers. *HortScience* 44(1): 6–11.
- White, PJ; Broadley, MR. 2005. Biofortifying crops with essential mineral elements. *Trends in Plant Science* 10(12): 586-593.
- White, PJ; Broadley, MR. 2009. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets - iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytologist* 182(1): 49-84.
- White, PJ; Broadley, MR. 2011. Physiological limits to zinc biofortification of edible crops. *Frontiers in Plant Science* 2: 80.
- White, PJ; Broadley, MR; Hammond, JP; Ramsay, G; Subramanian, NK; Thompson, J; Wright, G. 2012. Biofortification of potato tubers using foliar zinc-fertilizers. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 87: 123–129.
- White, PJ; Hammond, JP. 2008. Phosphorus nutrition of terrestrial plants. In P.J. White, J.P. Hammond (Eds), *The ecophysiology of plant-phosphorus interactions* (pp. 51–81). Springer.
- White, PJ; Thompson, JA; Wright, G; Rasmussen, SK. 2017. Biofortifying Scottish potatoes with zinc. *Plant and Soil* 411: 151–165.
- White, PJ; Whiting, SN; Baker, AJM; Broadley, MR. 2002. Does zinc move apoplastically to the xylem in roots of *Thlaspi caerulescens*? *New Phytologist* 153: 201–207.
- WHO. 2007. Protein and amino acid requirements in human nutrition: Report of a joint FAO/WHO/UNU expert consultation, World Health Organization, technical report series, no. 935.
- Wijesinha-Bettoni, R; Mouillé, B. 2019. The contribution of potatoes to global food security, nutrition and healthy diets. *American Journal of Potato Research* 96(2): 139–149.
- Wissuwa, M; Ismail, AM; Graham, RD. 2007. Rice grain zinc concentrations as affected by genotype, native soil-zinc availability, and zinc fertilization. *Plant and Soil* 306(1-2): 37–48.

- Woolfe, JA. 1987. The nutritional value of the components of the tuber. In *The potato in the human diet* (pp. 19-57). Cambridge University Press.
- World Food Programme (WFO). 2020a. *Global report on food crises 2020*. United Nations.
- World Food Programme (WFO). 2020b. *Remote assessment COVID-19: Latin American and the Caribbean*.
- Wszelaki, AL; Delwiche, JF; Walker, SD; Liggett, RE; Scheerens, JC; Kleinhenz, MD. 2005. Sensory quality and mineral and glycoalkaloid concentrations in organically and conventionally grown redskin potatoes (*Solanum tuberosum* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 85(5): 720–726.
- Xiang, HF; Tang, HA; Ying, QH. 1995. Transformation and distribution of forms of zinc in acid, neutral and calcareous soils of China. *Geoderma* 66(1-2): 121–135.
- Yadav, DN; Bansal, S; Tushir, S; Kaur, J; Sharma, K. 2020. Advantage of biofortification over fortification technologies. In O.P. Gupta, V. Pandey, S. Narwal, P. Sharma, S. Ram, G.P. Singh (Eds), *Wheat and Barley Grain Biofortification* (pp. 257–273). Elsevier.
- Yang, S; Zhou, D; Yu, H; Wei, R; Pan, B. 2013. Distribution and speciation of metals (Cu, Zn, Cd, and Pb) in agricultural and non-agricultural soils near a stream upriver from the Pearl River, China. *Environmental Pollution* 177: 64–70.
- Yang, XW; Tian, XH; Gale, WJ; Cao, YX; Lu, XC; Zhao, AQ. 2011. Effect of soil and foliar zinc application on zinc concentration and bioavailability in wheat grain grown on potentially zinc-deficient soil. *Cereal Research Communications* 39(4): 535–543.
- Yilmaz, A; Ekiz, H; Torun, B; Gultekin, I; Karanlik, S; Bagci, SA; Cakmak, I. 1997. Effect of different zinc application methods on grain yield and zinc concentration in wheat cultivars grown on zinc-deficient calcareous soils. *Journal of Plant Nutrition* 20(4-5): 461-471.
- Zasoski, RJ; Bureau, RG. 1977. A rapid nitric-perchloric acid digestion method for multi-element tissue analysis. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 8: 425-436.

