

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN SUELOS**



**“BIOFORTIFICACIÓN AGRONÓMICA DEL CULTIVO DE PAPA  
MEDIANTE APLICACIÓN FOLIAR Y EDÁFICA DE ZINC Y SU  
INTERACCIÓN CON CADMIO”**

**Presentada por:**

**PEDRO PABLO GUTIERREZ VILCHEZ**

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

**Lima - Perú**

**2018**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA  
ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN SUELOS**

**“BIOFORTIFICACIÓN AGRONÓMICA DEL CULTIVO DE PAPA  
MEDIANTE APLICACIÓN FOLIAR Y EDÁFICA DE ZINC Y SU  
INTERACCIÓN CON CADMIO”**

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

**Presentada por:**

**PEDRO PABLO GUTIERREZ VILCHEZ**

**Sustentada y aprobada ante el siguiente  
jurado:**

Mg. Sc. Gilberto Rodríguez Soto  
**PRESIDENTE**

Mg. Sc Ruby Vega Ravello  
**PATROCINADORA**

Mg. Sc. Rolando Egúsquiza Bayona  
**CO-PATROCINADOR**

Dr. Oscar Loli Figueroa  
**MIEMBRO**

Ph.D. Sady García Bendezú  
**MIEMBRO**

## **DEDICATORIA**

A mi papá, Pedro Gutiérrez, por seguir apoyándome en cada nuevo reto que adquiero, por seguir cuidando incansablemente de mí.

A mi hermana, Sandra, por estar conmigo y apoyarme siempre, en los buenos y malos momentos de la vida.

A mi mamá, María Vilchez, por ser mi ejemplo a seguir. A pesar de la distancia, siempre estarás a mi lado.

A mi abuelo, Filemón Vilchez, por sus sabios consejos para ser mejor persona.

A mi sobrino Mateo, para dejarle un lugar mejor donde vivir.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Ing. Mg. Sc. Ruby Vega Ravello por ser la patrocinadora y realizar una gran colaboración en la planificación, ejecución y revisión del presente trabajo.

Al Ing. Mg. Sc. Rolando Egúsqüiza Bayona, copatrocinador, por sus sugerencias para lograr una mejor investigación en el cultivo de papa.

Al Dr. Oscar Loli Figueroa y al Ph.D Sady García Bendezú por sus aportes para la corrección de la tesis.

Al Ing. Mg. Sc. Gilberto Rodríguez Soto por sus sugerencias y comentarios en la revisión de la tesis.

A mis amigos: Carlos Mestanza por su colaboración en los trabajos de campo y a Flavio Lozano por la realización de los gráficos.

A los profesores del Departamento de Suelos, Ing. Mg. Sc. Julio Nazario Ríos, Ing. Mg. Sc. Luis Tomassini Vidal, Dr. Guillermo Aguirre Yato, Ing. Mg. Sc. Braulio La Torre Martínez, por sus consejos en esta etapa profesional y estudiantil desarrollada en la UNALM.

Al Ph.D. Peter Kromann por su valioso aporte en la financiación de los análisis químicos.

A la Sra. Jesús Gutiérrez, secretaria del Dpto. de Suelos, por el apoyo brindado.

A los muchos alumnos de pregrado que me apoyaron en los trabajos de campo y laboratorio.

## **INDICE GENERAL**

<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>3</b>
2.1 Situación actual.....	3
2.2 Importancia del zinc en humanos .....	3
2.3 Zinc en el suelo .....	5
2.4 Zinc en la planta.....	8
2.5 Biofortificación agronómica .....	9
2.6 Recomendaciones de fertilización con zinc.....	10
2.7 Cadmio.....	12
2.8 Zinc en la reducción de la acumulación de cadmio .....	13
2.9 Cultivo de papa .....	14
2.10 Biofortificación agronómica de la papa.....	17
<b>III. MATERIALES Y METODOS .....</b>	<b>19</b>
3.1 Características del sitio experimental .....	19
3.1.1 Ubicación .....	19
3.1.2 Clima .....	19
3.1.3 Suelo.....	20
3.1.4 Agua .....	22
3.2 Materiales.....	23
3.2.1 Semilla.....	23
3.2.2 Fertilizantes .....	23
3.3 Tratamientos .....	24
3.4 Diseño experimental .....	24
3.4.1 Modelamiento.....	24
3.4.2 Análisis estadístico.....	25
3.5 Distribución de parcelas experimentales .....	25
3.6 Variables analizadas .....	26
3.6.1 Variables biométricas .....	26
3.7 Procedimientos.....	26
3.7.1 Instalación del experimento .....	26
3.7.2 Metodología de evaluaciones de las variables biométricas.....	27
3.7.3 Metodología de evaluación de las características químicas .....	28
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>30</b>
4.1 Variables biométricas .....	30

4.1.1 Biomasa.....	30
4.1.2 Rendimiento .....	33
4.2 Concentración de zinc en planta .....	35
4.3 Concentración de cadmio en la planta .....	40
<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>45</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>46</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>47</b>
<b>VIII. ANEXOS .....</b>	<b>56</b>

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Translocación de Cd afectado por fertilizantes de P y Zn.....	13
Tabla 2: Sensibilidad relativa de los cultivos a la deficiencia de zinc .....	17
Tabla 3: Concentración promedio de zinc ( $\text{mg Zn kg}^{-1}$ peso seco) en la pulpa y cáscara de tubérculos de papa cultivar INIAP – Natividad bajo efecto de cinco dosis de fertilización foliar y 5 dosis de fertilización edáfica en dos experimentos en los Andes ecuatorianos del 2013 al 2014 .....	18
Tabla 4: Temperatura, radiación solar y humedad relativa durante la conducción del experimento. La Molina, 2017 .....	20
Tabla 5: Características fisicoquímicas del suelo en estudio .....	21
Tabla 6: Características químicas del agua en estudio .....	22
Tabla 7: Tratamientos en el experimento .....	24
Tabla 8: Respuesta de la aplicación edáfica y foliar de zinc a variables biométricas en el cultivo de papa.....	30
Tabla 9: Concentración de Zn en hojas y tubérculo (cáscara y pulpa).....	35
Tabla 10: Extracción total de Zn en el rendimiento de tubérculos.....	40
Tabla 11: Concentración de Cd en hojas y tubérculo (cáscara y pulpa).....	41

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Proporción de menores de cinco años de edad con desnutrición crónica en Perú (A) y proporción de menores de cinco años de edad con desnutrición crónica en el área rural (B). .....	4
Figura 2: Deficiencia de zinc: panorama mundial.....	5
Figura 3: Especies solubles de Zn en equilibrio con el Zn-suelo cuando $\text{Cl}^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{NO}_3^-$ están a $10^{-3}$ M y $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ está a $10^{-5}$ M .....	7
Figura 4: Adsorción de Zn por suelos calcáreos en Arizona.....	8
Figura 5: Concentración de zinc en granos de trigo duro bajo aplicaciones de $\text{ZnSO}_4$ al suelo y foliar (A) e incremento de niveles de fertilización al suelo con zinc (B). .....	11
Figura 6: Visualización de la difusión del Zn después de la aplicación de fertilizantes con Zn en un suelo de pH bajo (A), en un suelo de pH intermedio (B) y en un suelo de pH elevado (C).....	12
Figura 7: Producción de papa en el Perú 2015 .....	16
Figura 8: Ubicación del ensayo experimental .....	19
Figura 9: Croquis del experimento .....	25
Figura 10: Distribución de la materia fresca (MF) en la planta de papa por cada tratamiento evaluado.....	31
Figura 11: Distribución porcentual del peso total de la planta .....	32
Figura 12: Relación entre la materia fresca del follaje y la materia fresca del tubérculo ...	32
Figura 13: Rendimiento del cultivo de papa debido a los diferentes tratamientos.....	33
Figura 14: Respuesta de la fertilización foliar con Zn en el rendimiento del cultivo de papa. .....	34
Figura 15: Concentración de Zn en hojas, cáscara y pulpa en el cultivo de papa bajo fertilización foliar con Zn .....	37
Figura 16: Relación entre la concentración de Zn en el tubérculo y el peso del tubérculo .	38
Figura 17: Concentración de Zn ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en cáscara y pulpa bajo fertilización foliar y edáfica de Zn .....	39
Figura 18: Efecto de la fertilización edáfica y foliar de Zn en la concentración de Cd ( $\text{mg kg}^{-1}$ MS) en pulpa y cáscara del tubérculo de papa.....	43



## INDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable rendimiento .....	56
Anexo 2: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable materia fresca total.....	57
Anexo 3: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable materia seca total .....	58
Anexo 4: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable materia seca de tubérculos..	59
Anexo 5: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable materia seca de follaje .....	60
Anexo 6: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable Zn foliar .....	61
Anexo 7: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable Zn en cáscara .....	62
Anexo 8: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable Zn en pulpa .....	63
Anexo 9: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable Cd foliar .....	64
Anexo 10: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable Cd en cáscara .....	65
Anexo 11: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable Cd en pulpa.....	66
Anexo 12: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable extracción de Zn .....	67
Anexo 13: Registro fotográfico .....	68
Anexo 14: Cartilla de evaluación del perfil del suelo .....	76
Anexo 15: Cronograma de actividades.....	78
Anexo 16: Los cultivos, animales y personas necesitan 16 nutrientes .....	79
Anexo 17: Biofortificación con diferentes nutrientes en varios países .....	80
Anexo 18: Las deficiencias de micronutrientes afecta severamente a la población mundial.....	81
Anexo 19: Deficiencia de zinc a nivel mundial .....	82
Anexo 20: Beneficios de los nutrientes en las plantas y humanos .....	83
Anexo 21: Función de los minerales en las plantas y humanos .....	84
Anexo 22: Ingesta dietética recomendada (RDA) y límites superiores de ingesta (UL) para zinc por edad, género y tipo de dieta .....	85
Anexo 23: Dosis diarias de suplementos de zinc sugeridas por el IZiNCG .....	86
Anexo 24: Tabla de Composición de Alimentos- Tubérculos .....	87
Anexo 25: Diagrama esquemático del posible efecto por salinidad de cloruro en el mecanismo de absorción de Cd .....	89
Anexo 26: Concentración de Cd en algunas rocas fosfóricas.....	90
Anexo 27: Presentación esquemática de los principales factores del suelo y la planta que incrementan o disminuyen la disponibilidad y absorción por las plantas.....	91
Anexo 28: Resultado del análisis de suelo .....	92

## RESUMEN

### “BIOFORTIFICACIÓN AGRONÓMICA DEL CULTIVO DE PAPA MEDIANTE APLICACIÓN FOLIAR Y EDÁFICA DE ZINC Y SU INTERACCIÓN CON CADMIO”

El zinc es un micronutriente importante en la salud humana; sin embargo, su deficiencia en la población ha sido considerada como un factor limitante para el crecimiento normal de los niños, especialmente en países en desarrollo. La agricultura podría considerar como alternativa de solución a la biofortificación, dado que es la vía más accesible para incrementar la cantidad de zinc en los alimentos. La biofortificación es el proceso de incrementar los contenidos de micronutrientes en los cultivos sea mediante programas de fitomejoramiento (biofortificación genética) y/o agregando nutrientes vía fertilizantes (biofortificación agronómica). Además, se ha reportado que el zinc reduce la acumulación de cadmio en plantas, un metal tóxico que incrementa ciertas enfermedades en los humanos y puede acumularse en los tubérculos de papa que es el alimento más consumido en muchos lugares del mundo por ser parte de la dieta diaria como en el Perú. Durante la campaña 2017, se instaló el experimento para conocer la respuesta del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) a la fertilización con zinc en suelos moderadamente alcalinos ( $\text{pH}_{1:1} = 7.82$ ) de la costa peruana, con un nivel de  $\text{CaCO}_3$  de 3 %, P extractable de  $16.2 \text{ mg kg}^{-1}$  y Zn extractable de  $14.55 \text{ mg kg}^{-1}$ . Las parcelas fueron distribuidas en un diseño de bloques completamente al azar con cuatro repeticiones. Los tratamientos consideraron aplicaciones de zinc al follaje ( $5 \text{ kg Zn ha}^{-1}$ ) e incorporaciones de zinc al suelo (0, 20 y  $40 \text{ kg Zn ha}^{-1}$ ). La fertilización edáfica fue realizada a la siembra y las aplicaciones foliares se realizaron a los 40, 47, 54 y 61 DDS. Las variables en estudio fueron rendimiento y concentración de Zn en la hoja y en el tubérculo (cáscara y pulpa). Los resultados indican que el aporte creciente de Zn edáfico con y sin aplicación foliar no muestran diferencias significativas en la producción de papa. Por otro lado, la concentración de Zn en las hojas y en el tubérculo fueron mayores cuando el Zn se aplicó foliarmente. En los tratamientos con aplicación foliar, las concentraciones de Zn en la hoja, cáscara y pulpa fueron de 166.0, 49.3 y  $24.6 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente; mientras que en los tratamientos sin aplicación foliar se obtuvo 69.7, 41.4 y  $18.5 \text{ mg kg}^{-1}$ . Estadísticamente, no se apreció reducción en la concentración de Cd por la fertilización de Zn.

**Palabras clave:** biofortificación agronómica, zinc, cadmio, papa

# AGRONOMIC BIOFORTIFICATION OF POTATO THROUGH FOLIAR AND SOIL FERTILIZATION WITH ZINC AND ITS INTERACTION WITH CADMIUM

## ABSTRACT

Zinc is an important micronutrient in human health; however, its deficiency in the population has been considered as a limiting factor for the normal growth of children, especially in developing countries. Agriculture could be considered as an alternative solution to biofortification, because it is the most accessible way to increase the amount of zinc in food. Biofortification is the process of increasing micronutrient contents in crops either through breeding programs (genetic biofortification) and / or by adding nutrients using fertilizers (agronomic biofortification). In addition, zinc has been reported to reduce cadmium accumulation in plants, a toxic metal that increases certain diseases in humans and can accumulate in potato tubers which is the most consumed food in many places in the world for being part of the daily diet as in Peru. During the 2017, the experiment was installed to know the response of the potato crop (*Solanum tuberosum* L.) to the fertilization with zinc in moderately alkaline soils (pH  $_{1:1}$  = 7.82) of the Peruvian coast, with a level of CaCO<sub>3</sub> of 3%, extractable P of 16.2 mg kg<sup>-1</sup> and extractable Zn of 14.55 mg kg<sup>-1</sup>. The plots were distributed in a randomized complete block design (RCBD) with four repetitions. Research consider to study two factors: a) levels of soil fertilization and b) with and without foliar application, in total six treatments. Soil fertilization levels were 0, 20 and 40 kg Zn ha<sup>-1</sup> and the foliar dose was 5 kg Zn ha<sup>-1</sup> Soil Zn fertilization was applicate at planting and foliar fertilizations were applied at 40, 47, 54 and 61 days after planting. The yield and other biometric parameters, zinc and cadmium analysis in the leaf and tuber (flesh and skin), were evaluated. Soil Zn fertilization with and without foliar application does not show significant differences in potato production. However, Zn concentration in leaves and tuber were higher with foliar Zn fertilization. In the treatments with foliar application, the Zn concentrations in the leaf, skin and flesh were 166.0, 49.3 and 24.6 mg kg<sup>-1</sup>, respectively; while in the treatments without foliar application, 69.7, 41.4 and 18.5 mg kg<sup>-1</sup> were obtained. There were no significant differences in the reduction in the Cd concentration for Zn fertilization.

**Keywords: zinc, agronomic biofortification, potato, fertilization**

## I. INTRODUCCIÓN

En la última década, alrededor del 30 % de la población mundial es afectada por malnutrición. La malnutrición se define como una condición fisiológica anormal causada por un consumo insuficiente, desequilibrado o excesivo de los macronutrientes que aportan energía alimentaria (hidratos de carbono, proteínas y grasas) y los micronutrientes (vitaminas y minerales) que son esenciales para el crecimiento y el desarrollo físico y cognitivo (FAO 2013). La desnutrición crónica infantil es el estado en el cual niños y niñas tienen una longitud o talla menor a la esperada para su edad y sexo con relación a una población de referencia (INEI 2009). Los niños que la padecen, verán afectado su desarrollo intelectual, mermando sus capacidades para un mejor desarrollo humano.

El coste de la desnutrición y la deficiencia de micronutrientes se estima entre el 2 y el 3 por ciento del PIB mundial (lo que equivale a 1,4 - 2,1 billones de dólares por año) debido a su impacto en el desarrollo humano, la productividad y el crecimiento económico. La desnutrición es también una de las principales vías por las que la pobreza se perpetúa de generación en generación. El retraso en el crecimiento materno es un importante indicador para advertir que dará a luz a un niño con bajo peso, que a su vez tendrá un mayor riesgo de deterioro físico y cognitivo, y sufrirá las cargas económicas resultantes (FAO 2013).

En nuestro país, en el año 2009 hubo más del 50 % de los niños menores de 3 años que presentó problemas de anemia y alrededor del 18.3 % adoleció de desnutrición crónica y otras enfermedades (INEI 2009). Estas enfermedades están relacionadas a falta micronutrientes como minerales y vitaminas. Entre ellos se encuentran el hierro y el zinc. El zinc es un nutriente esencial tanto para las plantas como para los humanos. En los humanos cumple funciones básicas como participar en enzimas que regulan los procesos de desarrollo de células, crecimiento corporal y protección contra ciertas enfermedades pulmonares. Su ingesta es menor de la indicada por la Organización Mundial de la Salud (OMS), sobre todo en poblaciones rurales, de bajo acceso a suplementos fabricados como medicamentos. Es en estos lugares, donde incrementar el zinc en los alimentos que consumen, puede llevar a una reducción sustancial de la desnutrición crónica infantil y otras enfermedades relacionadas.

En el Perú, los alimentos más consumidos por la población son el arroz, el trigo, el maíz y la papa. El cultivo de la papa, es el segundo más cosechado en el Perú, además de su consumo desde tiempos ancestrales. Es un alimento que está presente en la dieta diaria de la población y muchas veces sustituye a alimentos como trigo o arroz. En la última década, los gobiernos de turno han promovido el consumo de papa para completar la cantidad necesaria de carbohidratos en la dieta. Asimismo, es importante indicar que la papa es base fundamental de la dieta diaria de pobladores con bajos ingresos económicos que no pueden acceder a alimentos hechos con trigo, puesto que este último es importado y su precio es poco accesible. Por lo tanto, mejorar la calidad nutricional de la papa puede mejorar la nutrición de los pobladores de nuestro país.

La biofortificación de cultivos puede aplicarse mediante prácticas de fitomejoramiento, que es la obtención de nuevas variedades que presenten el potencial de acumular mayores concentraciones de micronutrientes como el hierro, zinc y otros como yodo y selenio; aunque esta práctica no soluciona en el corto plazo el problema. Para el corto plazo y como complemento, se emplea la biofortificación agronómica, la cual consiste en aplicar nutrientes al suelo donde se desarrolla el cultivo, para que éste, puede absorberlo y, por consiguiente, tener mayores concentraciones en el producto cosechado. Por lo tanto, la presente investigación plantea que al fertilizar el cultivo de papa con zinc, incrementará sus contenidos de ese elemento en el tubérculo y disminuirá la concentración de cadmio. Los objetivos del presente trabajo son:

- a) Evaluar el efecto de aplicación foliar y edáfica con zinc en la biofortificación agronómica del tubérculo de papa y su interacción con cadmio.
- b) Determinar el rendimiento de tubérculo de papa como respuesta a la fertilización foliar y edáfica con zinc.
- c) Evaluar la concentración de zinc y cadmio en los tubérculos de papa.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Situación actual

Las estimaciones más recientes de la FAO (2013) indican que 868 millones de personas (el 12,5 % de la población mundial) están subnutridas en cuanto al consumo de energía alimentaria; sin embargo, estas cifras representan tan solo una fracción de la carga mundial de la malnutrición. Se calcula que el 26 % de los niños del mundo padecen retraso del crecimiento, 2 000 millones de personas sufren de carencia de uno o más micronutrientes y 1 400 millones de personas tienen sobrepeso, de los cuales 500 millones son obesos. La mayoría de los países están lastrados por múltiples tipos de malnutrición, que pueden coexistir dentro de un mismo país, familia o individuo (FAO 2013).

El coste de la malnutrición en la economía mundial se calcula en 3.5 billones de USD al año, mientras el coste de la desnutrición y las deficiencias de micronutrientes se estima entre 1.4 y 2.1 billones de USD. La desnutrición infantil y materna suponen, como mucho, la mayor carga para el sistema sanitario relacionada con la nutrición a nivel mundial (FAO 2009),

Desde hace años la deficiencia de zinc en humanos, ganado y plantas, se ha reconocido como un asunto crítico por nutriólogos, médicos científicos y agrónomos. Sin embargo, recientemente ha recibido mayor atención por otros grupos, incluyendo economistas y sociólogos, que reconocen que esto es un problema nutricional global con implicaciones significativas en temas de salud, sociales y económicos (IZA 2009).

### 2.2 Importancia del zinc en humanos

La deficiencia de micronutrientes (minerales y vitaminas) en las dietas afecta a más de un tercio de la población mundial, particularmente a mujeres y niños en hogares de escasos recursos económicos (Ortiz 2010). El zinc es un nutriente esencial para la salud humana. No hay vida sin zinc. Recientemente, la deficiencia de zinc, especialmente en infantes y niños menores de 5 años, ha recibido la atención mundial. Esta deficiencia es la quinta causa de muerte y enfermedad en los países en desarrollo (Das y Green 2016).

Este nutriente es vital para las funciones biológicas del cuerpo humano. Un cuerpo adulto contiene entre 2 a 3 g de zinc. Está presente en todas las partes del cuerpo, incluyendo

órganos, tejidos, huesos, fluidos y células. Es vital para más de 300 enzimas en el cuerpo humano, activadoras del crecimiento, peso, talla y desarrollo de huesos, división celular, sistema inmunológico, fertilidad, gusto, olor y apetito, uñas y cabello y visión (Das y Green 2016). Las deficiencias de iodo y hierro son problemas nacionales en muchos países de la región, incluyendo al Perú, mientras que las deficiencias de vitaminas A y zinc son específicas a poblaciones en ciertas áreas geográficas dentro de cada país. Por ejemplo 42% de la población peruana está en riesgo de una ingesta inadecuada de zinc –un micronutriente que puede contribuir a reducir la incidencia de neumonía (Ortiz 2010).

La última información proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI 2016) se puede apreciar en la Fig. 1, aún existe un 13.5% de los niños menores de 5 años que sufren de desnutrición crónica. Si bien es cierto, en los últimos 10 años se han ido entregando suplementos de micronutrientes para suplir su poca ingesta en la dieta, se aprecia que en el sector rural todavía es el que debe ser atendido con mayor énfasis.

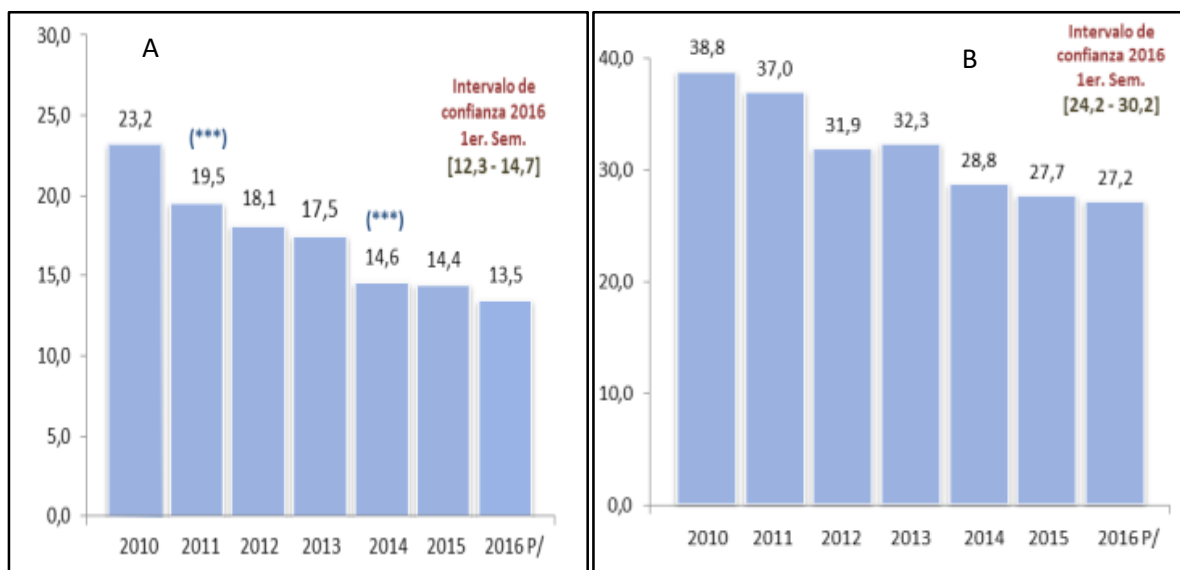


Figura 1: Proporción de menores de cinco años de edad con desnutrición crónica en Perú (A) y proporción de menores de cinco años de edad con desnutrición crónica en el área rural (B). Fuente: INEI (2016).

La desnutrición de la niña y el niño menor de tres años está determinada por dos factores, la deficiencia de micronutrientes y la presencia de enfermedades infecciosas (enfermedad diarreica aguda –EDA– e infecciones respiratorias agudas –IRA– en nuestro país son las de mayor prevalencia). La disminución de los niveles de hierro y zinc puede condicionar una

mayor frecuencia de enfermedades infecciosas (como EDA e IRA), pero también ser ocasionadas por estas (relación causal bidireccional) (Ministerio de Salud 2013).

### 2.3 Zinc en el suelo

El zinc se ha convertido en la deficiencia más frecuente de micronutrientes en suelos y cultivos en todo el mundo (Fig. 2), resultando en severas pérdidas de rendimiento y deterioro de la calidad nutricional. Se ha estimado que casi la mitad de los suelos del mundo son deficientes en zinc. Dado que en los cereales hay baja concentración de zinc debido que son cultivados en suelos potencialmente deficientes en el nutriente, se disminuye su concentración en el grano, generando que la mitad de la población humana sufra de la deficiencia de este nutriente (Das y Green 2016, Cakmak 2008, Alloway 2008). Se ha vuelto un problema particular en países y regiones que tienen producción de arroz en tierras bajas, zonas semiáridas con suelos calcáreos y/o suelos alcalinos, o donde se cultivan las plantas en suelos altamente erosionados y lixiviados como los tropicales y podzoles, u otro tipo de suelos con material parental arenoso (Alloway 2008).

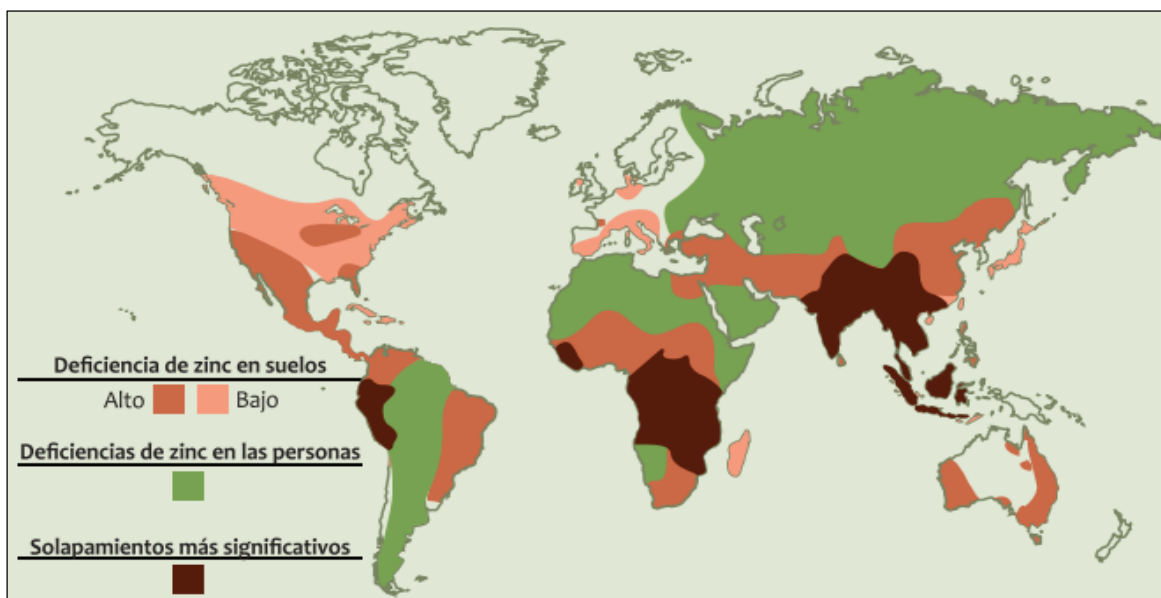


Figura 2: Deficiencia de zinc: panorama mundial

Tomado de: [www.ipni.net](http://www.ipni.net)

El zinc es un elemento metálico de número atómico 30 y con isotopos estables de masa 66, 67, 68 y 70, promediando 65.38 (Barak & Helmke 1993). Está naturalmente presente en todos los suelos en concentraciones típicas entre 10 a 100 mg Zn kg<sup>-1</sup>. Las actividades humanas han enriquecido las capas superiores del suelo con Zn mediante deposiciones atmosféricas, fertilización y aplicación de lodos cloacales (Mertens y Smolders 2013).



La cantidad total de zinc en el suelo está distribuida en cinco fracciones (o fuentes): i) la fuente soluble en agua: presente en la solución suelo, ii) fuente intercambiable: enlaces iónicos a las partículas del suelo por cargas eléctricas, iii) fuente enlazada orgánicamente: iones adsorbidos, quelatados, o complejados con ligandos orgánicos, iv) fuente de zinc sorbido no intercambiable dentro de los minerales arcillosos y óxidos metálicos insolubles, v) fuente de minerales primarios meteorizables (Alloway 2008).

Las mayores causas de deficiencia de zinc incluyen: i) suelos de bajo contenido de zinc (material parental), ii) suelos con zonas restringidas, iii) pH, iv) suelos de bajo contenido de materia orgánica, v) inactividad microbiológica, vi) temperatura del suelo, vii) especie y variedad de plantas, viii) elevado nivel de fósforo disponible y ix) efectos del nitrógeno (Hafeez et al. 2013).

La disponibilidad de  $Zn^{2+}$  decrece conforme se incrementa el pH del suelo. La deficiencia de Zn inducida por el pH mayormente ocurre en suelos neutros y calcáreos. A un elevado pH, el Zn precipita en formas insolubles como  $ZnFe_2O_4$  y/o  $ZnSiO_4$ , que reducen el  $Zn^{2+}$  en suelos. Encalado de suelos ácidos, especialmente en los de bajo Zn, pueden reducir la absorción de  $Zn^{2+}$ . La adsorción de Zn en la superficie de  $CaCO_3$  puede reducir el  $Zn^{2+}$  en solución. El zinc en solución es muy bajo, su rango es entre 2 a 70 ppb, con la mitad del  $Zn^{2+}$  en solución complejoado por la materia orgánica. Sobre pH 7.7, el  $ZnOH^+$  es la especie más abundante. La solubilidad del zinc es altamente dependiente del pH y decrece 100 veces con cada incremento en una unidad de pH (Havlin et al. 1999).

La influencia del pH en la concentración de  $Zn^{+2}$  en solución se puede apreciar en la Fig. 3. En los puntos a y b, se indica que, a un pH de 5, la concentración de  $Zn^{+2}$  es aproximadamente de  $10^{-4}$  M ( $6.5 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y a pH de 8, es de  $10^{-10}$  M ( $0.007 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

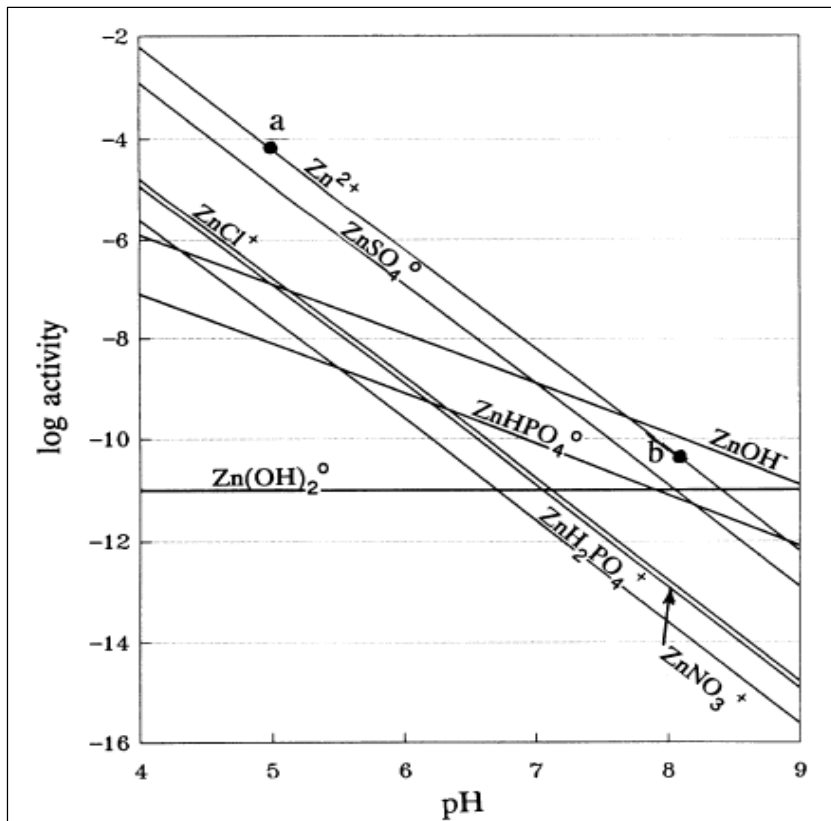


Figura 3: Especies solubles de Zn en equilibrio con el Zn-suelo cuando  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$  están a  $10^{-3}$  M y  $H_2PO_4^-$  está a  $10^{-5}$  M.

Fuente: Lindsay (1991)

La adsorción de  $Zn^{2+}$  por minerales arcillosos, óxidos de Al/Fe, materia orgánica y  $CaCO_3$  se incrementa con el incremento del pH. Puede haber inhibición en la absorción de  $Zn^{2+}$  por otros cationes metálicos como  $Fe^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  y  $Mn^{2+}$ , posiblemente por competir por el mismo sitio de entrada. El antagonismo más conocido es P-Zn. Alta disponibilidad de P induce la deficiencia de Zn. En suelos de bajo contenido de Zn y de altas aplicaciones de P, esta deficiencia se hace más notoria (Havlin et al. 1999).

El  $CaCO_3$  es parcialmente responsable de la adsorción de Zn lo que reduce su disponibilidad en un suelo calcáreo, donde la disponibilidad de Zn disminuye con el incremento del contenido de  $CaCO_3$ , como se observa en la Figura 4.

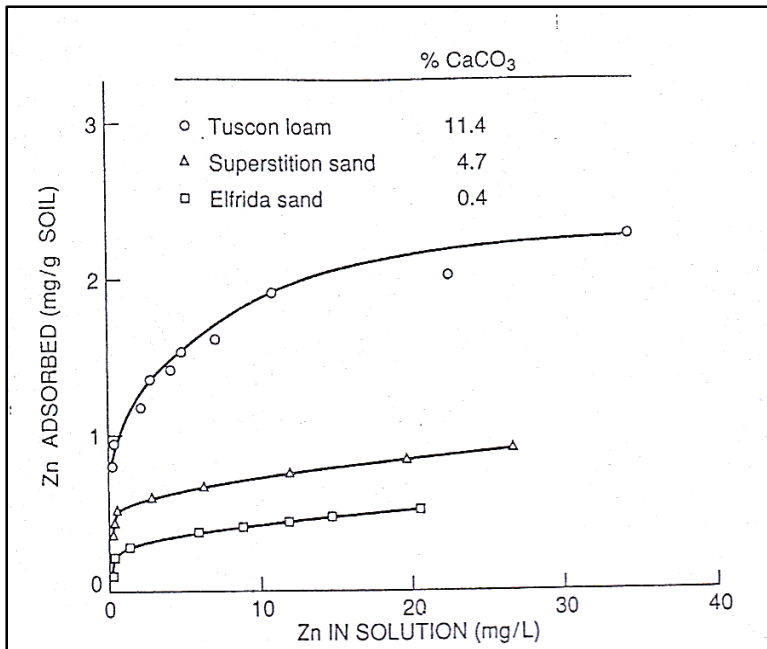


Figura 4: Adsorción de Zn por suelos calcáreos.

Tomado de: Havlin et al (1999)

## 2.4 Zinc en la planta

El elemento zinc es un nutriente esencial que está relacionado a más de 300 enzimas como componente catalítico (Broadley et al. 2012, Mengel y Kirkby 2001).

El zinc es requerido como componente estructural de un gran número de proteínas, como factores de transcripción y metalenzimas (Figueiredo et al. 2012).

Si la cantidad disponible de zinc es insuficiente, la planta podría sufrir de estrés fisiológico debido a la falla en los procesos metabólicos en el que el zinc juega un papel crítico (Sadeghzadeh 2013).

El zinc puede atravesar la raíz hasta el xilema a través del continuo citoplasmático de células de la raíz unidas por el plasmodesmo (simplasto) o a través de los espacios extracelulares entre las células (apoplasto) (White et al. 2002).

Los contenidos de Zn en los tejidos vegetales son bajos y oscilan normalmente entre 20 y 100 ppm en peso seco. Estos valores son función de sus bajos requerimientos, pero pueden variar dentro de los límites citados según la especie, variedad y condiciones de crecimiento. Las malas hierbas parecen ser mejor acumuladoras de zinc que las plantas cultivadas. La alfalfa es también un extractor potente de zinc y puede constituir una valiosa especie

protectora de huertos que padecen deficiencias de este oligoelemento. Digno de ser señalado es el hecho de que las plantas jóvenes presentan siempre contenidos más altos que las adultas. El maíz es una de las plantas más sensibles a la falta de zinc (Navarro y Navarro 2003).

## **2.5 Biofortificación agronómica**

Las prioridades en materia de investigación y desarrollo agrícola deben incluir la dimensión de la nutrición, con una mayor atención a alimentos ricos en nutrientes como frutas, hortalizas, legumbres y alimentos de origen animal. Debe ponerse mayor empeño en intervenciones encaminadas a diversificar la producción de los pequeños agricultores, tales como sistemas de agricultura integrada. Los esfuerzos para aumentar el contenido de micronutrientes de los alimentos básicos directamente a través del bioenriquecimiento son especialmente prometedores (FAO 2013).

Ante este problema, se ha establecido procedimientos para lograr incrementar el zinc y otros nutrientes en la dieta de la población afectada. Estas propuestas para solucionar la malnutrición por zinc, pueden ser: a) suplementos alimenticios, b) alimentos fortificados y c) biofortificación. Los dos primeros requieren infraestructura, acceso a mercados y farmacia. La tercera, es la fortificación de los cultivos por la aplicación de zinc (Das y Green 2016).

La biofortificación es el proceso de incrementar la concentración de Zn en granos, legumbres y tubérculos de los cultivos. Después de la cosecha, estos productos cosechados fortificados pueden entrar a la dieta, sea procesados o de directo consumo, y beneficiar a una gran cantidad de personas, especialmente a las áreas rurales (Alloway 2009).

La biofortificación implica enriquecer el contenido de micronutrientes de los cultivos; siendo definida como la intervención específica en materia de nutrientes, diseñada para potenciar el contenido de micronutrientes de los alimentos mediante el uso de prácticas agronómicas, principalmente vía fertilización (biofortificación agronómica). Esta técnica implica una mayor seguridad alimentaria, ya que los cultivos actúan como tampón frente a elevadas dosis accidentales aplicadas al suelo. Por consiguiente, la agricultura a través de la

biofortificación, debería jugar un papel fundamental en el futuro desarrollo y bienestar de la sociedad actual dado el constante incremento en la esperanza media de vida y la aspiración legítima a disfrutar una mayor calidad de vida y nivel de salud. Esto permitiría una extensión de la cultura de la salud y, por ende, una disminución de la carga de la enfermedad sobre el conjunto de la sociedad (López-Bellido et al. 2014).

La biofortificación puede ser mediante programas de fitomejoramiento, (biofortificación genética) donde se busca el desarrollo de nuevos genotipos con altas concentraciones de zinc (Sharma et al. 2013, Cakmak 2008), empleando técnicas de biotecnología y revalorizando especies nativas (Ortiz 2010).

## **2.6 Recomendaciones de fertilización con zinc**

La mejora de la fertilidad de los suelos mediante el uso de fertilizantes orgánicos o inorgánicos que contienen concentraciones equilibradas de nitrógeno, potasio y fósforo puede elevar el rendimiento de los cultivos y mejorar la concentración de micronutrientes de los productos cultivados. La adición de determinados micronutrientes a los fertilizantes o al agua de riego puede mejorar en mayor grado el rendimiento y las concentraciones de micronutrientes (FAO 2013).

Con el propósito de prevenir la deficiencia de zinc, se propone la aplicación de fertilizantes de zinc, sea a la parte superficial del suelo, en bandas cerca de la línea de las semillas, aplicado foliarmente o tratando a la semilla (Alloway 2009). La estrategia de fertilizar los cultivos puede ser una solución rápida al problema y puede ser considerada un importante complemento a los programas de fitomejoramiento (Cakmak 2008).

El zinc puede ser aplicado directamente al suelo tanto en forma orgánica como inorgánica. El sulfato de zinc ( $ZnSO_4$ ) es la fuente inorgánica más empleada por su alta solubilidad y bajo costo (Cakmak 2008). Otras fuentes de zinc pueden ser usadas como:  $ZnCO_3$ ,  $ZnO$ ,  $Zn(NO_3)_2$  y  $ZnCl_2$  (Sadeghzadeh 2013).