- Zhao, A; Tian, X; Cao, Y; Lu, X; 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.
- Zhao, FJ; Shewry, PR. 2011. Recent developments in modifying crops and agronomic practice to improve human health. *Food Policy* 36:S94–S101.
- Zhao, K; Selim, HM. 2010. Adsorption-desorption kinetics of Zn in soils. *Soil Science* 175(4): 145–153.
- Zhu, C; Naqvi, S; Gomez-Galera, S; Pelacho, AM; Capell, T; Christou, P. 2007. Transgenic strategies for the nutritional enhancement of plants. *Trends in Plant Science* 12(12):548-555.
- Zulfiqar, U; Hussain, S; Ishfaq, M; Matloob, A; Ali, N; Ahmad, M; Alyemeni, MN; Ahmad, P. 2020. Zinc-induced effects on productivity, zinc use efficiency, and grain biofortification of bread wheat under different tillage permutations. *Agronomy* 10(10):1566.
- Zou, C; Du, Y; Rashid, A; Ram, H; Savasli, E; Pieterse, PJ; Ortiz-Monasterio, I; Yazici, A; Kaur, C; Mahmood, K; Singh, S; Le Roux, MR; Kuang, W; Onder, O; Kalayci, M; 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: 8096–8106.
- Zou, CQ; Zhang, YQ; Rashid, A; Ram, H; Savasli, E; Arisoy, RZ; Ortiz-Monasterio, I; Simunji, S; Wang, ZH; Sohu, V; Hassan, M; Kaya, Y; Onder, O; Lungu, O; Yaqub Mujahid, M; Joshi, AK; Zelenskiy, Y; Zhang, FS; Cakmak, I. 2012. Biofortification of wheat with zinc through zinc fertilization in seven countries. *Plant and Soil* 361(1-2): 119–130.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Cuadro ANVA de rendimiento total.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Fcalculado	Ftabular	
Variedad	3	409.088185	136.3627283	15.87741905	3.86	*
Bloque	3	41.881545	13.960515	1.6254951		
Error A	9	77.296225	8.588469444			
Dosis	4	27.51503	6.8787575	2.545799632	2.57	n.s.
Variedad:Dosis	12	41.97744	3.49812	1.294639709	1.96	n.s.
Error B	48	129.69613	2.702002708			
Total	79	727.454555				

CV(A)= 18.37 %, CV(B)= 10.30 %, Promedio= 15.96

Anexo 2: Supuestos previos para el análisis de varianza del rendimiento total.

- **Prueba de normalidad de errores (Shapiro-Wilk):**
P-value = 0.7706
- **Prueba de homogeneidad de varianzas en parcelas grandes – variedades de papa (prueba de Bartlett):**
P-value = 0.1006

Anexo 3: Cuadro de efectos simples de dosis en variedades (Niveles de B en A) para la rendimientto total.

Fuentes de Variabilidad	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Fcalculado	Ftabular	
Dosis en Variedad Canchan	4	21.41197	5.3529925	1.981120331	2.57	n.s.
Dosis en Variedad Perricholi	4	12.50085	3.1252125	1.156628189	2.57	n.s.
Dosis en Variedad Peruanita	4	11.49728	2.87432	1.063773915	2.57	n.s.
Dosis en Variedad Yungay	4	24.08237	6.0205925	2.228196323	2.57	n.s.
Error B	48	129.69613	2.702002708			

Anexo 4: Cuadro ANVA de rendimiento comercial.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Fcalculado	Ftabular	
Variedad	3	318.14745	106.04915	50.89107958	3.86	*
Bloque	3	10.15592	3.385306667	1.624547778		
Error A	9	18.75461	2.083845556			
Dosis	4	3.2082875	0.802071875	0.635502971	2.57	n.s.
Variedad:Dosis	12	13.4501625	1.120846875	0.888076919	1.96	n.s.
Error B	48	60.58107	1.262105625			
Total	79	424.2975				

CV(A)= 11.68 %, CV(B)= 9.09 %, Promedio= 12.36

Anexo 5: Supuestos previos para el análisis de varianza del rendimiento comercial.