Los primeros cultivos en ser biofortificados fueron los cereales. La mayor cantidad de experimentos han sido desarrollados en trigo (Fig. 5), por la gran cantidad de alimentos que emplean este cereal. Las investigaciones indican que hay respuesta a la aplicación de sulfato

de zinc, tanto al suelo como foliar para incrementar el contenido del nutriente en el grano (Palmgren et al. 2008, Zhang et al. 2012, Cakmak et al. 2010, Velu et al. 2014). Los niveles de aplicación de zinc probados por varios autores varían desde 50 kg  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O ha}^{-1}$  (11 kg  $\text{Zn ha}^{-1}$ ) hasta 21 kg  $\text{Zn ha}^{-1}$  (Zou et al. 2012, Manzeke et al. 2014, Zhang et al. 2012, Chattha et al. 2017, Lungu et al. 2008, Cakmak 2010, Cakmak et al. 2010).

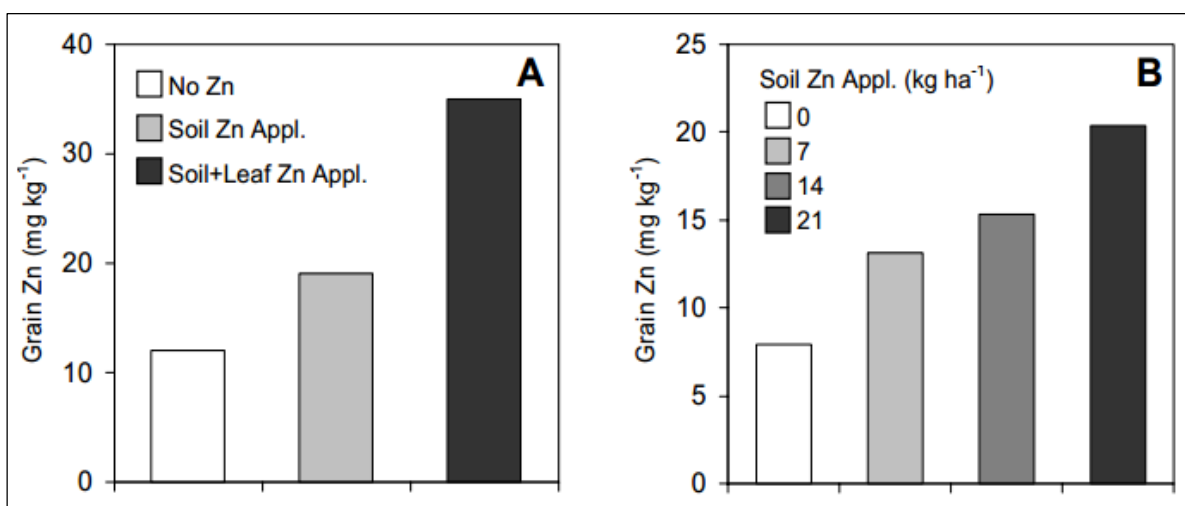


Figura 5: Concentración de zinc en granos de trigo duro bajo aplicaciones de  $\text{ZnSO}_4$  al suelo y foliar (A) e incremento de niveles de fertilización al suelo con zinc (B).

Fuente: Cakmak et al. (2010).

La solubilidad del fertilizante es una propiedad química muy importante al momento de evaluar la eficiencia que tiene éste para suplir los nutrientes para la planta. La solubilidad del fertilizante es influenciada por las características del suelo, especialmente del pH. También es importante la interacción con otros fertilizantes. En la Figura 6, se puede apreciar que la solubilidad del zinc disminuye con respecto el pH se incrementa, en los suelos A, B y C con valores de pH de 4.5, 5.6 y 7.7, respectivamente. Cuando el Zn es aplicado mediante sulfato de zinc la difusión del Zn es mayor que al usar sulfato de zinc + fosfato monoamónico (MAP) y este último, mayor que sulfato de zinc + fosfato diamónico (DAP).

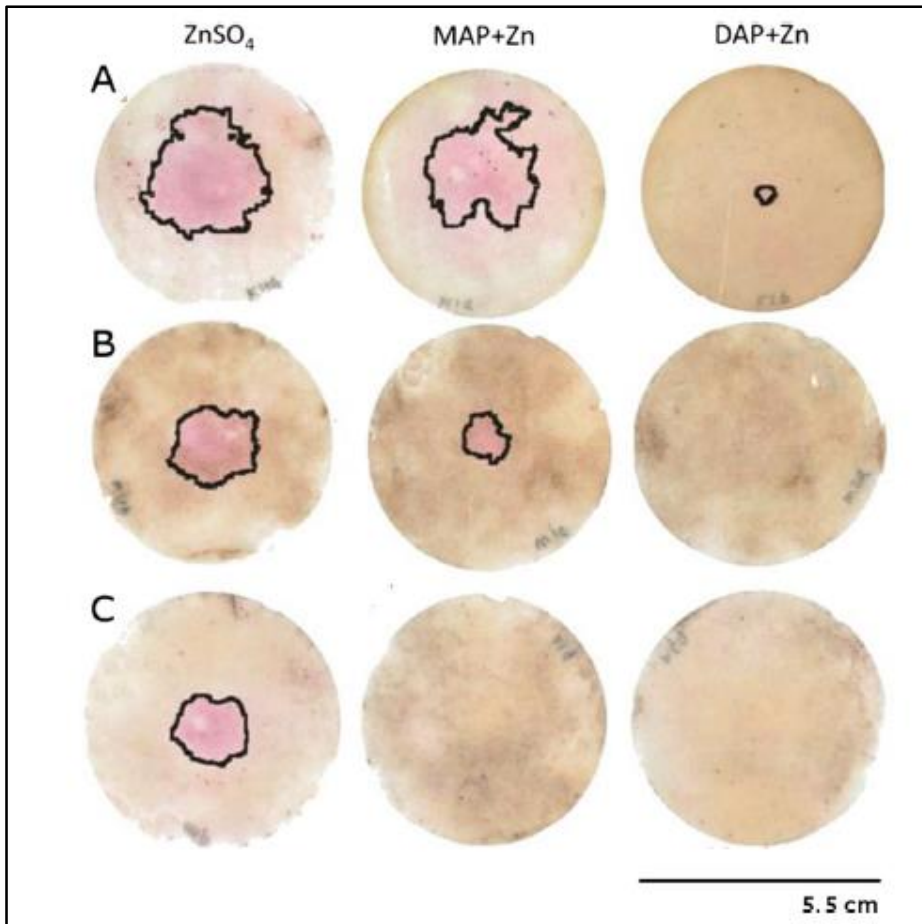


Figura 6: Visualización de la difusión del Zn después de la aplicación de fertilizantes con Zn en un suelo de pH bajo (A), en un suelo de pH intermedio (B) y en un suelo de pH elevado (C).

Fuente: Degryse et al. (2014).

## 2.7 Cadmio

El cadmio es un metal no esencial presente naturalmente en todos los suelos. Este metal está en el suelo como catión divalente ( $\text{Cd}^{2+}$ ) en concentraciones típicamente entre 0.1 y 1.0  $\text{mg kg}^{-1}$  (Kabata-Pendias 2011, Smolders y Mertens 2013). Su concentración puede ser elevada a través de procesos naturales o antropogénicos. Las fuentes de éste último pueden ser deposiciones atmosféricas y entradas directas al suelo a través de aplicaciones de fertilizantes fosfatados, enmiendas orgánicas (estiércoles, lodos residuales), aguas de riego o gases resultantes de los automóviles (Wang et al. 2017, Mitra 2015, Adriano 2001). Contenidos de Cd por encima de 3  $\text{mg kg}^{-1}$  en el suelo, indicarían suelos que han sido contaminados por el hombre (Uminska 1993).

Los principales factores del suelo y de la planta que influyen en la acumulación de Cd y Zn son: a) especie y cultivar, b) fitodisponibilidad de Cd y Zn en el suelo y relación Cd: Zn, c)

pH del suelo, d) sorción por las superficies del suelo incluyendo la materia orgánica y óxidos amorfos de Fe y Mn, e) cloruro, f) fertilizantes de N y P, g) rotación de cultivos (Chaney 2010).

## 2.8 Zinc en la reducción de la acumulación de cadmio

Se sabe que el cadmio es un metal tóxico. Cuando se acumula en altas concentraciones en el cuerpo, puede causar severas consecuencias a la salud, como un incremento en el riesgo de fracturas óseas, daño pulmonar, disfunción renal e hipertensión. Los alimentos contaminados con cadmio son la ruta predominante para la acumulación de este metal pesado en los organismos que lo consumen. En muchos países, especialmente en Asia, donde varias estimaciones indican que la ingesta originada por el arroz contaminado, es la responsable del 40-45% del total de cadmio ingerido en poblaciones humanas. En los Estados Unidos, aproximadamente el 20 % de la ingesta diaria de cadmio se deriva de los cereales. El arroz, el trigo duro (pastas) y los tubérculos (papas), también pueden acumular grandes cantidades de cadmio, ocasionando baja calidad de los alimentos cosechados y amenazando con exportar productos contaminados (IZA 2009).

En la Tabla 1, se muestra que, al aplicar zinc, se reduce la concentración de Cd en las semillas de trigo y lino.

Tabla 1: Translocación de Cd afectado por fertilizantes de P y Zn

Tratamiento	P (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	Translocación al brote		Translocación a la semilla/grano	
			Lino	Trigo	Lino	Trigo
<b>Fosfato monoamónico</b>	100	0	82.1	78.6	32.0	28.4
<b>Fosfato monoamónico + Zn</b>	100	20	83.4	72.3	24.5	17.6
<b>Super fosfato triple</b>	100	0	82.8	76.4	28.3	30.1
<b>Super fosfato triple + Zn</b>	100	20	84.0	70.0	24.2	21.0

Fuente: Jiao et al. (2004).



## 2.9 Cultivo de papa

La papa, el arroz, el plátano, la yuca, la caña de azúcar, el maíz (choclo y amiláceo), la piña, el camote, el trigo, el tomate y la cebada son los diez principales cultivos básicos de mayor consumo en el Perú. El consumo anual per cápita fue de 80 kg para la papa en el año 2009. La papa es la base de la alimentación y genera al productor andino más ingresos económicos que cualquier otro cultivo (Ortiz 2010).

La papa (*Solanum tuberosum* L) es una herbácea anual que alcanza una altura de un metro y produce un tubérculo, la papa misma, con tan abundante contenido de almidón que ocupa el cuarto lugar mundial en importancia como alimento, después del maíz, el trigo y el arroz. La papa pertenece a la familia de las solanáceas, del género *Solanum*, formado por otras mil especies por lo menos, como el tomate y la berenjena. La especie *S. tuberosum* se divide en dos subespecies apenas diferentes: la *andigena*, adaptada a condiciones de días breves, cultivada principalmente en los Andes, y *tuberosum*, la variedad que hoy se cultiva en todo el mundo y se piensa que descende de una pequeña introducción en Europa de papas andigena, posteriormente adaptadas a días más prolongados (FAO 2009).

Cabe indicar que nuestro país tiene la mayor diversidad de papa (*Solanum tuberosum* L) en el mundo, al contar con ocho especies nativas domesticadas y 2301 de las más de 4000 variedades que existen en Latinoamérica. Asimismo, el Perú posee 91 de las 200 especies que crecen en forma silvestre en casi todo nuestro continente (INEI 2014).

La papa se cultiva en más de 100 países, en clima templado, subtropical y tropical. Es esencialmente un "cultivo de clima templado", para cuya producción la temperatura representa el límite principal: las temperaturas inferiores a 10 °C y superiores a 30 °C inhiben decididamente el desarrollo del tubérculo, mientras que la mejor producción ocurre donde la temperatura diaria se mantiene en promedio de 18 a 20 °C. Las papas pueden crecer casi en todos los tipos de suelos, salvo donde son salinos o alcalinos. Los suelos naturalmente suelos, que ofrecen menos resistencia al crecimiento de los tubérculos, son los más convenientes, y los suelos arcillosos o de arena con arcilla y abundante materia orgánica, con buen drenaje y ventilación, son los mejores. Se considera ideal un pH de 5,2 a 6,4 en el suelo (FAO 2009).

En el año 2013, el principal departamento productor de papa fue Puno con 643 mil toneladas, seguido de Huánuco, Cusco, Junín y La Libertad que juntos aportan con el 55 % de la producción nacional. El rendimiento, que relaciona las toneladas métricas producidas respecto a la superficie cosechada, muestra un crecimiento en los últimos 10 años de 17.2 %, destacando los departamentos de Apurímac (17.8 t ha<sup>-1</sup>), Junín (17.5 t ha<sup>-1</sup>), La Libertad (16.3 t ha<sup>-1</sup>), Huánuco (15.6 t ha<sup>-1</sup>), Ayacucho (14.9 t ha<sup>-1</sup>) y Cusco (12.8 t ha<sup>-1</sup>) (INEI 2014).

En la Fig. 7 se muestran los departamentos del Perú que siembran el cultivo de papa, siendo el departamento de Puno el de mayor producción, seguido de Huánuco, Junín, Ayacucho y Apurímac.

En el Perú, según el último censo agropecuario del 2012, el valor económico de la papa representa el 25 % del PBI agropecuario. Están involucrados más de 710 mil familias de 19 departamentos del país (MINAGRI 2017). En los últimos años el consumo de papa ha aumentado notablemente, el 2001 se consumían un promedio de 54 kg/por persona al año, al año 2010 se consumía 87 kg/por persona al año, cifras aún bajas en comparación con otros países donde se consumen entre 180 y 200 kg por persona al año (MINAGRI 2011). El Valor Bruto de la Producción (VBP) de Papa en el 2016, llegó a representar el 10.6% del Valor Bruto del Sub sector agrícola, convirtiéndose en el segundo producto más importante de la agricultura del país, siendo solamente superado por el VBP correspondiente al arroz (13.4%) (MINAGRI 2017).

Según ámbito geográfico, en Lima Metropolitana se consumen 43 kg de papa, mientras que en el resto del país se consumen 72 kg al año, lo que significa que en la capital hay un déficit de 29 kg. Por área de residencia, el consumo promedio per cápita de papa es de 120 kg al año en el área rural, es decir, 73 kg más que el área urbana donde su consumo en promedio per cápita es de 47 kg al año. Por región natural, en la Sierra el consumo es de 116 kg al año, cifra superior en 86 kg con respecto a la Selva donde el consumo es 29 kg al año. Según el estrato socioeconómico, el más pobre consume 32 kg más que el estrato más rico, donde el consumo promedio per cápita anual es de 52 kg de papa (INEI 2012).

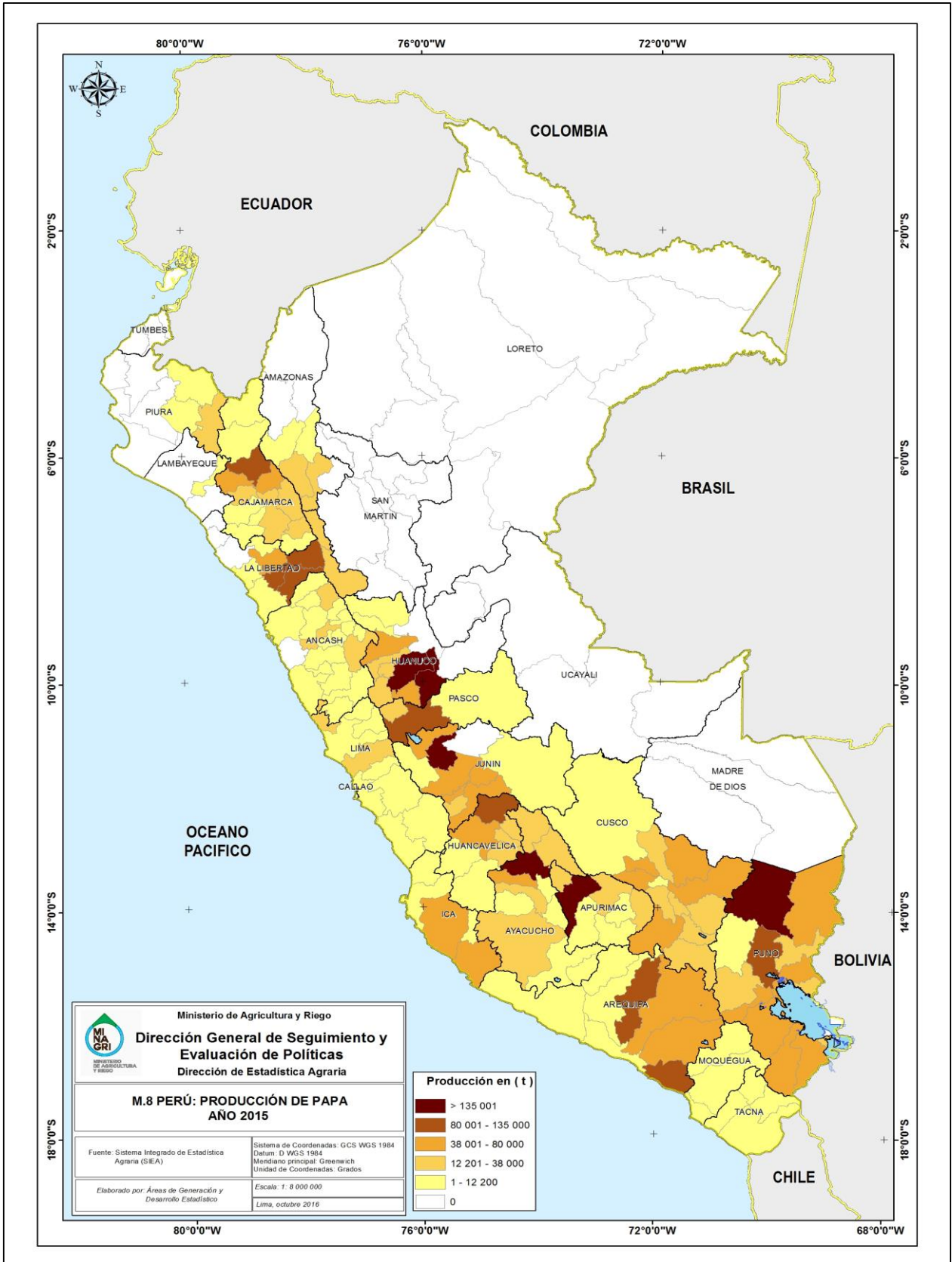


Figura 7: Producción de papa en el Perú 2015.

Fuente: MINAGRI (2015)

## 2.10 Biofortificación agronómica de la papa

La papa es una excelente fuente de carbohidratos, vitaminas y minerales. La alta concentración de compuestos orgánicos que estimulan la absorción de los micronutrientes para los humanos como el ácido ascórbico (Vit. C), cisteína y otros aminoácidos y, además, de una baja concentración de compuestos que limitan su absorción como los fitatos y oxalatos, por eso la biodisponibilidad de los micronutrientes en las papas es potencialmente alto (White et al. 2009, 2012).

El consumo de papa, de acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO), es de 200 g de papa al día, y datos del Centro Internacional de la Papa (CIP) indican que la concentración media en las variedades de papa es de 0.47 mg de hierro y 0.35 mg de zinc por 100 g de peso fresco. La papa contribuye con 2.6 % y 3.2 % del RDA de hierro y zinc considerando una ingesta de 18000 y 11000 ug diarios para cada uno de ellos. El CIP señala que si se lograra biofortificar las variedades de papa hasta 1.2 mg de hierro y 0.83 mg de zinc por 100 g de peso fresco, este cultivo podría contribuir con 7 % y 8 % del RDA para hierro y zinc, respectivamente (Ortiz 2010).

Como se puede apreciar en la Tabla 2, la papa es un cultivo con relativa sensibilidad a la deficiencia de zinc. El mayor problema con este nutriente en el cultivo de papa, es la fertilización con fósforo que reduce su asimilación. Tanto en costa como en sierra, las dosis de aplicación de fósforo pueden llegar hasta 200 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> (Egúsqüiza 2014).

Tabla 2: Sensibilidad relativa de los cultivos a la deficiencia de zinc

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

Fuente: Alloway (2008).

En estudios realizados en biofortificación para papa, se ha encontrado que, si hay respuesta a las aplicaciones de zinc para elevar las concentraciones de este nutriente, en el tubérculo (Kromann et al. 2017, Gabriel et al. 2015, White et al. 2016).

La concentración de zinc en el tubérculo es diferente en la pulpa y en la cáscara. Se ha reportado que la mayor cantidad de zinc está en la cáscara (Subramanian et al. 2011, Kromann et al. 2017, White et al. 2016) por lo que se recomendaría consumirla sin pelar.

La mayoría de autores, señala que las aplicaciones foliares son más eficientes que la aplicación edáfica para la biofortificación (White et al. 2012, Cakmak 2010, White y Broadley 2011). Sin embargo, Kromann et al. (2017) encuentra que la aplicación edáfica presentó mejor respuesta quizá por los factores químicos del suelo donde llevo a cabo el experimento (Tabla 3).

Tabla 3: Concentración promedio de zinc ( $\text{mg Zn kg}^{-1}$  peso seco) en la pulpa y cáscara de tubérculos de papa cultivar INIAP – Natividad bajo efecto de cinco dosis de fertilización foliar y cinco dosis de fertilización edáfica en dos experimentos en los Andes ecuatorianos del 2013 al 2014.

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

Fuente: Kromann et al. (2017).

### III. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1 Características del sitio experimental

##### 3.1.1 Ubicación

La investigación se realizó en el campo experimental “Libres 1” de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), ubicado en el distrito de La Molina, provincia y departamento de Lima, a una altitud de 243 m.s.n.m. y coordenadas  $12^{\circ} 05' \text{ LS}$  y  $-76^{\circ} 56' \text{ LO}$ . La UNALM está localizada en una llanura aluvial.



Figura 8: Ubicación del ensayo experimental

##### 3.1.2 Clima

El trabajo experimental se ejecutó entre los meses de junio a setiembre del año 2017. De acuerdo a la información registrada por el Observatorio Meteorológico Alexander Von Humboldt de la UNALM (Tabla 4), las temperaturas mínimas oscilaron de  $13.7$  a  $15.7$  °C y las máximas, entre  $20.2$  y  $21.2$  °C. La temperatura media registra sus promedios mensuales más bajos en el mes de agosto ( $16.5$  °C) y los más altos en el mes de junio ( $18.3$  °C). Por otro lado, la radiación solar fue más intensa en el mes de julio ( $233.3 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$ ) y la máxima humedad relativa alcanzó  $90\%$  en el mes de agosto. Debido a que las precipitaciones en la costa del Perú son escasas ( $< 50 \text{ mm año}^{-1}$ ), la zona de vida es un desierto desecado subtropical (dd-S) (INRENA 1995).

Tabla 4: Temperatura, radiación solar y humedad relativa durante la conducción del experimento. La Molina, 2017

Mes	Temperatura			Radiación solar (cal/cm <sup>2</sup> /día)	Humedad Relativa (%)
	Media	Máx. (°C)	Mín.		
Junio	18.3	21.2	15.7	187.2	88
Julio	17.6	21.0	15.0	233.3	86
Agosto	16.5	20.2	13.7	225.4	90
Setiembre	16.7	20.2	13.7	229.0	89

Fuente: Observatorio Meteorológico Alexander Von Humboldt – UNALM

### 3.1.3 Suelo

Las características del suelo en estudio se muestran en la Tabla 5. El suelo está clasificado según el sistema Soil Taxonomy (USDA-NCRS 2014) como un Ustic Torrifuvents y presenta los siguientes horizontes genéticos: Ap – A – C. El suelo colectado dentro de los 20 cm superficiales del campo experimental se caracteriza por tener textura moderadamente fina (22 % de arcilla), reacción moderadamente alcalina (pH = 7.82), contenido moderado de CaCO<sub>3</sub> (3%) y ser no salino (0.71 dS m<sup>-1</sup>). Su fertilidad es baja, puesto que el tenor de materia orgánica no supera el 2 %, el contenido de potasio disponible es medio y el nivel de fósforo disponible es alto (> 7 mg kg<sup>-1</sup>); este último sugiere una intensa fertilización fosfatada en cultivos anteriores y/o efecto residual. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es baja (< 15 meq 100g<sup>-1</sup>) y las relaciones catiónicas (Ca/Mg = 6.36, Mg/K = 2.9, Ca/K = 18.5 y K/Na = 2.9) indican deficiencia de K con respecto a Ca y Mg. La concentración de Zn extractable es alta (> 7 mg kg<sup>-1</sup>) y la concentración de Cd, también (> 1 mg kg<sup>-1</sup>).

La medición de pH y CE fue realizada en extracto suelo: agua 1:1, usando un equipo multiparámetro Consort C1020. Para la determinación de los porcentajes de arena, limo y arcilla se empleó el método de Bouyucos, la materia orgánica fue determinada por el método de Walkley y Black, el contenido de CaCO<sub>3</sub> fue determinado mediante el método gasovolumétrico empleando HCl 0.2 N. El K disponible fue determinada con extractante de acetato de amonio 1N. El P disponible fue medido usando el método de Olsen modificado. Para la determinación de la CIC se empleó la saturación con acetato de amonio 1N pH:7, posteriormente el amonio fijado fue determinado por desplazamiento con KCl y colorimetría

empleando formaldehído. Los cationes cambiabales se determinaron con el extracto anterior empleando espectrofotometría de absorción atómica. El zinc extractable fue determinado en solución de Hunter y para el cadmio total fue empleado una solución nitro-perclórica, posteriormente se determinó sus concentraciones usando espectrofotometría de absorción atómica.

Tabla 5: Características fisicoquímicas del suelo en estudio

<b>Características</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Clase textural		Fr.Ar.A
Arena	%	53
Limo	%	25
Arcilla	%	22
pH (1:1)		7.82
CE (1:1)	dS m <sup>-1</sup>	0.71
MO	%	1.29
CaCO <sub>3</sub>	%	3.0
P disponible	mg kg <sup>-1</sup>	16.2
K disponible	mg kg <sup>-1</sup>	129
CIC	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	13.92
Ca <sup>2+</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	11.32
Mg <sup>2+</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	1.78
K <sup>+</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0.61
Na <sup>+</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0.21
Zn extractable	mg kg <sup>-1</sup>	14.55
Cd total	mg kg <sup>-1</sup>	2.46

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF) - UNALM



### 3.1.4 Agua

Las características del agua empleada en el estudio se presentan en la Tabla 6. Según la clasificación propuesta por Riverside (1984), el nivel de salinidad mayor de 0.75 dS m<sup>-1</sup> la categoriza como C<sub>3</sub> y por su RAS menor de 3, como S<sub>1</sub>. Por lo tanto, esta agua C<sub>3</sub>-S<sub>1</sub> es altamente salina con baja probabilidad de contribuir con niveles peligrosos de sodio al complejo arcillo-húmico; pero, debe usarse en cultivo muy tolerantes a sales. Según la clasificación FAO (1985), para el nivel de salinidad, presenta un ligero grado de restricción en el uso y sin problemas con el contenido de Na que puede limitar la infiltración del agua. Además, está catalogada como agua dura (341 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>). Los niveles de Na, Cl y B no representan algún peligro por la toxicidad que pueden causar a las plantas.

Tabla 6: Características químicas del agua en estudio

<b>Características</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
pH		7.52
C.E	dS m <sup>-1</sup>	0.86
Calcio	meq L <sup>-1</sup>	5.8
Magnesio	meq L <sup>-1</sup>	1.04
Potasio	meq L <sup>-1</sup>	0.14
Sodio	meq L <sup>-1</sup>	1.87
SUMA DE CATIONES		8.85
Nitrato	meq L <sup>-1</sup>	0.04
Carbonato	meq L <sup>-1</sup>	0
Bicarbonato	meq L <sup>-1</sup>	2.61
Sulfato	meq L <sup>-1</sup>	2.67
Cloruro	meq L <sup>-1</sup>	3.5
SUMA DE ANIONES		8.82
Sodio	%	21.12
RAS		1.01
Boro	mg L <sup>-1</sup>	0.29
Hierro	mg L <sup>-1</sup>	0.002
Cobre	mg L <sup>-1</sup>	0.01
Zinc	mg L <sup>-1</sup>	0.062
Manganeso	mg L <sup>-1</sup>	0.033

Plomo	mg L <sup>-1</sup>	0.1
Cadmio	mg L <sup>-1</sup>	0.002
Cromo	mg L <sup>-1</sup>	0.04

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF) - UNALM

### 3.2 Materiales

#### 3.2.1 Semilla

Se empleó semilla botánica, tubérculos de papa de la variedad UNICA, la cual presenta las siguientes características (Egúsqiza 2014):

- Planta de porte bajo, follaje verde oscuro con tallos pigmentados.
- De escasa floración, flores de color violáceo algo pálidas, de lejos parecen ser blancas.
- Produce tubérculos de tamaño uniforme, de forma oblonga o alargados, de color rojo claro, ojos superficiales, pulpa blanca marfil y con brotes rojo violáceos.
- Es resistente a los virus PVX, PVY y PLRV y se le ha observado moderada resistencia al nematodo del nudo.

#### 3.2.2 Fertilizantes

Sulfato de zinc heptahidratado ( $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ): es la fuente más común y contiene 21 % de Zn. Debido a la limitada movilidad de Zn en el suelo se recomienda incorporarlo dentro del suelo; sin embargo, la aplicación en banda puede ser más efectiva, especialmente en texturas finas y de bajo contenido de Zn (Havlin et al. 1999).

Urea ( $NH_2CONH_2$ ): contiene 46 % de N y se presenta en forma de polvo blanco, cristalizado o granulado. La urea al disociarse en gas carbónico y amoníaco, aumenta el pH del suelo (incremento de 0.5 a 0.7 unidades), pero solo es temporal (Villagarcía y Aguirre 2014).

Fosfato diamónico [ $(NH_4)_2 H_2PO_4$ ]: contiene 18 % de N y 46 % de  $P_2O_5$  y se presenta en forma granular y de color negro. En solución al 1 %, tiene una reacción ligeramente alcalina (pH=7.8). El pH de la sal saturada es cerca de 9 (Villagarcía y Aguirre 2014).

Cloruro de potasio (KCl): contiene 60 % de K<sub>2</sub>O, se presenta en forma estándar y granular y de color generalmente rojo.

### 3.3 Tratamientos

VARIABLES:

- a) Niveles de zinc aplicados al suelo y tres niveles (0, 20 y 40 kg Zn ha<sup>-1</sup>)
- b) Niveles de aplicación foliar. dos niveles (0 y 5 kg Zn ha<sup>-1</sup>)

Tabla 7: Tratamientos en el experimento

Tratamientos	Dosis de Zinc (kg ha <sup>-1</sup> )	Aplicación foliar (5 kg Zn ha <sup>-1</sup> )
T1	0	Sin aplicación
T2	20	Sin aplicación
T3	40	Sin aplicación
T4	0	Con aplicación
T5	20	Con aplicación
T6	40	Con aplicación

### 3.4 Diseño experimental

#### 3.4.1 Modelamiento

Se estableció un diseño de bloques completamente al azar (DBCA) con un arreglo factorial de 3 x 2, en total seis tratamientos y cuatro repeticiones. Los factores son: a) Dosis de fertilización con Zn al suelo y b) con y sin fertilización con Zn al follaje.

El modelo aditivo lineal es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha*\beta)_{ij} + \epsilon_k + e_{ijk}$$

Donde:

Y<sub>ijk</sub>= Rendimiento en la k-ésima parcela de la i-ésima dosis edáfica de zinc recibiendo la

j-ésima dosis foliar de zinc

$\mu$  = Efecto de la media general

$\alpha_i$  = Efecto de la i-ésima dosis edáfica de zinc

$\beta_j$  = Efecto del j-ésimo dosis foliar de zinc

$(\alpha*\beta)_{ij}$  = Efecto de la interacción de la i-ésima dosis edáfica de zinc con la j-ésima dosis foliar de zinc

$\xi_k$  = Efecto del k-ésimo bloque

$e_{ijk}$  = Variable aleatoria del error experimental.

### 3.4.2 Análisis estadístico

Los resultados obtenidos en las evaluaciones de las variables estudiadas fueron sometidos a un análisis de varianza (ANVA). Para la comparación de medias se trabajó con la prueba de Tukey al 0.05%. El procesamiento de los datos fue realizado con el ambiente para cómputo estadístico R, versión 3.5.1., empleando los paquetes Agricolae y ggplot 2 (R Core Team 2016).

### 3.5 Distribución de parcelas experimentales

La unidad experimental fue de una parcela de 30 m<sup>2</sup>. Cada parcela estuvo compuesta por cinco surcos de 1 m de ancho y 6 m de largo, con un distanciamiento entre plantas 0.3 m., con 100 plantas por unidad experimental. Cada bloque fue de 180 m<sup>2</sup> y el área neta total fue de 720 m<sup>2</sup>. Entre bloques hubo un camino de separación de 1 m.

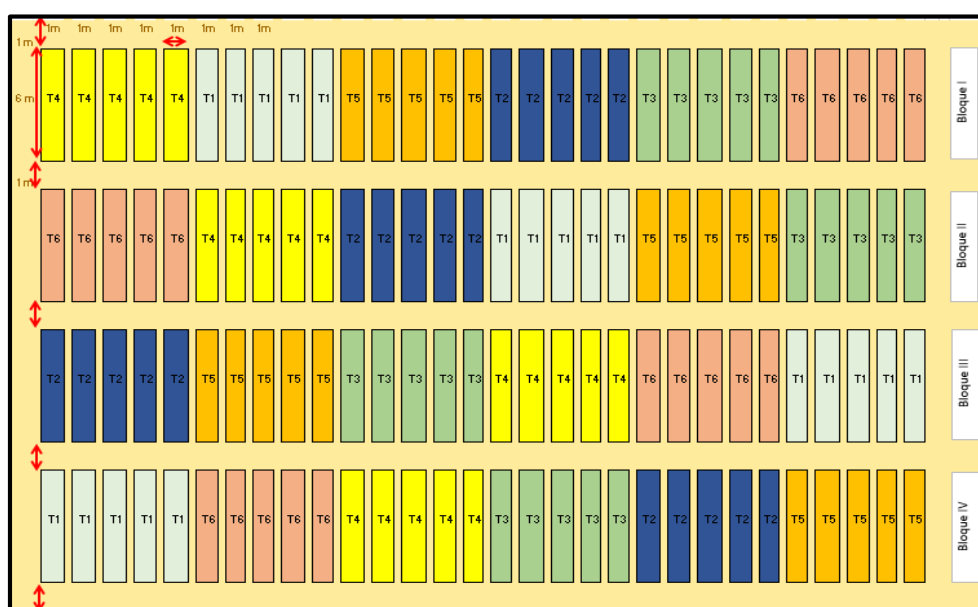


Figura 9: Croquis del experimento

### 3.6 Variables analizadas

#### 3.6.1 Variables biométricas

- a) Biomasa: evaluación de materia fresca (MF) y materia seca (MS) de la planta.
- b) Rendimiento: de los tubérculos de las parcelas experimentales ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )

#### 5.5.2 Análisis químico

- a) Zinc en hojas: concentración de zinc en hojas del tercio medio, expresado en  $\text{mg kg}^{-1}$ .
- b) Zinc en pulpa y cáscara del tubérculo: concentración de zinc en cáscara y pulpa del tubérculo, expresado en  $\text{mg kg}^{-1}$ .
- c) Cadmio en hojas: concentración de cadmio en hojas del tercio medio, expresado en  $\text{mg kg}^{-1}$ .
- d) Cadmio en pulpa y cáscara del tubérculo: concentración de cadmio en cáscara y pulpa del tubérculo, expresado en  $\text{mg kg}^{-1}$ .

### 3.7 Procedimientos

#### 3.7.1 Instalación del experimento

##### a) **Marcado del terreno**

Se procedió a marcar el campo para separar los tratamientos. Se empleó cal para delimitar el área experimental correspondiente.

##### b) **Muestreo de suelo**

Para colectar la muestra compuesta de suelo se empleó una red rígida para distribuir los puntos donde tomar las submuestras. Se realizó la extracción del suelo a una profundidad de 20 cm, con la ayuda de un tornillo muestreador.

##### c) **Siembra**

Se procedió a sembrar según el distanciamiento establecido de 0.3 m entre plantas y 1 m entre surcos. Se colocó un tubérculo-semilla en cada golpe. Los tubérculos

presentaron brotación múltiple (de 3 a 4 brotes), teniendo los brotes entre 2 a 3 cm de longitud.

d) **Fertilización**

El sulfato de zinc heptahidratado fue incorporado al suelo en el surco a la siembra. Se trabajó con una dosis de 200 – 160 – 140 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, respectivamente. Todo el P y K y el 50 % de N, fue aplicado a la siembra y el otro 50 % de N, al aporque. Los fertilizantes empleados fueron urea, fosfato diamónico y cloruro de potasio.

La fertilización foliar se aplicó 50 días después de la siembra, por cuatro semanas seguidas, donde se aplicó 1.25 kg Zn ha<sup>-1</sup>, en cada aplicación. La preparación consistió en pesar el equivalente de 1.25 kg Zn ha<sup>-1</sup> para parcelas de 30 m<sup>2</sup>, lo cual significó pesar 17.86 g de ZnSO<sub>4</sub> 7H<sub>2</sub>O por parcela por aplicación. El volumen de agua aplicado varió de acuerdo al tamaño del cultivo. La primera aplicación usó 5 L por parcela y en las siguientes tres aplicaciones, el gasto fue de 8 L. Se empleó una mochila de 20 L para hacer las aplicaciones foliares. En lo posible se trató de hacer la labor a primeras horas del día. Los tratamientos sin fertilización foliar no recibieron ninguna aplicación foliar.

e) **Manejo agronómico**

Las labores culturales fueron iguales para todos los tratamientos. Las aplicaciones de pesticidas fueron realizadas previa evaluación de plagas y enfermedades.

### 3.7.2 Metodología de evaluaciones de las variables biométricas

Para las evaluaciones, se emplearon los tres surcos centrales para obtener los datos representativos por unidad experimental.

- a) Biomasa: Se evaluó una semana antes del curado del cultivo, para ello se muestreó tres plantas completas (parte aérea y tubérculos), lo más homogéneas posibles y que fueran representativas de cada unidad experimental. Con ayuda de palas pequeñas se cavó un hoyo alrededor de las plantas y se extrajo los tubérculos y todo el follaje

(tallos y hojas). Se llevaron las plantas al laboratorio para ser pesadas y obtener la materia fresca (MF) del follaje y de los tubérculos. Luego se tomó una porción (submuestra) del tubérculo y una del follaje para someterlas a estufa por 48 horas a 70 °C y determinar su materia seca (MS) y después calcular la relación porcentual (% MS) entre MS y MF.

- b) Rendimiento: La cosecha fue semimecanizada, el tractor ingresó a través de los cuatro bloques cosechando surco por surco. No hubo mezcla de tubérculos entre bloques debido al camino de 1 metro que se dispuso entre los mismos. Se recolectó manualmente los tubérculos de cada parcela y se pesó en campo, obteniéndose el rendimiento por parcela de 30m<sup>2</sup>. Luego se transformaron los datos a Mg ha<sup>-1</sup>.

### **3.7.3 Metodología de evaluación de las características químicas**

- a) Concentración de zinc y cadmio en hojas: el muestreo foliar se realizó dos semanas después de la última aplicación al follaje; para ello, se tomó hojas completas del tercio medio de plantas representativas, se colectaron aproximadamente de 8 a 9 hojas. Luego se prepararon las muestras para el análisis químico, fueron lavadas con agua destilada con ayuda de una esponja. Fueron secadas al aire libre y luego se cortaron en trozos pequeños, se colocaron en hojas de papel y se ingresaron a estufa por 48 horas a 70° C. Después fueron molidas las muestras secas y se colocaron en bolsas de plástico con cierre hermético hasta procesarlas analíticamente.
- b) Concentración de zinc y cadmio en pulpa y cáscara del tubérculo: para este análisis se usaron las muestras colectadas en la evaluación de biomasa. Los tubérculos se lavaron de la misma forma que las hojas preparadas para el análisis foliar. Luego se separó en cáscara y pulpa, cuidando al momento de pelar, que la cáscara no cuente, en lo posible, con parte de pulpa. Las cáscaras se colocaron en bolsas de papel y se ingresaron a estufa por 48 horas a 70°C. En caso de la pulpa, por su alto contenido de agua, se trozó en pequeños cuadraditos (aproximadamente 2 cm<sup>3</sup>) y se dejó secar a ambiente por dos a tres días. Luego se ingresó a estufa.

- c) Análisis químico: para los análisis químicos se usó 2.5g de materia seca de cáscara, pulpa y hojas. Las muestras fueron digestadas a 200°C en 12 ml solución de HNO<sub>3</sub> (65 % p/p) y HClO<sub>4</sub> (70 % p/p), en relación 5:1. Luego de la digestión, se agregó agua destilada para dar volumen a la muestra y se filtró en papel Whatman N° 1, el volumen final del extracto fue de 25 ml. En los extractos se determinó la concentración de zinc y cadmio mediante espectrofotometría de absorción atómica.



## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Variables biométricas

#### 4.1.1 Biomasa

En este experimento no se encontró diferencias significativas entre las medias de las variables biométricas de los tratamientos comparados (Tabla 8). La materia seca total, materia seca del tubérculo y materia seca del follaje no reflejan efecto ante la aplicación edáfica y foliar de zinc. La interacción edáfica y foliar no se expresó en este ensayo.

Tabla 8: Respuesta de la aplicación edáfica y foliar de zinc a variables biométricas en el cultivo de papa.

Tratamientos		Materia seca (MS) total	MS Tubérculo	MS Follaje
Aplicación foliar	Dosis de zinc kg ha <sup>-1</sup>	----- g planta <sup>-1</sup> -----		
Sin	0	261.6	219.8	41.7
	20	269.3	231.2	38.1
	40	322.8	281.7	41.1
Con	0	242.4	207.8	34.5
	20	280.5	237.6	42.9
	40	220.8	186.3	34.5
	CV (%)	21.3	23.3	27.9
	Aplicación foliar	NS	NS	NS
	Dosis de zinc	NS	NS	NS
	Aplicación x Dosis	NS	NS	NS

El tratamiento de 40 kg Zn edáfico ha<sup>-1</sup> sin aplicación foliar presentó la mayor cantidad de materia seca (MS) total, la cual fue de 322.8 g planta<sup>-1</sup>, mientras la menor cantidad fue obtenida (220.8 g planta<sup>-1</sup>) por el tratamiento de 40 kg Zn edáfico ha<sup>-1</sup> con aplicación foliar.