- **Prueba de normalidad de errores (Shapiro-Wilk):**
P-value = 0.8931
- **Prueba de homogeneidad de varianzas en parcelas grandes - variedades de papa (prueba de Bartlett):**
P-value = 0.4527

Anexo 6: Cuadro de efectos simples de dosis en variedades (Niveles de B en A) para la rendimientto comercial.

Fuentes de Variabilidad	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Fcalculado	Ftabular	
Dosis en Variedad Canchan	4	0.83387	0.2084675	0.165174369	2.57	n.s.
Dosis en Variedad Perricholi	4	6.40873	1.6021825	1.269451992	2.57	n.s.
Dosis en Variedad Peruanita	4	4.76577	1.1914425	0.944011719	2.57	n.s.
Dosis en Variedad Yungay	4	4.65008	1.16252	0.921095649	2.57	n.s.
Error B	48	60.58107	1.262105625			

Anexo 7: Cuadro ANVA de concentración de zinc en planta.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Fcalculado	Ftabular	
Variedad	3	5359.318474	1786.439491	43.79996976	3.86	*
Bloque	3	71.77296375	23.92432125			
Error A	9	367.0768612	40.78631792			
Dosis	4	21012.52846	5253.132116	236.0819103	2.57	*
Variedad:Dosis	12	2366.854707	197.2378923	8.864101905	1.96	*
Error B	48	1068.06295	22.25131146			
Total	79	30245.61442				

CV(A) = 12.01 %, CV(B) = 8.9 %, promedio = 53.14

Anexo 8: Supuestos previos para el análisis de varianza de la concentración foliar de zinc.

- **Prueba de normalidad de errores (Shapiro-Wilk):**
P-value = 0.7439
- **Prueba de homogeneidad de varianzas en la interacción (prueba de Bartlett):**
P-value = 0.773

Anexo 9: Cuadro de efectos simples de dosis en variedades (Niveles de B en A) para la concentración de Zn en planta.

Fuentes de Variabilidad	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Fcalculado	Ftabular	
Dosis en Variedad Canchan	4	3122.80113	780.7002825	35.08558513	2.57	*
Dosis en Variedad Perricholi	4	8905.18105	2226.295263	100.0523168	2.57	*
Dosis en Variedad Peruanita	4	9322.44622	2330.611555	104.7404131	2.57	*
Dosis en Variedad Yungay	4	2028.95477	507.2386925	22.79590097	2.57	*
Error B	48	1068.06295	22.25131146			

Anexo 10: Cuadro ANVA de la materia seca aérea.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Fcalculado	Ftabular	
Variedad	3	1743.150594	581.050198	4.349205262	3.86	*
Bloque	3	782.2897115	260.7632372	1.951832815		
Error A	9	1202.392498	133.5991665			
Dosis	4	49.85753965	12.46438491	0.147989676	2.57	n.s.
Variedad:Dosis	12	537.8727316	44.82272763	0.532180366	1.96	n.s.
Error B	48	4042.785233	84.22469236			
Total	79	8358.348308				

CV(A) = 19.68 %, CV(B) = 15.63 %, promedio = 58.73

Anexo 11: Supuestos previos para el análisis de varianza de la materia seca aérea.

- **Prueba de normalidad de errores (Shapiro-Wilk):**
P-value = 0.9864
- **Prueba de homogeneidad de varianzas en parcelas grandes - variedades de papa (prueba de Bartlett):**
P-value = 0.08332

Anexo 12: Cuadro de efectos simples de dosis en variedades (Niveles de B en A) para la materia seca aérea.

Fuentes de Variabilidad	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Fcalculado	Ftabular	
Dosis en Variedad Canchan	4	258.4503056	64.61257641	0.767145294	2.57	n.s.
Dosis en Variedad Perricholi	4	119.9556231	29.98890578	0.356058359	2.57	n.s.
Dosis en Variedad Peruanita	4	113.9446275	28.48615688	0.338216218	2.57	n.s.
Dosis en Variedad Yungay	4	95.37971493	23.84492873	0.283110903	2.57	n.s.
Error B	48	4042.785233	84.22469236			

Anexo 13: Cuadro ANVA de concentración de zinc en la cáscara de tubérculo.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Fcalculado	Ftabular	
Variedad	3	308.002375	102.6674583	6.160617357	3.86	*
Bloque	3	39.494375	13.16479167			
Error A	9	149.986125	16.665125			
Dosis	4	1142.17325	285.5433125	96.26272282	2.57	*
Variedad:Dosis	12	644.78075	53.73172917	18.11410852	1.96	*
Error B	48	142.382	2.966291667			
Total	79	2426.818875				

CV(A) = 20.06 %, CV(B) = 8.46 %, promedio = 20.35

Anexo 14: Supuestos previos para el análisis de varianza de la concentración de zinc en la cáscara de tubérculo.

- **Prueba de normalidad de errores (Shapiro-Wilk):**
P-value = 0.07254
- **Prueba de homogeneidad de varianzas en la interacción (prueba de Bartlett):**
P-value = 0.2001

Anexo 15: Cuadro de efectos simples de dosis en variedades (Niveles de B en A) para la concentración de zinc en cáscara de tubérculo.

Fuentes de Variabilidad	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Fcalculado	Ftabular	
Dosis en Variedad Canchan	4	1306.007	326.50175	110.0706831	2.57	*
Dosis en Variedad Perricholi	4	235.965	58.99125	19.88720484	2.57	*
Dosis en Variedad Peruanita	4	53.197	13.29925	4.483459988	2.57	*
Dosis en Variedad Yungay	4	191.785	47.94625	16.16370047	2.57	*
Error B	48	142.382	2.966291667			

Anexo 16: Cuadro ANVA de concentración de zinc en pulpa de tubérculo.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Fcalculado	Ftabular	
Variedad	3	189.578	63.19266667	62.78110167	3.86	*
Bloque	3	3.157	1.052333333			
Error A	9	9.059	1.006555556			
Dosis	4	149.8455	37.461375	54.49092397	2.57	*
Variedad:Dosis	12	92.3795	7.698291667	11.19785448	1.96	*
Error B	48	32.999	0.687479167			
Total	79	477.018				

CV(A) = 7.84 %, CV(B) = 6.48 %, promedio = 12.81

Anexo 17: Supuestos previos para el análisis de varianza de la concentración de zinc en pulpa de tubérculo.

- **Prueba de normalidad de errores (Shapiro-Wilk):**
P-value = 0.3035
- **Prueba de homogeneidad de varianzas en la interacción (prueba de Bartlett):**
P-value = 0.07934

Anexo 18: Cuadro de efectos simples de dosis en variedades (Niveles de B en A) para la concentración de zinc en pulpa de tubérculo.

Fuentes de Variabilidad	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Fcalculado	Ftabular	
Dosis en Variedad Canchan	4	41.293	10.32325	15.0160914	2.57	*
Dosis en Variedad Perricholi	4	172.787	43.19675	62.83354041	2.57	*
Dosis en Variedad Peruanita	4	19.448	4.862	7.07221431	2.57	*
Dosis en Variedad Yungay	4	8.697	2.17425	3.162641292	2.57	*
Error B	48	32.999	0.687479167			

Anexo 19: Cuadro ANVA de extracción de zinc en la materia seca aérea (g ha⁻¹) por unidad experimental.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Fcalculado	Ftabular	
Variedad	3	14562.61297	4854.204323	9.717928891	3.86	*
Bloque	3	946.22741	315.4091367	0.631436865		
Error A	9	4495.59154	499.5101711			
Dosis	4	45552.03718	11388.0093	58.60060888	2.57	*
Variedad:Dosis	12	9364.223918	780.3519931	4.01554835	1.96	*
Error B	48	9327.9653	194.3326104			
Total	79	84248.65832				

CV(A) = 28.6 %, CV(B) = 17.80 %, promedio = 78.159

Anexo 20: Supuestos previos para el análisis de varianza de la extracción de zinc en la materia seca aérea (g ha^{-1}) por unidad experimental.