En las plantas de papa evaluadas se encontró que los tubérculos representan más del 75 % de la materia fresca (Figura 10). Asimismo, del total de la biomasa fresca de la planta de

papa, el agua constituye alrededor del 85 % y los tubérculos son los órganos que contribuyen con el mayor porcentaje de biomasa seca (Figura 11).

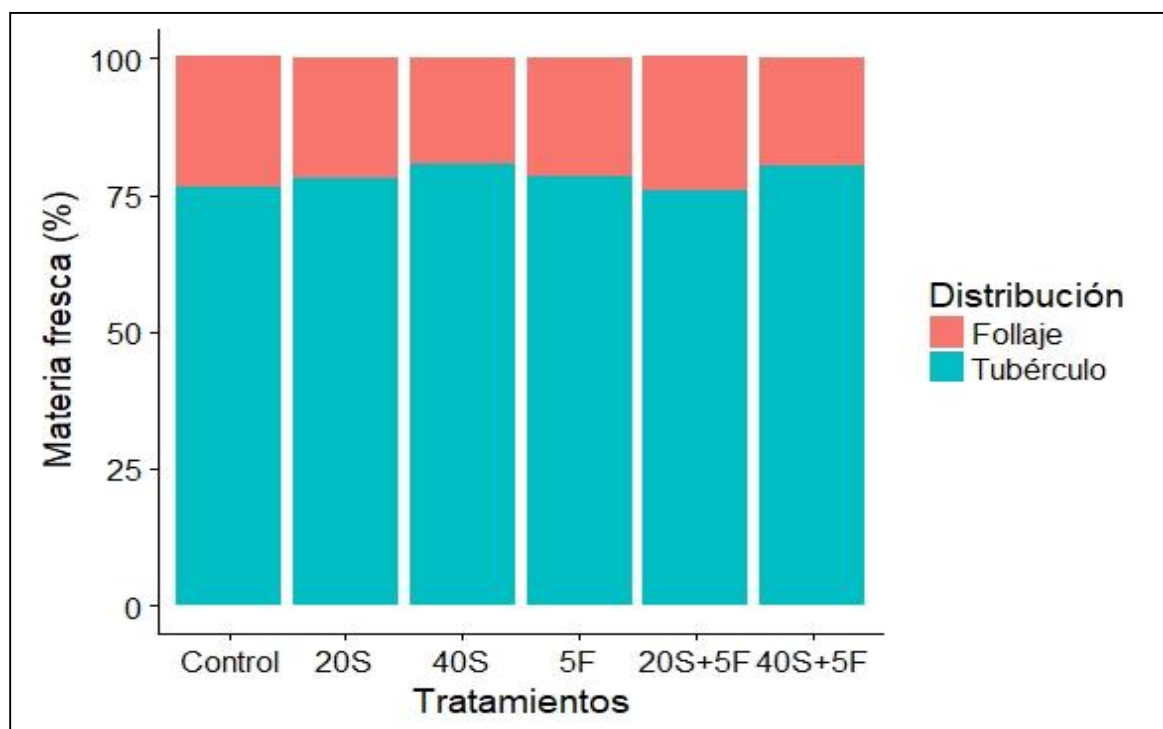


Figura 10: Distribución de la materia fresca (MF) en la planta de papa por cada tratamiento evaluado. Tratamientos: Control = 0 kg Zn ha<sup>-1</sup>; 20S= 20 kg Zn edáfico ha<sup>-1</sup>; 40S= 40 kg Zn edáfico ha<sup>-1</sup>; 5F = 5 kg Zn foliar ha<sup>-1</sup>; 20S+5F = 20 kg Zn edáfico ha<sup>-1</sup> + 5 kg Zn foliar ha<sup>-1</sup>; 40S+5F = 40 kg Zn edáfico ha<sup>-1</sup> + 5 kg Zn foliar ha<sup>-1</sup>

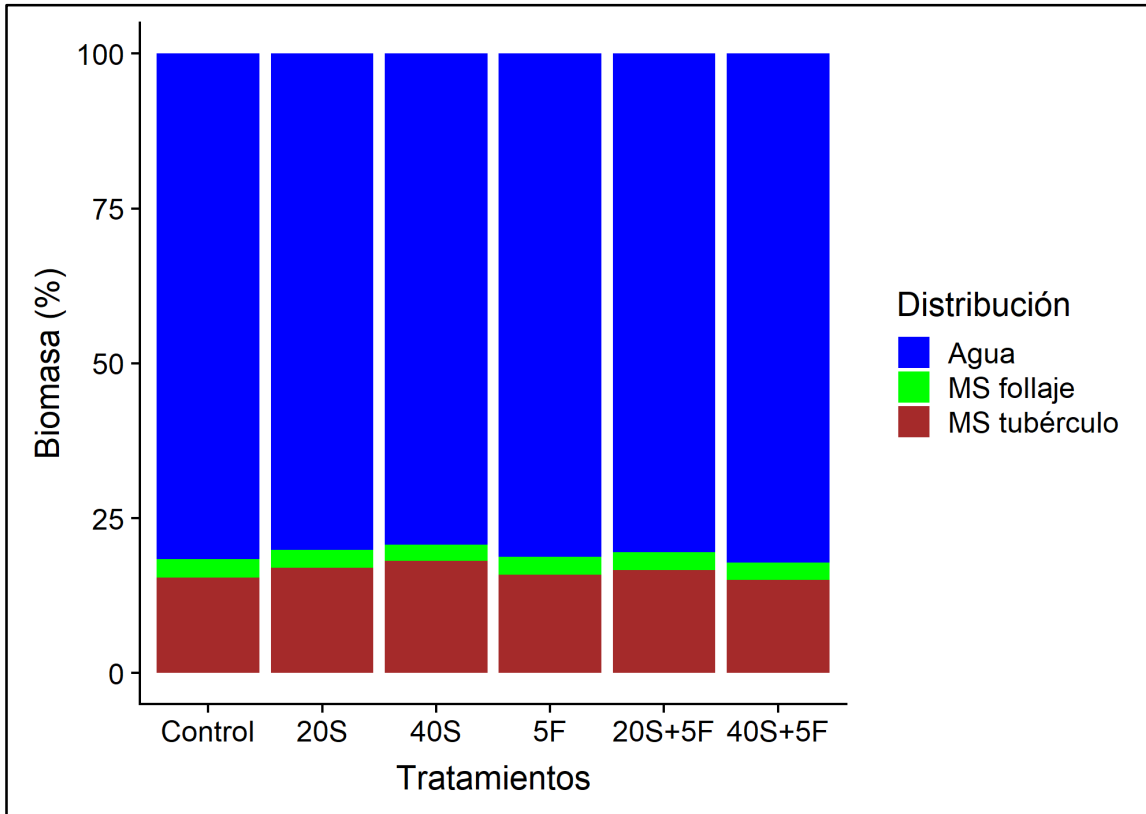


Figura 11: Distribución porcentual del peso total de la planta

En la Figura 12 se aprecia la relación entre el rendimiento y la biomasa fresca del follaje de la planta. No se aprecia ninguna relación entre estas dos variables, lo que significa que un mayor desarrollo del follaje no conlleva a un mayor rendimiento.

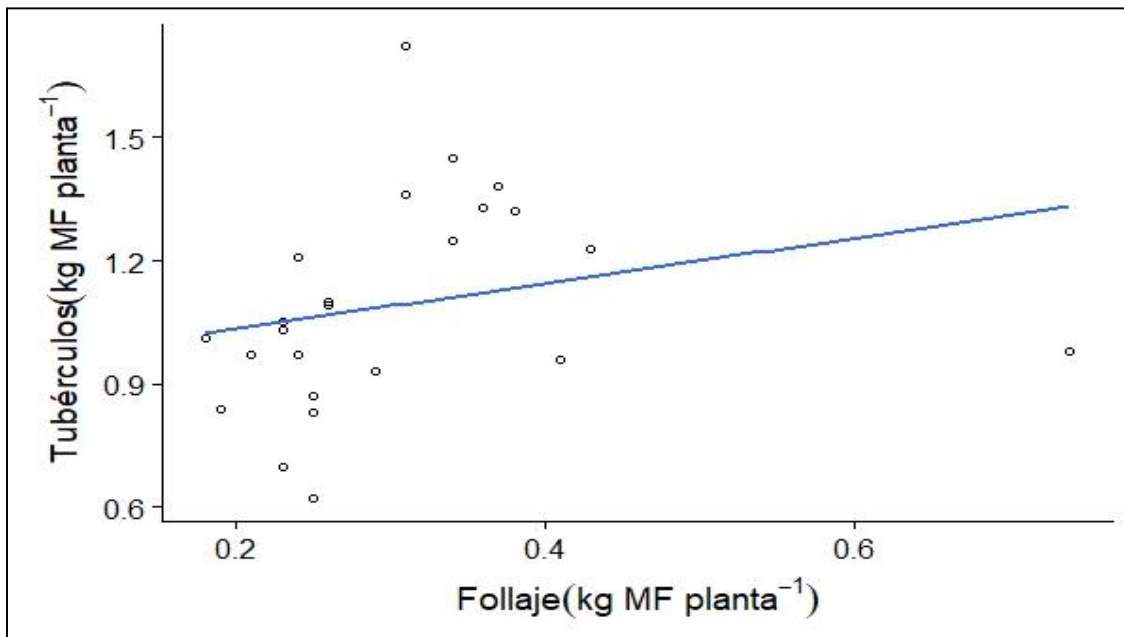


Figura 12: Relación entre la materia fresca del follaje y la materia fresca del tubérculo

### 4.1.2 Rendimiento

En esta variable no se encontró respuesta a las distintas fertilizaciones con zinc. El tratamiento que presentó mayor rendimiento fue de 40 kg Zn edáfico ha<sup>-1</sup> sin aplicación foliar, el cual obtuvo un rendimiento de 31.8 Mg ha<sup>-1</sup> (Figura 13). En investigaciones similares realizadas por Phattarakul et al. (2012) en el cultivo de arroz, no encontraron diferencias significativas al analizar el rendimiento; mientras que Zhao et al. (2014), en trigo, tampoco obtuvieron respuesta en la misma variable. Con respecto al cultivo de papa, Kromann et al. (2017), encontraron en una localidad de las cuatro evaluadas, respuesta a la fertilización con zinc. Por otro lado, Gabriel et al. (2015) encuentran a un nivel de 15 kg Zn edáfico ha<sup>-1</sup>, respuesta al rendimiento comparado con los niveles de 0, 5 y 10 kg Zn ha<sup>-1</sup>.

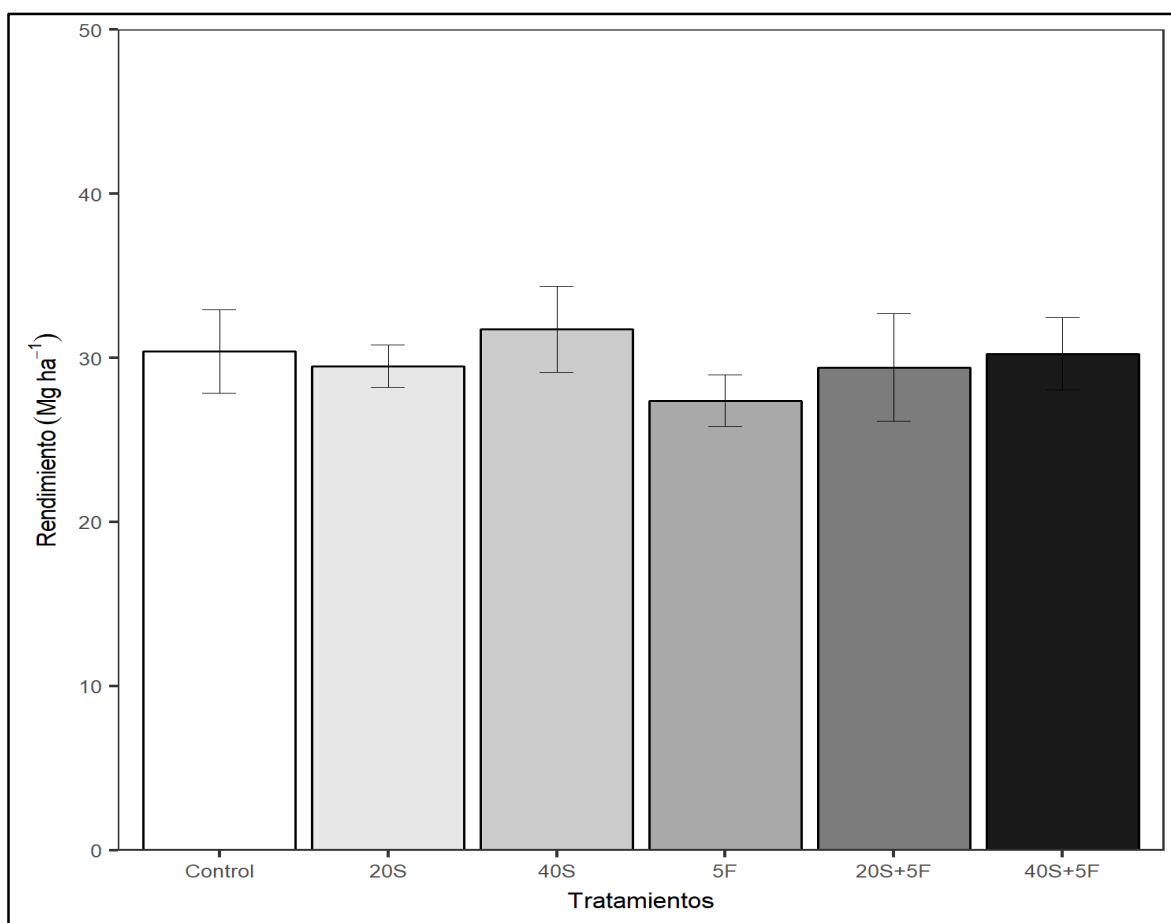


Figura 13: Rendimiento del cultivo de papa debido a los diferentes tratamientos.

En los tratamientos que solo fueron fertilizados edáficamente se observa la tendencia a aumentar el rendimiento y la MS en la planta. Esto se puede deber a que el zinc ayuda a la síntesis de compuestos que permiten el crecimiento de la planta, siendo este elemento importante en la síntesis de triptófano, componente de varias proteínas y necesario para la

producción de las hormonas de crecimiento (Havlin et al. 1999). La fertilización con zinc genera un mejor desarrollo de los cultivos, por ejemplo, Ozkutlu et al. (2006) encuentran que incrementa el peso de plantas de soya y trigo; Mousavi et al. (2007) muestran que se incrementa el porcentaje de materia seca, peso de tubérculos y números de tubérculos de papa; Aytac et al. (2014) informan que el cártamo tuvo mayor altura, mayor número de capítulos florales y mayor peso por semillas.

Hay una ligera tendencia en los tratamientos que recibieron fertilización foliar a disminuir su rendimiento en comparación a los tratamientos que no recibieron (Figura: 14), esto podría deberse a un efecto tóxico en los tejidos foliares (White et al. 2016). Los niveles de Zn encontrados en las hojas (Tabla 9) serán discutidos más adelante.

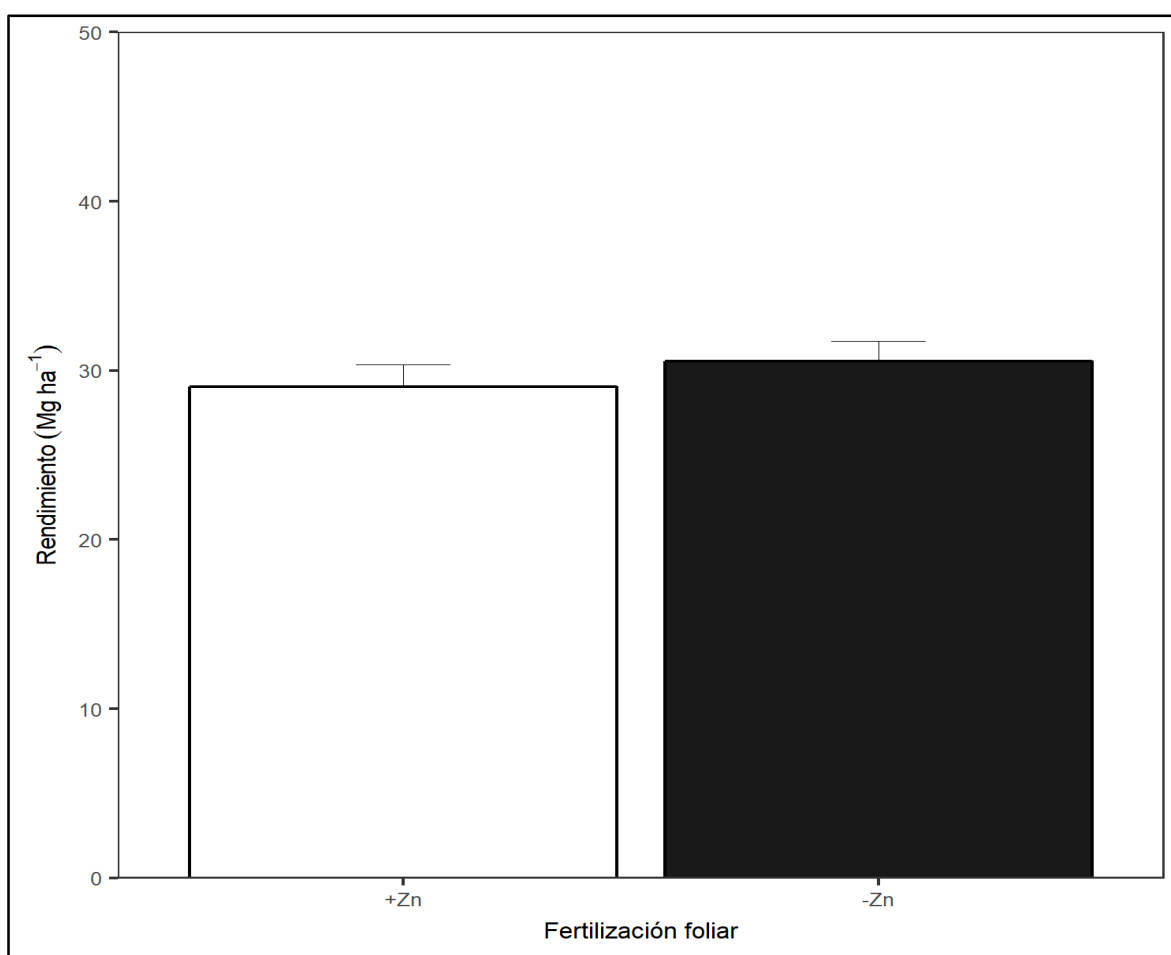


Figura 14: Respuesta de la fertilización foliar con Zn en el rendimiento del cultivo de papa.

En la mayoría de los trabajos de biofortificación agronómica con zinc donde se realizan en suelos similares al del presente estudio, no encuentran respuesta en el rendimiento (Phattarakul et al. 2012, Zhao et al. 2014).

## 4.2 Concentración de zinc en planta

Al evaluar la concentración de zinc en la planta, tanto en hojas como en tubérculo (cáscara y pulpa), se observa que los tratamientos presentaron diferencias estadísticas en el factor fertilización foliar (Tabla 9). Es evidente la respuesta a la fertilización foliar, la cual se expresa al incrementarse la concentración de zinc en los tejidos vegetales (Figura 15). Sin embargo, no se encontró diferencias significativas entre las dosis al suelo y la interacción entre aplicación foliar y fertilización edáfica.

Tabla 9: Concentración de Zn en hojas y tubérculo (cáscara y pulpa)

Tratamientos		Zn foliar	Zn cáscara	Zn pulpa
Aplicación foliar	Dosis de zinc kg ha <sup>-1</sup>	-----mg kg <sup>-1</sup> -----		
Sin	0	71.7	41.2	19.4
	20	67.5	41.1	19.0
	40	69.8	41.8	17.6
Con	0	174.7	47.4	24.6
	20	164.4	51.4	25.0
	40	158.9	49.2	26.0
	CV (%)	9.3	11.9	9.7
	Aplicación foliar	***	**	**
	Dosis de zinc	NS	NS	NS
	Aplicación x Dosis	NS	NS	NS

Los tratamientos fertilizados vía foliar incrementaron los contenidos de Zn en hojas desde 67.5 mg kg<sup>-1</sup> hasta 174.7 mg kg<sup>-1</sup>. Valores referenciales indican que en la mayoría de los cultivos se encuentra una concentración de zinc entre 30 a 100 mg Zn kg<sup>-1</sup> MS (Noulas et al. 2018, Govindaraj et al. 2011) y el nivel crítico de toxicidad empieza en 300 mg kg<sup>-1</sup> (Noulas et al. 2018) o 500 mg kg<sup>-1</sup> (Chaney 1993), a partir del nivel crítico, el rendimiento puede empezar a disminuir. En el cultivo de la papa, Walworth y Muniz (1993), indican concentraciones en hojas enteras de 21 a 70 mg kg<sup>-1</sup> y un nivel de toxicidad a partir de 150 mg kg<sup>-1</sup>. Las concentraciones encontradas en los tratamientos que recibieron fertilización

foliar presentaron niveles por encima del nivel tóxico (hasta 174 mg kg<sup>-1</sup>), aunque no se observaron síntomas visuales. White et al. (2012) encontraron hasta niveles de 792 mg Zn kg<sup>-1</sup> MS sin la presencia de toxicidad. Existe la posibilidad que parte del zinc aplicado vía foliar haya quedado en la superficie de las hojas o en el espacio apoplástico de las células, por lo que, la medición de Zn pudo ser alta, como lo sugieren White et al. (2012).