- **Prueba de normalidad de errores (Shapiro-Wilk):**
P-value = 0.7323
- **Prueba de homogeneidad de varianzas en la interacción (prueba de Bartlett):**
P-value = 0.08326

Anexo 21: Cuadro de efectos simples de dosis en variedades (Niveles de B en A) para la extracción de zinc en la materia seca aérea (g ha⁻¹) por unidad experimental.

Fuentes de Variabilidad	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Fcalculado	Ftabular	
Dosis en Variedad Canchan	4	5473.47187	1368.367968	7.041370795	2.57	*
Dosis en Variedad Perricholi	4	22962.33447	5740.583618	29.53999128	2.57	*
Dosis en Variedad Peruanita	4	22633.13293	5658.283233	29.11648858	2.57	*
Dosis en Variedad Yungay	4	3847.32183	961.8304575	4.94940327	2.57	*
Error B	48	9327.9653	194.3326104			

Anexo 22: Cuadro ANVA de extracción de zinc en tubérculos de papa (g ha⁻¹) por unidad experimental.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Fcalculado	Ftabular	
Variedad	3	1676.05389	558.68463	4.151852706	3.86	*
Bloque	3	758.87897	252.9596567	1.8798642		
Error A	9	1211.06456	134.5627289			
Dosis	4	4043.349605	1010.837401	18.40065428	2.57	*
Variedad:Dosis	12	2148.302785	179.0252321	3.258863788	1.96	*
Error B	48	2636.87337	54.93486188			
Total	79	12474.52318				

CV(A) = 22.84 %, CV(B) = 14.60 %, promedio = 50.77

Anexo 23: Supuestos previos para el análisis de varianza de la extracción de zinc en tubérculos de papa (g ha⁻¹) por unidad experimental.

- **Prueba de normalidad de errores (Shapiro-Wilk):**
P-value = 0.5263
- **Prueba de homogeneidad de varianzas en la interacción (prueba de Bartlett):**
P-value = 0.1238

Anexo 24: Cuadro de efectos simples de dosis en variedades (Niveles de B en A) para la extracción de zinc en tubérculos de papa (g ha^{-1}) por unidad experimental.

Fuentes de Variabilidad	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Fcalculado	Ftabular	
Dosis en Variedad Canchan	4	2907.51765	726.8794125	13.23165996	2.57	*
Dosis en Variedad Perricholi	4	2480.69053	620.1726325	11.28923622	2.57	*
Dosis en Variedad Peruanita	4	494.78053	123.6951325	2.251669127	2.57	n.s.
Dosis en Variedad Yungay	4	308.66368	77.16592	1.404680332	2.57	n.s.
Error B	48	2636.87337	54.93486188			

Anexo 25: Cuadro ANVA de cantidad de Zn aportado (g) por 100 g de tubérculo seco por unidad experimental.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Fcalculado	Ftabular	
Variedad	3	1.41522375	0.47174125	32.22979551	3.86	*
Bloque	3	0.05715375	0.01905125			
Error A	9	0.13173125	0.014636806			
Dosis	4	2.506955	0.62673875	92.42514363	2.57	*
Variedad:Dosis	12	0.925995	0.07716625	11.37970445	1.96	*
Error B	48	0.32549	0.006781042			
Total	79	5.36254875				

CV(A) = 8.57 %, CV(B) = 5.83 %, promedio = 1.413

Anexo 26: Supuestos previos para el análisis de varianza de la cantidad de Zn aportado (g) por 100 g de tubérculo seco por unidad experimental.

- **Prueba de normalidad de errores (Shapiro-Wilk):**
P-value = 0.5467
- **Prueba de homogeneidad de varianzas en la interacción (prueba de Bartlett):**
P-value = 0.4555

Anexo 27: Cuadro de efectos simples de dosis en variedades (Niveles de B en A) para la cantidad de Zn aportado (g) por 100 g de tubérculo seco por unidad experimental.

Fuentes de Variabilidad	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Fcalculado	Ftabular	
Dosis en Variedad Canchan	4	1.28873	0.3221825	47.51224308	2.57	**
Dosis en Variedad Perricholi	4	1.74385	0.4359625	64.29137608	2.57	**
Dosis en Variedad Peruanita	4	0.1683	0.042075	6.204798919	2.57	*
Dosis en Variedad Yungay	4	0.23207	0.0580175	8.555838889	2.57	*
Error B	48	0.32549	0.006781042			

Anexo 28: Porcentaje de materia seca de tubérculos de las variedades Canchan y Perricholi.

Bloque	Dosis	Variedad	% Materia seca		% M.S.	Variedad	% Materia seca		% M.S.
			Cáscara	Pulpa			Cáscara	Pulpa	
I	0	Canchan	15.24	84.76	25.58	Perricholi	16.58	83.42	19.59
I	4	Canchan	20.09	79.91	24.69	Perricholi	15.40	84.60	18.42
I	8	Canchan	14.95	85.05	24.38	Perricholi	15.61	84.39	19.03
I	16	Canchan	16.19	83.81	24.69	Perricholi	13.23	86.77	19.49
I	32	Canchan	18.21	81.79	24.32	Perricholi	13.82	86.18	20.62
II	0	Canchan	15.01	84.99	24.54	Perricholi	14.65	85.35	21.55
II	4	Canchan	18.06	81.94	23.04	Perricholi	17.25	82.75	20.06
II	8	Canchan	17.71	82.29	24.55	Perricholi	18.13	81.87	23.73
II	16	Canchan	17.57	82.43	24.69	Perricholi	13.54	86.46	20.03
II	32	Canchan	15.32	84.68	24.00	Perricholi	16.53	83.47	20.01
III	0	Canchan	17.53	82.47	24.66	Perricholi	16.43	83.57	22.82
III	4	Canchan	17.79	82.21	23.04	Perricholi	15.35	84.65	20.69
III	8	Canchan	25.12	74.88	23.63	Perricholi	16.12	83.88	22.22
III	16	Canchan	17.48	82.52	22.94	Perricholi	21.03	78.97	18.46
III	32	Canchan	15.57	84.83	24.99	Perricholi	17.64	82.36	20.12
IV	0	Canchan	25.65	74.35	24.32	Perricholi	17.23	82.77	17.40
IV	4	Canchan	14.28	85.72	24.46	Perricholi	16.88	83.12	19.50
IV	8	Canchan	15.58	84.42	24.61	Perricholi	16.16	83.84	22.10
IV	16	Canchan	18.21	81.79	23.52	Perricholi	15.41	84.59	19.22
IV	32	Canchan	18.38	81.62	24.50	Perricholi	17.80	82.20	22.97

Anexo 29: Porcentaje de materia seca de tubérculos de las variedades Peruanita y Yungay.

Bloque	Dosis	Variedad	% Materia seca		% M.S.	Variedad	% Materia seca		% M.S.
			Cáscara	Pulpa			Cáscara	Pulpa	
I	0	Peruanita	21.58	78.42	27.74	Yungay	17.75	82.25	19.05
I	4	Peruanita	21.86	78.14	27.91	Yungay	18.65	81.35	19.69
I	8	Peruanita	18.57	81.43	27.17	Yungay	16.86	83.14	19.38
I	16	Peruanita	20.95	79.05	26.38	Yungay	12.76	87.24	20.62
I	32	Peruanita	17.03	82.97	27.58	Yungay	17.22	82.78	20.1
II	0	Peruanita	16.20	83.80	28.25	Yungay	21.32	78.68	19.42
II	4	Peruanita	26.53	73.47	23.52	Yungay	16.15	83.85	19.39
II	8	Peruanita	22.05	77.95	26.45	Yungay	17.61	82.39	20.62
II	16	Peruanita	19.35	80.65	29.03	Yungay	15.91	84.09	22
II	32	Peruanita	19.72	80.28	27.55	Yungay	16.70	83.30	20.81
III	0	Peruanita	15.86	84.14	28.23	Yungay	14.68	85.32	21.27
III	4	Peruanita	19.40	80.60	26.52	Yungay	19.09	80.91	20.43
III	8	Peruanita	19.22	80.78	26.15	Yungay	16.09	83.91	20.26
III	16	Peruanita	19.29	80.71	26.52	Yungay	22.41	77.59	17.58
III	32	Peruanita	22.83	77.17	26.76	Yungay	16.71	83.29	18.26
IV	0	Peruanita	20.06	79.94	24.43	Yungay	16.28	83.72	20.59
IV	4	Peruanita	18.93	81.07	27.30	Yungay	15.54	84.46	20.43
IV	8	Peruanita	18.67	81.33	29.12	Yungay	16.08	83.92	20.01
IV	16	Peruanita	21.67	78.33	27.27	Yungay	23.50	76.50	19
IV	32	Peruanita	22.08	77.92	26.26	Yungay	14.68	85.32	20.87