Las concentraciones reportadas en tubérculos pelados varían entre 3 a 21 mg Zn kg<sup>-1</sup> MS (White et al. 2009, Tekalign y Hammes 2005, Andre et al. 2007), encontrándose la máxima concentración hasta de 30 mg Zn kg<sup>-1</sup> MS en el cultivar Maris Piper cuando fue fertilizando vía foliar (White y Broadley 2011). Por otro lado, según la tabla de alimentos del Perú (Reyes et al. 2009), la concentración promedio es de 3 mg Zn kg<sup>-1</sup> MS (Anexo 24). Con respecto a la biofortificación con zinc de los tubérculos de papa mediante la aplicación de fertilizantes, hubo respuesta a la aplicación foliar de zinc. A un nivel de confianza del 95%, existe evidencia estadística para aceptar que la fertilización foliar incrementa los contenidos de Zn en el tubérculo. Los resultados indican un incremento en el contenido de Zn en pulpa desde 17.6 mg kg<sup>-1</sup> hasta 26 mg kg<sup>-1</sup> y en cáscara desde 41.1 mg kg<sup>-1</sup> hasta 51.4 mg kg<sup>-1</sup>, lo que significaría un incremento hasta 47.7 % y 25.1 % en pulpa y cáscara, respectivamente.

El incremento del contenido de Zn en el tubérculo fue mucho menor al incremento que se dio en las hojas, esto puede ser porque la entrada del zinc dentro de las células de las hojas es restringida o la entrada dentro del floema podría ser responsable del poco incremento, la translocación es limitada en el floema desde las hojas hacia los tubérculos (White et al. 2012, Longnecker y Robson 1993, Haslett et al. 2001).

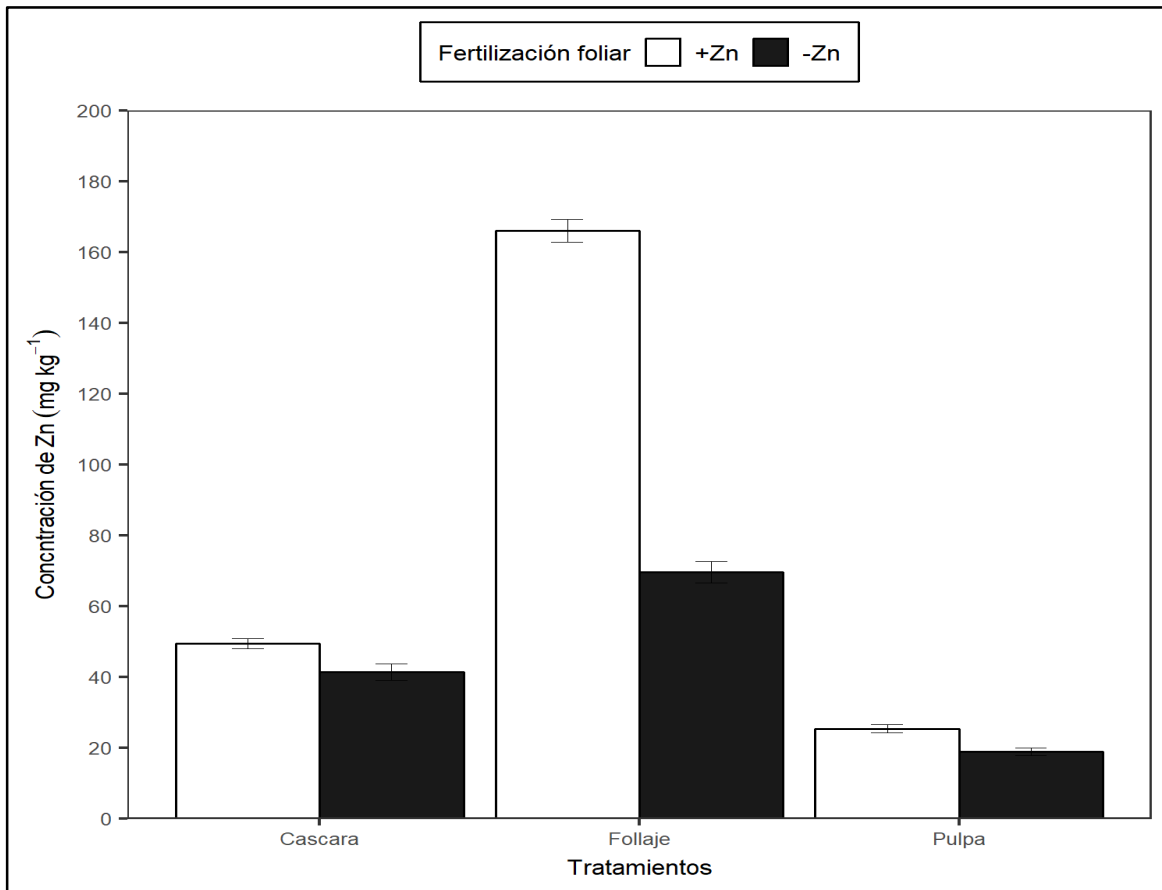


Figura 15: Concentración de Zn en hojas, cáscara y pulpa en el cultivo de papa bajo fertilización foliar con Zn.

Se aprecia que la mayor concentración de zinc en el tubérculo se da más en la cáscara que en la pulpa (Wszelaki et al. 2005, Subramanian et al. 2011), alcanzando contenidos hasta de 51.4 mg kg<sup>-1</sup> en comparación de la pulpa que posee un valor promedio de 25 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 16). Un problema importante para la nutrición humana es la costumbre de pelar y no consumir la cáscara sumado a ello, la cocción disminuye la concentración de zinc (White et al. 2016).



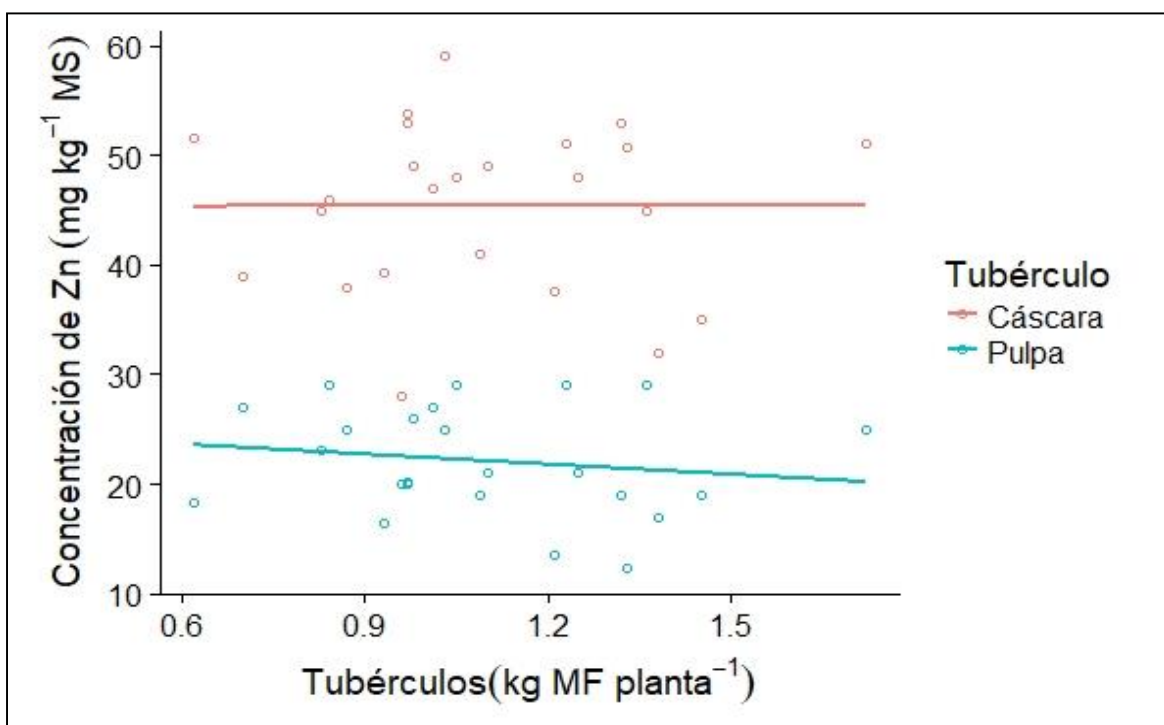


Figura 16: Relación entre la concentración de Zn en el tubérculo y el peso del tubérculo.

La fertilización edáfica no incrementó el contenido de zinc, ni en pulpa ni en cáscara; mientras que en la fertilización foliar se aprecia mayor contenido de este elemento (Phattarakul et al. 2012). Ambas fertilizaciones en conjunto (edáfica + foliar), generan un pequeño incremento con respecto a la fertilización foliar (Figura 17), similar a lo encontrado en el cultivo de arroz (Phattarakul et al. 2012). El tratamiento control no presenta diferencias con el tratamiento al suelo, esto significa que la planta no pudo absorber la gran cantidad de nutriente que se coloca en la siembra junto con la semilla brotada de papa, práctica convencional recomendada para aplicar el zinc en el cultivo (Westermann 2005). El suelo juega un papel importante en la absorción del zinc, dado que éste nutriente presenta disponibilidad muy baja y su concentración en la solución suelo desciende 30 veces ante el incremento en una unidad de pH (Havlin et. al., 1999). Además, el movimiento del zinc en el suelo por difusión limita su absorción por la planta. En la investigación, es probable que el pH elevado y contenido medio de  $\text{CaCO}_3$  del suelo hayan favorece a disminuir la disponibilidad del micronutriente para el cultivo de papa, por lo que no se haya encontrado respuesta a las aplicaciones edáficas.

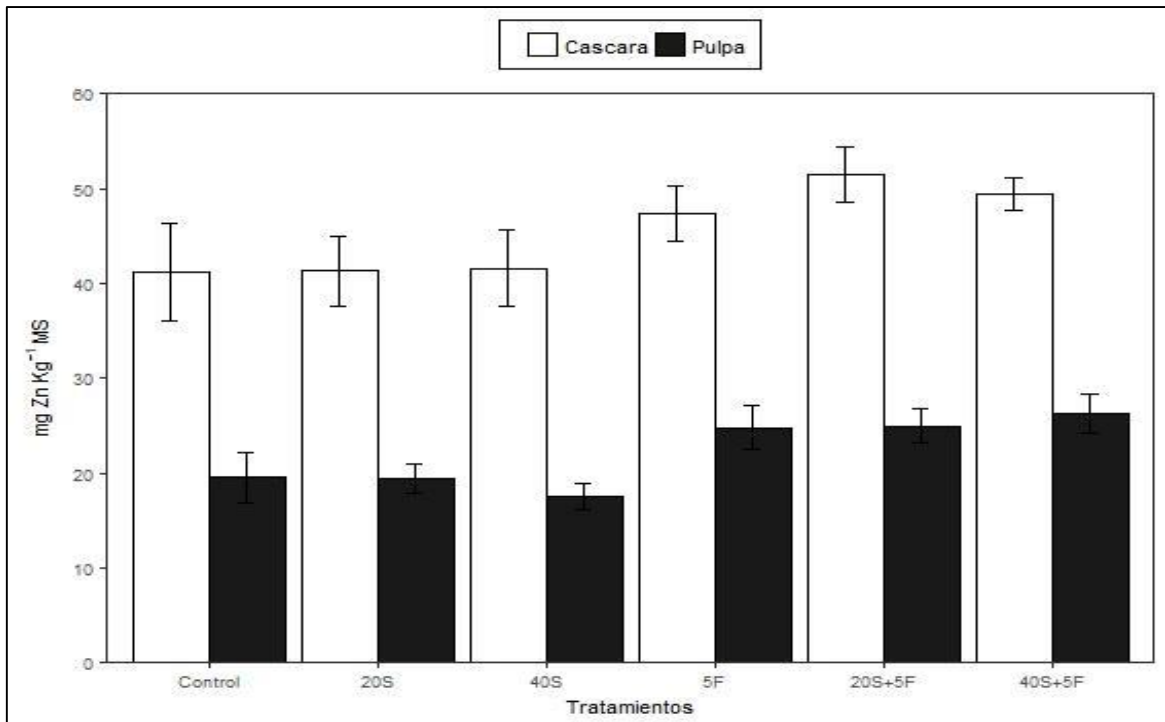


Figura 17: Concentración de Zn ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en cáscara y pulpa bajo fertilización foliar y edáfica de Zn. Tratamientos: Control =  $0 \text{ kg Zn ha}^{-1}$ ; 20S =  $20 \text{ kg Zn edáfico ha}^{-1}$ ; 40S =  $40 \text{ kg Zn edáfico ha}^{-1}$ ; 5F =  $5 \text{ kg Zn foliar ha}^{-1}$ ; 20S+5F =  $20 \text{ kg Zn edáfico ha}^{-1} + 5 \text{ kg Zn foliar ha}^{-1}$ ; 40S+5F =  $40 \text{ kg Zn edáfico ha}^{-1} + 5 \text{ kg Zn foliar ha}^{-1}$

En este tipo de suelos de pH elevado y con presencia de carbonatos, la mejor forma de incrementar las concentraciones de zinc es mediante la fertilización foliar. Zhao et al. (2014) y Phattarakul et al. (2012) encuentran en el cultivo de arroz, sembrado en un suelo calcáreo, la mayor concentración de granos se dio con fertilización foliar. Además, el movimiento del zinc, por difusión, es más lento en suelos calcáreos (Zhao et al. 2014). En otras investigaciones se encontraron que la mejor respuesta para incrementar la concentración de Zn en el tubérculo de papa fue mediante la fertilización foliar (White et al. 2016, 2012, Kromann et al. 2017).

Otra posible razón por la cual no se encontraron los resultados esperados en los tratamientos con fertilización al suelo fue la interacción entre P y Zn. Altas dosis de fósforo al suelo pueden limitar la absorción de Zn por las plantas (Alloway 2008b). La posible causa es por un efecto dilución, donde la aplicación de P genera un incremento en el rendimiento y, por ende, en la dilución del Zn (Loneragan y Webb 1993, Broadley et al. 2012, Alloway 2008a). El mecanismo más importante que limita la absorción de Zn por fertilizantes fosfatados es

debido a que el P suprime la infección de las micorrizas arbusculares a las raíces (Loneragan y Webb 1993), lo cual impide una mayor área de superficie radicular que pueda absorber a los nutrientes que tienen una movilidad muy baja en el suelo, como el Zn (Mengel y Kirkby 2001). En el suelo empleado para el experimento se encontraba un elevado contenido de P disponible ( $16.2 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y el cultivo tuvo una fertilización fosfatada de  $160 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ . Otro factor a considerar es la difusión del Zn del fertilizante, cuando se aplica sulfato de zinc junto con los fertilizantes fosfatados, siendo el fosfato diamónico (DAP) de reacción inicial básica y el fosfato monoamónico (MAP) de reacción inicial ácida. Degryse et al. (2014) observaron mayor difusión de Zn al aplicar sulfato de zinc, seguido de MAP + sulfato de zinc y finalmente, DAP + sulfato de zinc, sin embargo, al realizar la prueba en suelo calcáreo ( $> 60\% \text{ CaCO}_3$ ) de pH 7.7, solo el sulfato de zinc presentó difusión de Zn. Por lo tanto, al aplicar el sulfato de zinc junto al fertilizante fosfatado (DAP) se reduce la difusión de Zn.

La fertilización foliar incrementa las cantidades de Zn en los tubérculos, teniendo diferencias significativas con los tratamientos que no recibieron esta fertilización. En la Tabla 10 se muestra que el tratamiento de  $20 \text{ kg Zn ha}^{-1}$  obtuvo la mayor extracción de  $170.9 \text{ g Zn ha}^{-1}$ .

Tabla 10: Extracción total de Zn en el rendimiento de tubérculos.

Aplicación foliar	Tratamientos		Extracción de Zn en tubérculos $\text{g ha}^{-1}$
	Dosis de zinc $\text{kg ha}^{-1}$		
Sin	0		127.9
	20		129.6
	40		131.8
Con	0		142.7
	20		170.9
	40		152.8
CV (%)			16.7
Aplicación foliar			*
Dosis de zinc			NS
Aplicación x Dosis			NS

### 4.3 Concentración de cadmio en la planta

Los resultados de la concentración ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) de Cd en las tres partes evaluadas de la planta son presentados en la Tabla 11. Los tratamientos no presentaron diferencias estadísticas al

comparar sus medias. Muchos autores indican que el zinc reduce la absorción, translocación y acumulación de cadmio en las plantas (Köleli et al. 2004, Qaswar et al. 2017, Jiao et al. 2004). No se apreció este antagonismo entre Zn y Cd en el actual experimento. Sin embargo, también se ha reportado un tipo de sinergismo entre los dos elementos y podría ser lo encontrado en este trabajo. Nan et al. (2002), encontraron un efecto sinérgico, al incrementar los niveles de Cd y Zn en el suelo se incrementaron los contenidos de Zn y Cd en los cultivos. Contrariamente, Sarwar et al. (2015) encuentran que las aplicaciones de zinc al suelo y foliar no tienen ningún efecto en la concentración de cadmio en las raíces de trigo que crece en un suelo contaminado. Además, las aplicaciones de Zn al suelo y aplicación foliar de 6 g ZnSO<sub>4</sub> L<sup>-1</sup>, no disminuyeron la concentración de Cd en el grano; sin embargo, la aplicación foliar de 3 g ZnSO<sub>4</sub> L<sup>-1</sup> si la disminuyó significativamente. Saifullah et al. (2014) encuentran resultados similares a los de Sarwar et al. (2015) en el tratamiento con aplicación foliar al 0.3 % de ZnSO<sub>4</sub> que reduce la concentración de Cd en grano de trigo. Oliver et al. 1999, encuentran que a una dosis foliar de 0.67 kg Zn ha<sup>-1</sup> puede reducir el contenido de Cd, y dosis edáficas de 2.5 a 5 kg Zn ha<sup>-1</sup> tiene el mismo efecto (Oliver et al. 1994). Por otro lado, McLaughlin et al. (1995), emplearon dosis crecientes de Zn edáfico (50 a 100 kg Zn ha<sup>-1</sup>) y redujeron la concentración de Cd en el tubérculo de papa; sin embargo, no tuvieron respuesta en dos lugares de los cinco evaluados. El efecto de la fertilización con Zn en la toma de Cd por las plantas es altamente dependiente de las concentraciones de Cd y Zn en el suelo (Slamet-Loedin et al. 2015).

Tabla 11: Concentración de Cd en hojas y tubérculo (cáscara y pulpa)

Tratamientos		Cd foliar	Cd Cáscara	Cd Pulpa
Aplicación Foliar	Dosis de zinc kg ha <sup>-1</sup>	-----mg kg <sup>-1</sup> -----		
Sin	0	4.3	2.4	1.7
	20	4.2	2.3	2.2
	40	3.6	1.8	1.8
Con	0	3.8	2.4	2.0
	20	3.8	1.9	1.5
	40	4.1	1.9	1.9
	CV (%)	14	25.1	20
	Aplicación foliar	NS	NS	NS
	Dosis de zinc	NS	NS	NS
	Aplicación x Dosis	NS	NS	NS

Se reporta contenidos de Cd más elevados en hojas que en frutas o tubérculos (Mitra 2015), tal como se encuentra en este ensayo, siendo las concentraciones de Cd en hojas y tubérculos hasta de 4.3 y 2.4 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Los valores encontrados en el tubérculo de papa son altos (>0.5 mg kg<sup>-1</sup> MS). Según Smolders (2001) las concentraciones de cadmio en la planta podrían ser predecidas por el contenido de cadmio en el suelo, se establece un factor de transferencia (FT) del suelo hacia la planta (en materia fresca), siendo para el cultivo de papa un rango desde 0.07 hasta 0.19. El factor de transferencias sugerido para el cultivo de papa se obtiene con la siguiente fórmula:  $FT = (193 - 24 \text{ pH} - 0.94 (\% \text{ MO}) + 0.039 (\mu\text{g Cd kg}^{-1} \text{ suelo}))/270$  (Eriksson et al. 1996). De la formula se puede apreciar que al incrementar el pH, el factor de transferencia debería disminuir. Si se desea estimar la concentración de Cd para los tubérculos del experimento realizado, empleando un FT de 0.19 (Eriksson et al. 1996) se podría alcanzar una concentración de 0.47 mg kg<sup>-1</sup> MF en el tubérculo (contenido en el suelo de 2.46 mg Cd kg<sup>-1</sup>), tomando en promedio una humedad del 80%, se esperaría una concentración de 2.34 mg Cd kg<sup>-1</sup> MS de tubérculo, siendo una estimación cercana a lo encontrado. Los resultados obtenidos muestran concentraciones de Cd de hasta 2.4 mg kg<sup>-1</sup> en la cáscara y de 2.2 mg kg<sup>-1</sup> en pulpa, siendo las concentraciones en cáscara ligeramente mayores que en pulpa (Corguinha et al. 2012), posiblemente debido al contacto directo con el suelo. Los valores reportados por otros autores indican un rango desde 0.01 hasta 1.0 mg kg<sup>-1</sup> (Kabata-Pendias 2011, McLaughlin et al. 1997). Según el límite de Cd en tubérculos de papa propuesto por el Codex Alimentarius, se establece una concentración de 0.1 mg kg<sup>-1</sup> en materia fresca (Join FAO/WHO 2001), siendo su valor máximo en materia seca de 0.5 mg kg<sup>-1</sup>. Los valores encontrados sobrepasan este límite permitido. En Bolivia, en suelos con concentraciones de Cd elevadas se encontró hasta 4.77 mg Cd kg<sup>-1</sup> MS en tubérculos de papa (Oporto et al. 2007).