Anexo 30: Composición de Zinc en algunos alimentos (Reyes *et al.* 2017).

Nombre de alimento	Composición en 100 g de alimento	
	Zinc (mg)	Agua (g)
Almendra	3.12	5.1
Anchoveta	1.72	70.8
Arveja seca sin cáscara	3.01	11.5
Cebada con cáscara	2.78	9.7
Frejol amarillo común	2.83	12.6
Frejol caballero	3.67	12.5
Frejol castilla	3.96	13.3
Frejol tarhui seco	4.75	46.3
Hígado de carnero	4.66	72.1
Hígado de cerdo	5.76	73.7
Hígado de res	4.00	70.8
Hojuela de Cañihua	4.55	11.4
Kiwicha	2.68	9.2
Lentejas chicas	4.78	13.0
Menudencias de pollo	3.01	69.8
Nuez de Brasil	4.06	3.9
Palta	0.64	79.2
Papa blanca	0.29	74.5
Pulpo	1.68	81.6
Quinoa blanca	3.51	12.8
Semilla de ajonjolí	7.75	4.7
Trigo	2.98	11.6
Yema de huevo de gallina	2.30	50.1

Anexo 31: Descripción de la calicata.

Localidad: Quilcas, Huancayo		Paisaje: Ladera de colina		Relieve: Moderadamente empinado	Pendiente (%): 8 – 15 (pendiente corta)		Altitud (m.s.n.m.): 3590
Material parental: Residual		Vegetación: Césped de puna		Rg. Hd: Ústico		Rg. Temp.: Mésico	
Permeabilidad: Moderada	Drenaje: Moderado	Napa freática: -		Pedre. Superf.: 0	Erosión: Ligera	Epipedón: Ótrico	Hz. Subs. Cámbico
Soil taxonomy: Oxic Dystrustepts							
Profundidad (cm)		0-26	26-65	65 - +			
Horizonte		Ap	Bw	C			
Color (Munsell)	Hum.	10 YR 3/6	10 YR 5/8	10 YR 5/8			
Moteado (color y %)		-	-	-			
Granulometría (% Arena- %Limo-% Arcilla)		34-31-35	24-30-46	20-25-55			
Clase textural		Fr. Arcilloso	Arcilloso	Arcilloso			
Fragmentos gruesos (Tipo y %)		-	-	-			
Estructura		Grm – 1	Bsg - 1	Masivo			
Consistencia		fm	fm	mfm			
Raíces		2 - f	1 - f	-			
Límite		C	G	-			
Otras características							
pH		4.06	4.86	5.15			
Carbonatos (%)		0	0	0			
C.E. (dS/m)		0.6	0.08	0.05			
PSI (%)		2.81	2.63	2.19			
Materia orgánica (%)		2.16	0.96	0.41			
Carbono orgánico (%)		1.25	0.56	0.24			
P (mg kg ⁻¹ suelo)		5.1	4.3	1.8			
K (mg kg ⁻¹ suelo)		326	236	89			
C.I.C. (cmol(+) kg ⁻¹ suelo)	SC	4.98	5.32	5.93			
	Ace	9.28	10.08	9.60			
Cationes cambiables (cmol(+) kg ⁻¹ suelo)	Ca	1.87	3.02	3.94			
	Mg	0.8	1.02	1.3			
	K	0.97	0.64	0.31			
	Na	0.14	0.14	0.13			
	Al	1.20	0.50	0.25			
Saturación de bases (%)	Ace	41	48	59			
	SC	76	91	96			
Saturación acidez (%)	Ace	13	5	3			
	SC	24	9	4			