Los fertilizantes fosfatados son los fertilizantes que contribuyen en mayor cantidad en el incremento del cadmio en el suelo, por ser derivados de la roca fosfórica (Kabata-Pendias 2011, Raven y Loeppert 1997). Al incrementarse las dosis de P, las concentraciones de Cd en el tubérculo se incrementan (Sparrow et al. 1993, 1992, Fan et al. 2009). Bošković-Rakočević et al. (2017), encuentran que al adicionar diferentes fuentes de fertilizantes fosfatados se incrementa el contenido de Cd en los tubérculos de papa. Otro factor a tomar en consideración es la concentración de Cl<sup>-</sup> presente en el suelo y el agua de riego. La conductividad eléctrica (CEe) del suelo fue de 1.42 dS m<sup>-1</sup>; mientras que el agua de riego

presentó  $0.86 \text{ dS m}^{-1}$  y un nivel de  $\text{Cl}^-$  de  $3.5 \text{ meq L}^{-1}$ . El contenido de  $\text{Cl}^-$  no es tóxico para la planta, pero si es el anión en mayor proporción, siendo la fuente empleada de K, cloruro de potasio. Se conoce la interacción entre Cl y Cd, donde el  $\text{Cl}^-$  puede complejar al Cd para luego incrementarlo en la solución suelo (McLaughlin et al. 1994, Smolders et al. 1998), debido a que evita su adsorción a las superficies específicas de las arcillas y de la materia orgánica que reducen su solubilidad (Smolders 2001, Grant et al. 1999). En el cultivo de papa se encontró que a mayor salinidad, sobre todo dada por  $\text{Cl}^-$ , los tubérculos de papa incrementan su concentración de Cd (McLaughlin et al. 1997, Oporto et al. 2007). A pesar de que se reporta mayor solubilidad de Cd a pH ácidos (McLaughlin et al. 1997) el  $\text{Cl}^-$  tiene un efecto mayor que el pH. McLaughlin et al. (1994) encuentran altos contenidos de Cd en tubérculos de papa debido al efecto del Cl en la movilización de Cd dentro del suelo y su incremento en su disponibilidad para las plantas.

Las diferencias entre los tratamientos se observan en la Figura 18, donde la concentración de Cd en la cáscara tiende a disminuir a mayores dosis de fertilización con Zn edáfico, no se muestra lo mismo para la pulpa. Tanto en cáscara como en pulpa, las concentraciones son similares.

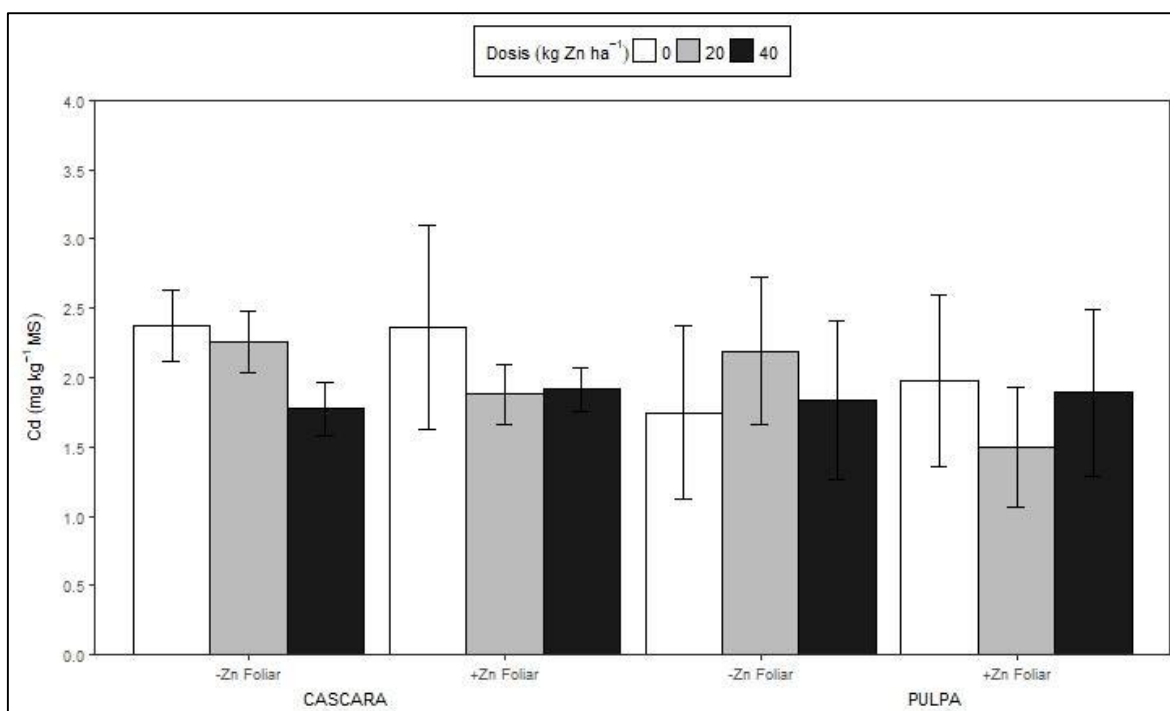


Figura 18: Efecto de la fertilización edáfica y foliar de Zn en la concentración de Cd ( $\text{mg kg}^{-1} \text{ MS}$ ) en pulpa y cáscara del tubérculo de papa.

Los resultados indican que las características físicas y químicas del suelo deben tener influencia en la disponibilidad del Cd en el suelo, en su movilidad y en la absorción por la planta. Analizar un solo factor como, por ejemplo, el contenido de Cd o la fertilización con Zn, no podría explicar claramente el contenido de Cd en los tubérculos (Fan et al. 2009).

## V. CONCLUSIONES

- La concentración de Zn en cáscara y pulpa del tubérculo de papa se incrementa significativamente cuando hay una fertilización foliar con Zn. La fertilización edáfica con zinc no tiene efecto significativo en la concentración de Zn en el tubérculo de papa. La fertilización con zinc no disminuyó la concentración de Cd en la planta de papa
- Ninguna de las dos fertilizaciones con zinc tuvo efecto en el rendimiento del cultivo de papa.
- Se logró elevar el contenido de zinc en el tubérculo hasta  $25 \text{ mg kg}^{-1} \text{ MS}$ . Las concentraciones de cadmio fueron de aproximadamente  $2 \text{ mg kg}^{-1} \text{ MS}$ .



## VI. RECOMENDACIONES

- En suelos de características similares al trabajado en el presente experimento, aplicaciones foliares de Zn pueden enriquecer con Zn los tubérculos, por lo que, sería recomendable que se adopte como práctica rutinaria.
- Incrementar el número de ensayos en suelos de diferentes características para evaluar las distintas respuestas.
- Realizar muestreos de suelos en las zonas paperas y determinar los contenidos de Zn para determinar los lugares de bajos contenidos y enfocar los trabajos de fertilización con este micronutriente.
- Evaluar otras dosis y fraccionamientos de fertilización foliar con Zn.
- Comparar con otros cultivares de papa de mayor periodo vegetativo.
- Evaluar contenidos de Cl, Fe, Mn, Cu en el suelo.
- Probar otras fuentes de zinc de mayor eficiencia.
- Evaluar la biofortificación en otros cultivos y para otros micronutrientes.
- Revisar diferentes métodos de determinación de Zn y Cd, tanto de la solución extractable como en el equipo de medición.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adriano, DC. 2001. Trace Elements in Terrestrial Environments (en línea). vol.3. 419-423 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21510-5>.

Alloway, BJ. 2008a. Micronutrients and Crop Production: An Introduction. En Alloway, BJ (ed.). Micronutrient Deficiencies in Global Crop Production. Springer. p. 1-40.

Alloway, BJ. 2008b. Zinc in soils and crop nutrition. Second edition, published by International Zinc Association. Brussels, Belgium.

Alloway, BJ. 2009. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. *Environmental Geochemistry and Health* 31(5): 537-548.

Andre, C.; Ghislain, M; Bertin, P; Oufier, M; Herrera, M del R; Hoffmann, L; Hausman, J-F; 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* 55:366-378. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf062740i>

Aytac, Z; Gulmezoglu, N; Sirel, Z; Tolay, I; Alkan Torun, A. 2014. The effect of zinc on yield, yield components and micronutrient concentrations in the seeds of safflower genotypes (*Carthamus tinctorius* L.). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 42(1):202-208.

Barak, P., & Helmke, P. 1993. The Chemistry of Zinc. En: A. D. Robson (Ed.). *Zinc in Soils and Plants* (pp. 1–13).

Bošković-Rakočević, Ljiljana; Pavlović, Rados.; Duric, Milena. 2017. Effect of phosphorus fertilizers on yield and cadmium content of potato tubers. *Acta Agriculturae Serbica* 23(43):37-46.

Broadley, M; Brown, P; Cakmak, I; Rengel, Z; Zhao, F. 2012. Function of Nutrients: Micronutrients. En Marschner, P (ed.). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* p. 191-250 DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.X0001-5>.

Cakmak, I; Kalayci, M; Kaya, Y; Torun, AA; Aydin, N; Wang, Y; Arisoy, Z; Erdem, H; Yazici, A; Gokmen, O; Ozturk, L; Horst, WJ. 2010a. Biofortification and localization of zinc in wheat grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 58(16): 9092-9102.

Cakmak, I; Pfeiffer, WH; McClafferty, B. 2010b. REVIEW: Biofortification of Durum Wheat with Zinc and Iron. *Cereal Chemistry* 87(1): 10-20.

Cakmak, I. 2008. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? *Plant and Soil* 302(1-2): 1-17.

Cakmak, I. 2010. Biofortification of cereals with zinc and iron through fertilization strategy. *Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science: Soil solutions for a changing world, Brisbane, Australia, 1-6 August 2010. Congress Symposium 5: Micronutrients in soils and plants in relation to crop and human health* 2(3): 4-6.

Chaney, RL. 1993. Zinc Phytotoxicity. En Robson, A. (ed). *Zinc in Soils and Plants* p. 135-150.

Chaney, RL. 2010. Cadmium and Zinc. En Hooda, P (ed.). *Trace Elements in Soils*. p. 409-439

Chattha, MU; Hassan, MU; Khan, I; Chattha, MB; Mahmood, A; Chattha, MU; Nawaz, M; Subhani, MN; Kharal, M; Khan, S. 2017. Biofortification of Wheat Cultivars to Combat Zinc Deficiency. *Frontiers in Plant Science* 8(March): 281.

Corguinha, APB; Gonçalves, VC; de Souza, GA; de Lima, WEA; Penido, ES; Pinto, CABP; Francisco, EAB; Guilherme, LRG. 2012. Cadmium in potato and soybeans: Do phosphate fertilization and soil management systems play a role? *Journal of Food Composition and Analysis* 27(1):32-37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2012.05.001>.

Das, S; Green, A. 2016. Zinc in crops and human health. Eds. U Singh; CS Praharaj; SS Singh; NP Singh. 31-40 p.

Degryse, F; Baird, R; McLaughlin, MJ. 2014. Diffusion and solubility control of fertilizer-applied zinc: chemical assessment and visualization. *Plant and Soil* 386(1-2):195-204. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2266-7>.

Egúsquiza, R. 2014. *La papa en el Perú. 2da Edición. Oficina Académica de Extensión y Extensión de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. 200 p.*

Eriksson, J; Oborn, I; Jansson, G; Andersson, A. 1996. Factors Influencing Cd-Content in Crops. Results from Swedish field investigations. *Swedish Journal of Agricultural Research* 26:125-133.

Fan, J-L; Ziadi, N; Bélanger, G; Parent, LÉ; Cambouris, Hu, Z-Y. 2009. Cadmium accumulation in potato tubers produced in Quebec. *Canadian Journal of Soil Science* 89(2):435-443. DOI: <https://doi.org/10.4141/cjss08069>.

FAO. 2009. *International Year of the Potato 2008, New Light on a Hidden Treasure*. FAO, Rome, Italy. 136 pp.

FAO. 2013. The state of food and agriculture, 2013. v.2, 313-4 p.

Figueiredo, DD; Barros, PM; Cordeiro, AM; Serra, TS; Lourenço, T; Chander, S; Oliveira, MM; Saibo, NJM. 2012. Seven zinc-finger transcription factors are novel regulators of the stress responsive gene OsDREB1B (en línea). *Journal of Experimental Botany* 63(10):3643-3656. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/ers035>

Gabriel J.; Angulo, A; Botello, R; Casazola, JL; Velasco, J; S., V; Rodríguez, F. 2015. Agronomic biofortificación in two native potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.). *Revista Latinamericana de la Papa* 19(2): 1-17.

Govindaraj, M; Pandian, K; Agricultural, D; Arunachalam, P. 2011. Implication of Micronutrients in Agriculture and Health with Special Reference to Iron and Zinc. *International Journal of Agricultural Management & Development* 1(4):207-220.

Grant, CA; Bailey, LD; McLaughlin, MJ; Singh, BR. 1999. Management Factors which Influence Cadmium Concentrations in Crops. En: McLaughlin, MJ; Singh, BR (eds.). *Cadmium in Soils and Plants*. Springer. p. 151-187.

Hafeez, B; Khanif, YM; Saleem, M. 2013. Role of Zinc in Plant Nutrition-A Review (en línea). *American Journal of Experimental Agriculture* 3(2):374-391.

Haslett, BS; Reid, RJ; Rengel, Z. 2001. Zinc mobility in wheat: Uptake and distribution of zinc applied to leaves or roots. *Annals of Botany* 87(3):379-386. DOI: <https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1349>.

Havlin, J.; Beaton, J.; Tisdale, S. y Nelson, W. 1999. Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management. Sexta Edición.

Instituto Nacional de Estadística Informática (INEI). 2009. Encuesta Demográfica y de Salud Familiar. ENDES. Dirección Técnica de Demografía e Indicadores Sociales. Lima – Perú.

Instituto Nacional de Estadística Informática (INEI). 2012. Perú: Consumo Per Cápita de los Principales Alimentos 2008-2009. Dirección Técnica de Demografía e Indicadores Sociales. Lima – Perú.

Instituto Nacional de Estadística Informática (INEI). 2014. Nota de prensa N° 082: producción de papa creció 45 por ciento. Revisado en: <http://www.inei.gob.pe/prensa/noticias/produccion-de-papa-crecio-45-7582/>. Fecha: 8 de set. de 17

Instituto Nacional de Estadística Informática (INEI). 2016. Perú Indicadores de Resultados de los Programas Presupuestales, Primer Semestre 2016.

Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA). 1995. Mapa ecológico del Perú. Guía explicativa. 220 pp.

International Zinc Association (IZA). 2009. Zinc in fertilizers. Essentials for crops, essentials for life. IZA Publications. Brussels

Jiao, Y; Grant, CA; Bailey, LD. 2004. Effects of phosphorus and zinc fertilizer on cadmium uptake and distribution in flax and durum wheat. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 84(8): 777-785.

Joint FAO/WHO. 2001. Report of the 33<sup>rd</sup> Session of the Codex Committee on Food Additives and Contaminants. Hague, The Netherlands, p. 285.

Kabata-Pendias, A. 2011. Trace elements in soils and plants (en línea). Fourth Edi. 1-534 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b10158-25>

Köleli, N; Eker, S; Cakmak, I. 2004. Effect of zinc fertilization on cadmium toxicity in durum and bread wheat grown in zinc-deficient soil. *Environmental Pollution* 131(3):453-459. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.02.012>.

Kromann, P; Valverde, F; Alvarado, S; Velez, R; Pisuna, J; Potosi, B; Taipe, A; Caballero, D; Cabezas, A; Devaux, A. 2017. Can Andean potatoes be agronomically biofortified with iron and zinc fertilizers? *Plant and Soil* 2017: 1-18.

Lindsay, W. 1991. Inorganic Equilibria Affecting Micronutrients in Soils. En Mortvedt, J. (ed.). *Micronutrients in agriculture*.

Loneragan, J; Webb, M. 1993. Interaction Between Zinc and Other Nutrients Affecting the Growth of Plants. En Robson, A (ed.). *Zinc in Soils and Plants*. p. 119-134.

Longnecker, N; Robson, A. 1993. Distribution and Transport of Zinc in Plants. En Robson, A (ed.). *Zinc in Soils and Plants*. p. 79-91.

López-Bellido, FJ; Poblaciones, MJ; Rodrigo, S; Bellido, LL. 2014. Biofortificación agronómica de los cultivos: el caso del selenio en España. *Vida Rural* 2014: 6.

López de Romaña, D; Castillo D, C; Diazgranados, D. 2010. El Zinc En La Salud Humana - II (en línea). *Revista chilena de nutrición* 37(2):240-247. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0717-75182010000200014>.

Lungu, OI; Simunji, S; Cakmak, I. 2008. Effects of Soil and Foliar Applications of Zinc on Grain Zinc Concentrations of Maize, Sorghum and Wheat in Zambia.

Manzeke, GM; Mtambanengwe, F; Nezomba, H; Mapfumo, P. 2014. Zinc fertilization influence on maize productivity and grain nutritional quality under integrated soil fertility management in Zimbabwe. *Field Crops Research* 166: 128-136.

Marschner, H. 1993. Zinc Uptake from Soils. In Robson, A (ed.). In: *Zinc in Soils and Plants*. p. 59-78.

McLaughlin, MJ; Maier, NA; Freeman, K; Tiller, KG; Williams, CMJ; Smart, MK. 1995. Effect of potassic and phosphatic fertilizer type, fertilizer Cd concentration and zinc rate on cadmium uptake by potatoes. *Fertilizer Research* 40(1978):63-70.

McLaughlin, MJ; Maier, NA; Rayment, GE; Sparrow, LA; Berg, G; McKay, A; Milham, P; Merry, RH; Smart, MK. 1997. Cadmium in Australian potato tubers and soils. *Journal of Environmental Quality* 26:1644-1649. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq1997.00472425002600060026x>.

McLaughlin, MJ; Palmer, LT; Tiller, KG; Beech, TA; Smart, MK. 1994. Increased Soil Salinity Causes Elevated Cadmium Concentrations in Field-Grown Potato Tubers (en línea). *Journal of Environment Quality* 23(5):1013. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq1994.00472425002300050023x>.

Mengel, K; Kirkby, E. 2001. *Principles of plant nutrition*. 5th Edition. 846 p. DOI: <https://doi.org/10.1038/278101a0>.

Mertens, J., & Smolders, E. (2013). Zinc. En B. J. Alloway (Ed.), *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*. [https://doi.org/DOI.10.1007/978-94-007-4470-7\\_17](https://doi.org/DOI.10.1007/978-94-007-4470-7_17)

Ministerio de Salud (MINSA). 2013. Documento técnico: Plan Nacional para la reducción de la desnutrición crónica infantil y la prevención de la anemia en el país, periodo 2014-2016. 106 p.

MINAGRI. 2011. *La papa nuestra de cada día 2011*. Oficina de Estudios Económicos y Estadísticos (OEEE).

MINAGRI. 2015. *Anuario Estadístico de Producción Agrícola y Ganadera 2015*. Sistema Integrado de Estadísticas Agrarias. Revisado en: <http://siea.minagri.gob.pe/siea/?q=publicaciones/anuarios-estadisticos>. Fecha: 8 de set. de 17

MINAGRI. 2017. *Papa: Características de la Producción Nacional y de la Comercialización en Lima Metropolitana*. Dirección General De Políticas Agrarias. Dirección de Estudios Económicos e Información Agraria.

Mitra, G. 2015. Regulation of Nutrient Uptake by Plants: A Biochemical and Molecular Approach. Springer India. pp 195.

Mousavi, SR; Galavi, M; Goudarz, A. 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.

Nan, Z; Li, J; Zhang, J; Cheng, G. 2002. Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field conditions. The Science of the total environment 285:187-195.

Navarro, S; Navarro, G. 2003. Química agrícola. Ediciones Mundi-Prensa. 1-5 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>.

Noulas, C; Tziouvalekas, M; Karyotis, T. 2018. Zinc in soils, water and food crops (en línea). Journal of Trace Elements in Medicine and Biology 49 (October 2017):252-260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.02.009>.

Oliver, DP; Hannam, R; Tiller, KG; Wilhelm, NS; Merry, RH; Cozens, GD. 1994. The Effects of Zinc Fertilization on Cadmium Concentration in Wheat Grain. Journal of Environment Quality 23(1974):705. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq1994.00472425002300040013x>.

Oliver, DP; Wilhelm, NS; McFarlane, J.; Tiller, KG; Cozens, GD. 1999. Effect of soil and foliar applications of zinc on cadmium concentration in wheat grain. Australian Journal of Experimental Agriculture 37:677-681.

Oporto, C; Vandecasteele, C; Smolders, E. 2007. Elevated cadmium concentrations in potato tubers due to irrigation with river water contaminated by mining in Potosí, Bolivia. Journal of environmental quality 36(4):1181-1186. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2006.0401>.

Ortiz, R. 2010. La biofortificación de los cultivos para combatir la anemia y las deficiencias de micronutrientes en el Perú. Programa Mundial de Alimentos 2010.

Ozkutlu, F; Torun, B; Cakmak, I. 2006. Effect of zinc humate on growth of soybean and wheat in zinc-deficient calcareous soil. Communications in Soil Science and Plant Analysis 37(15-20):2769-2778. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103620600832167>.

Palmgren, MG; Clemens, S; Williams, LE; Krämer, U; Borg, S; Schjørring, JK; Sanders, D. 2008. Zinc biofortification of cereals: problems and solutions. Trends in Plant Science 13(9): 464-473.

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(1-2):131-141. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1211-x>.

Qaswar, M; Hussain, S; Rengel, Z. 2017. Zinc fertilisation increases grain zinc and reduces grain lead and cadmium concentrations more in zinc-biofortified than standard wheat cultivar (en línea). *Science of the Total Environment* 605-606:454-460. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.242>.

Raven, KP; Loeppert, RH. 1997. Trace Element Composition of Fertilizers and Soil Amendments. *Journal of Environment Quality* 26:551-557. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq1997.00472425002600020028x>.

Reyes, M; Gómez-Sánchez, I; Espinoza Barrientos, C; Bravo Rebatta, F. 2009. Tablas peruanas de composición de alimentos. Ministerio de Salud del Perú.

R Core Team. 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.

Sadeghzadeh, B. 2013. A review of zinc nutrition and plant breeding. *Journal of soil science and plant nutrition* 13(ahead): 905-927.

Saifullah; Sarwar, N; Bibi, S; Ahmad, M; Ok, YS. 2014. Effectiveness of zinc application to minimize cadmium toxicity and accumulation in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Environmental Earth Sciences* 71(4):1663-1672. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2570-1>.

Sarwar, N; Ishaq, W; Farid, G; Shaheen, MR; Imran, M; Geng, M; Hussain, S. 2015. Zinc-cadmium interactions: Impact on wheat physiology and mineral acquisition (en línea). *Ecotoxicology and Environmental Safety* 122:528-536. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.09.011>.

Sharma, A; Patni, B; Shankhdhar, D; Shankhdhar, SC. 2013. Zinc - An Indispensable Micronutrient. *Physiology and Molecular Biology of Plants* 19(1): 11-20.

Slamet-Loedin, IH; Johnson-Beebout, SE; Impa, S; Tsakirpaloglou, N. 2015. Enriching rice with Zn and Fe while minimizing Cd risk (en línea). *Frontiers in Plant Science* 6(March):1-9. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00121>.

Smolders, E. 2001. Cadmium uptake by plants. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health* 14(2):177-183.



Smolders, E; Lambregts, RM; McLaughlin, MJ; Tiller, KG. 1998. Effect of Soil Solution Chloride on Cadmium Availability to Swiss Chard (en línea). *Journal of Environment Quality* 27(2):426. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700020025x>.

Smolders, E., & Mertens, J. 2013. Cadmium. En B. J. Alloway (Ed.), *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7_10)

Sparrow, L; Chapman, KSR; Parsley, D; Hardman, PR; Cullen, B. 1992. Response of potatoes (*Solanum tuberosum* cv. Russet Burbank) to band-placed and broadcast high cadmium phosphorus fertiliser on heavily cropped krasnozems in north-western Tasmania. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 32:113-119.

Sparrow, LA; Salardini, AA; Bishop, AC. 1993. Field studies of cadmium in potatoes (*Solanum tuberosum* L.) I. Effects of lime and phosphorus on cv. Russet Burbank. *Australian Journal of Agricultural Research* 44:855-861. DOI: <https://doi.org/10.1071/AR9930845>.

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.

Tekalign, T; Hammes, PS. 2005. Growth and productivity of potato as influenced by cultivar and reproductive growth II. Growth analysis, tuber yield and quality. *Scientia Horticulturae* 105:29-44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2005.01.021>.

Uminska, R. 1993. Cadmium contents of cultivated soils exposed to contamination in Poland. *Environmental Geochemistry and Health* 15(1):15-19. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00146288>.

USDA-NCRS. 2014. *Claves para la Taxonomía de Suelos*. Décimo segunda edición, 410 p.

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.

Villagarcía, S; Aguirre, G. 2014. *Manual de uso de fertilizantes para las condiciones del Perú*. p. 168.

Walworth, J.; Muniz, J. 1993. A compendium of tissue nutrient concentrations for field-grown potatoes. *American Potato Journal* 70:579-597.

- Wang, P; Kopittke, P; McGrath, SP; Zhao, F.J. 2017. Cadmium transfer from soil to plants and its potential risk to human health. In Singh, BR; McLaughlin, MJ; Brevik, EC (eds.). *Catena*. p. 138-147.
- Westermann, DT. 2005. Nutritional Requirements of Potatoes. *American Journal of Potato Research* 82:301-307.
- White, PJ; Bradshaw, JE; Dale, MFB; 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; Hammond, JP; Ramsay, G; Subramanian, NK; Thompson, J; Wright, G. 2012. Bio-fortification of potato tubers using foliar zinc-fertiliser. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 87(2): 123-129.
- White, PJ; Broadley, MR. 2011. Physiological limits to zinc biofortification of edible crops. *Frontiers in plant science* 2(November): 80.
- White, PJ; Thompson, JA; Wright, G; Rasmussen, SK. 2016. Biofortifying Scottish potatoes with zinc. *Plant and Soil* 2016: 1-15.
- White, PJ; Whiting, SN; Baker, AJ; Broadley, MR. 2002. Does zinc move apoplastically to the xylem in roots of *Thlaspi caerulescens*? *New Phytologist* 153:201-207.
- 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*). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 85:720-726. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.2051>.
- Zhang, YQ; Sun, YX; Ye, YL; Karim, MR; Xue, YF; Yan, P; Meng, QF; Cui, ZL; Cakmak, I; Zhang, FS; Zou, CQ. 2012. Zinc biofortification of wheat through fertilizer applications in different locations of China. *Field Crops Research* 125: 1-7.
- Zhao, A qing; Tian, X hong; Cao, Y xian; Lu, X chun; 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. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.6518>.
- 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; Mujahid, MY; 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: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable rendimiento

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Block	3	116.9	38.95	1.645	0.221
Dosis	2	25.4	12.71	0.537	0.595
Apfoliar	1	20.4	20.38	0.861	0.368
Dosis:Apfoliar	2	8.4	4.19	0.177	0.839
Residuals	15	355.2	23.68		

MSerror	Mean	SDev	Min	Max	Num	CV
23.68	31.07	4.78	21.67	41.41	24	15.66

#### Comparación de medias: HSD – Test

Dosis	Apfoliar	mean	min	max	r	std	ste	sg
cero	CON	28.611	24.754	31.443	4	2.809	1.405	a
cero	SIN	32.027	26.612	37.484	4	6.197	3.099	a
cuarenta	CON	31.750	26.267	37.897	4	4.794	2.397	a
cuarenta	SIN	33.297	29.459	41.406	4	5.467	2.733	a
veinte	CON	30.079	21.667	39.054	4	7.140	3.570	a
veinte	SIN	30.645	27.858	34.216	4	2.684	1.342	a

ANEXO 2: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable materia fresca total

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Block	3	226666	75555	0.691	0.572
Dosis	2	16747	8374	0.077	0.927
Apfoliar	1	85463	85463	0.781	0.391
Dosis:Apfoliar	2	166977	83489	0.763	0.483
Residuals	15	1640825	109388		

<b>MSerror</b>	<b>Mean</b>	<b>SDev</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Num</b>	<b>CV</b>
109388.32	1393.03	304.79	870.50	2024.17	24	23.74

Comparación de medias: HSD – Test

Dosis	Apfoliar	mean	min	max	r	std	ste	sg
Cero	CON	1274.333	870.500	2024.16	4	531.175	265.587	a
Cero	SIN	1439.542	1110.333	1691.667	4	256.210	128.105	a
Cuarenta	CON	1271.000	1031.000	1654.833	4	267.986	133.993	a
Cuarenta	SIN	1567.833	1345.667	1785.833	4	207.722	103.861	a
Veinte	CON	1454.750	1173.833	1714.500	4	276.628	138.314	a
Veinte	SIN	1350.750	1077.833	1747.333	4	288.477	144.238	a

ANEXO 3: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable materia seca total

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Block	3	12243	4081	1.264	0.322
Dosis	2	2515	1258	0.390	0.684
Apfoliar	1	7941	7941	2.460	0.138
Dosis:Apfoliar	2	13488	6744	2.089	0.158
Residuals	15	48426	3228		

MSerror	Mean	SDev	Min	Max	Num	CV
3228.38	266.37	60.65	152.03	399.79	24	21.33

Comparación de medias: HSD – Test

Dosis	Apfoliar	mean	min	max	r	std	ste	sg
cero	CON	242.355	152.029	399.795	4	112.847	56.424	a
cero	SIN	261.579	236.985	297.274	4	25.707	12.853	a
cuarenta	CON	221.715	197.898	243.588	4	19.371	9.686	a
cuarenta	SIN	322.810	296.397	351.010	4	26.944	13.472	a
veinte	CON	280.458	223.709	320.899	4	40.906	20.453	a
veinte	SIN	269.281	209.970	359.368	4	63.663	31.832	a

ANEXO 4: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable materia seca de tubérculos

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Block	3	8389	2796	0.993	0.423
Dosis	2	2207	1104	0.392	0.682
Apfoliar	1	6801	6801	2.416	0.141
Dosis:Apfoliar	2	11785	5893	2.093	0.158
Residuals	15	42232	2815		

MSerror	Mean	SDev	Min	Max	Num	CV
2815.49	227.40	55.72	122.50	356.08	24	23.33

Comparación de medias: HSD – Test

Dosis	Apfoliar	mean	min	max	r	std	ste	sg
Cero	CON	207.836	122.500	356.082	4	106.509	53.255	a
cero	SIN	219.841	199.584	260.609	4	28.691	14.346	a
cuarenta	CON	186.254	165.836	216.214	4	21.293	10.646	a
cuarenta	SIN	281.689	267.055	301.378	4	15.035	7.517	a
veinte	CON	237.606	197.776	252.839	4	26.641	13.320	a
veinte	SIN	231.172	177.121	312.309	4	57.595	28.798	a

ANEXO 5: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable materia seca de follaje

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Block	3	576.5	192.16	1.627	0.225
Dosis	2	27.6	13.81	0.117	0.890
Apfoliar	1	44.1	44.13	0.374	0.550
Dosis:Apfoliar	2	169.1	84.57	0.716	0.505
Residuals	15	1771.5	118.10		

<b>MSerror</b>	<b>Mean</b>	<b>SDev</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Num</b>	<b>CV</b>
118.10	38.97	10.61	22.87	68.97	24	27.89

Comparación de medias: HSD – Test

Dosis	Apfoliar	mean	min	max	r	std	ste	sg
cero	CON	34.519	29.529	43.712	4	6.379	3.190	a
cero	SIN	41.737	36.665	51.865	4	7.078	3.539	a
cuarenta	CON	35.461	27.374	47.704	4	8.707	4.353	a
cuarenta	SIN	41.121	22.871	55.606	4	14.581	7.291	a
veinte	CON	42.852	25.933	68.966	4	19.085	9.543	a
veinte	SIN	38.109	32.849	47.059	4	6.261	3.131	a

ANEXO 6: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable Zn foliar

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Block	3	218	73	0.608	0.620
Dosis	2	355	177	1.482	0.259
Apfoliar	1	55729	55729	465.917	1.04e-12 ***
Dosis:Apfoliar	2	192	96	0.801	0.467
Residuals	15	1794	120		
---					
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

MSerror	Mean	SDev	Min	Max	Num	CV
119.61	117.83	50.34	55.00	182.75	24	9.28

Comparación de medias: HSD – Test

Dosis	Apfoliar	mean	min	max	r	std	ste	sg
cero	CON	174.688	165.000	182.750	4	8.179	4.089	a
cero	SIN	71.688	61.500	80.750	4	8.097	4.048	b
cuarenta	CON	158.93	149.750	169.750	4	9.953	4.976	a
cuarenta	SIN	69.750	59.500	85.500	4	11.610	5.805	b
veinte	CON	164.438	154.500	174.250	4	10.639	5.319	a
veinte	SIN	67.500	55.000	84.750	4	13.831	6.915	b



ANEXO 7: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable Zn en cáscara

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Block	3	483.7	161.2	5.509	0.00939 **
Dosis	2	18.2	9.1	0.312	0.73679
Apfoliar	1	390.0	390.0	13.325	0.00237 **
Dosis:Apfoliar	2	16.2	8.1	0.277	0.76220
Residuals	15	439.0	29.3		
---					
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

MSerror	Mean	SDev	Min	Max	Num	CV
29.27	45.41	7.65	28.00	59.00	24	11.92

Comparación de medias: HSD – Test

Dosis	Apfoliar	mean	min	max	r	std	ste	sg
Cero	CON	47.375	39.000	51.500	4	5.793	2.897	a
cero	SIN	41.188	28.000	50.750	4	10.359	5.179	a
cuarenta	CON	49.438	46.000	53.750	4	3.596	1.798	a
cuarenta	SIN	41.625	35.000	53.000	4	7.973	3.986	a
veinte	CON	51.500	45.000	59.000	4	5.972	2.986	a
veinte	SIN	41.312	32.000	49.000	4	7.386	3.693	a

ANEXO 8: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable Zn en pulpa

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Block	3	228.78	76.26	16.825	4.59e-05 ***
Dosis	2	0.26	0.13	0.028	0.972
Apfoliar	1	255.13	255.13	56.289	1.88e-06 ***
Dosis:Apfoliar	2	14.22	7.11	1.569	0.241
Residuals	15	67.99	4.53		
---					
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

MSerror	Mean	SDev	Min	Max	Num	CV
4.53	22.11	4.96	12.25	29.00	24	9.63

Comparación de medias: HSD – Test

Dosis	Apfoliar	mean	min	max	r	std	ste	sg
cero	CON	24.812	18.250	29.000	4	4.670	2.335	a
cero	SIN	19.562	12.250	25.000	4	5.332	2.666	b
cuarenta	CON	26.312	20.250	29.000	4	4.150	2.075	a
cuarenta	SIN	17.625	13.500	19.000	4	2.750	1.375	b
veinte	CON	25.000	20.000	29.000	4	3.742	1.871	a
veinte	SIN	19.375	16.500	23.000	4	3.146	1.573	b

ANEXO 9: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable Cd foliar

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Block	3	0.529	0.1762	0.573	0.641
Dosis	2	0.141	0.0703	0.229	0.798
Apfoliar	1	0.128	0.1276	0.415	0.529
Dosis:Apfoliar	2	1.255	0.6276	2.041	0.164
Residuals	15	4.612	0.3075		

MSerror	Mean	SDev	Min	Max	Num	CV
0.31	3.97	0.54	2.75	5.00	24	13.97

Comparación de medias: HSD – Test

Dosis	Apfoliar	mean	min	max	r	std	ste	sg
Cero	CON	3.812	3.500	4.250	4	0.375	0.187	a
cero	SIN	4.312	3.750	5.000	4	0.657	0.329	a
cuarenta	CON	4.125	3.750	4.500	4	0.323	0.161	a
cuarenta	SIN	3.625	2.750	4.000	4	0.595	0.298	a
veinte	CON	3.750	3.250	4.500	4	0.540	0.270	a
veinte	SIN	4.188	3.500	5.000	4	0.625	0.312	a

ANEXO 10: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable Cd en cáscara

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Block	3	3.287	1.0957	2.752	0.0791 .
Dosis	2	1.111	0.5553	1.395	0.2783
Apfoliar	1	0.044	0.0442	0.111	0.7436
Dosis:Apfoliar	2	0.288	0.1440	0.362	0.7023
Residuals	15	5.971	0.3981		
---					
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

MSerror	Mean	SDev	Min	Max	Num	CV
0.40	2.09	0.68	1.10	4.50	24	30.12

Comparación de medias: HSD – Test

Dosis	Apfoliar	mean	min	max	r	std	ste	sg
cero	CON	2.362	1.100	4.500	4	1.481	0.740	a
cero	SIN	2.377	1.850	3.080	4	0.513	0.257	a
cuarenta	CON	1.915	1.480	2.230	4	0.315	0.157	a
cuarenta	SIN	1.775	1.300	2.250	4	0.388	0.194	a
veinte	CON	1.877	1.330	2.350	4	0.424	0.212	a
veinte	SIN	2.260	1.880	2.750	4	0.448	0.224	a

ANEXO 11: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable Cd en pulpa

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Block	3	21.010	7.003	50.719	4.37e-08 ***
Dosis	2	0.002	0.001	0.008	0.9918
Apfoliar	1	0.113	0.113	0.822	0.3791
Dosis:Apfoliar	2	0.964	0.482	3.490	0.0569 .
Residuals	15	2.071	0.138		

---

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

MSerror	Mean	SDev	Min	Max	Num	CV
0.14	1.86	1.02	0.50	3.75	24	20.02

Comparación de medias: HSD – Test

Dosis	Apfoliar	mean	min	max	r	std	ste	sg
cero	CON	1.978	0.950	3.750	4	1.230	0.615	a
cero	SIN	1.748	0.730	3.500	4	1.241	0.621	a
cuarenta	CON	1.890	0.580	3.500	4	1.212	0.606	a
cuarenta	SIN	1.837	0.950	3.500	4	1.136	0.568	a
veinte	CON	1.495	0.500	2.500	4	0.862	0.431	a
veinte	SIN	2.190	1.400	3.750	4	1.067	0.533	a

ANEXO 12: Análisis de Varianza (ANVA) para la variable extracción de Zn

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Block	3	18084	6028	10.583	0.000544 ***
Dosis	2	896	448	0.786	0.473532
ApFoliar	1	3963	3963	6.957	0.018645 *
Dosis:Apfoliar	2	768	384	0.674	0.524258
Residuals	15	8544	570		
---					
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

MSerror	Mean	SDev	Min	Max	Num	CV
569.62	142.63	37.45	63.78	234.06	24	16.73

Comparación de medias: HSD – Test

Dosis	ApFoliar	mean	min	max	r	std	ste	sg
cero	CON	142.705	106.369	163.068	4	25.209	12.604	a
cero	SIN	127.906	63.783	155.778	4	43.526	21.763	a
veinte	CON	170.908	88.582	234.059	4	63.740	31.870	a
veinte	SIN	129.611	104.889	167.836	4	27.762	13.881	a
cuarenta	CON	152.841	121.382	175.481	4	23.071	11.536	a
cuarenta	SIN	131.835	90.200	164.024	4	31.313	15.657	a

ANEXO 13: Registro fotográfico



Semilla botánica de papa



Parcela experimental



Siembra del campo



Fertilización del sulfato de zinc heptahidratado





Campo experimental 45 días después de la siembra



Campo experimental 56 días después de la siembra



Campo experimental 70 días después de la siembra



Campo experimental 77 días después de la siembra



Procesamiento de plantas



Cosecha del campo experimental



Tubérculos cosechados



Pulpa de papa



Cáscara de papa



Tubérculos calidad extra



Perfil del suelo

ANEXO 14: Cartilla de evaluación del perfil del suelo

Calicata	MO-01	Pedregosidad	No pedregoso
Localidad	Lima	Permeabilidad	Moderada
Propietario	UNALM	Drenaje	Moderado
Fisiografía	Llanura aluvial - terraza media plana	Erosión	Ninguna
COD Fisiografía	tmp	Microrelieve	ondulado
Zona de vida		Pendiente (campo)	<4%
Clave zona de vida		Pendiente (DEM)	
Uso actual de la Tierra	Cultivos anuales (papa)	Régimen humedad	Ustico
Material parental	Aluvial	Régimen temperatura	Isotérmico

Profundidad (cm)		0-16	16-40	40-71	71-89	89-104	104-153
Horizontes y Características							
Color (húmedo)		10 YR 3/2	7.5 YR 3/2	7.5 YR 3/3	7.5 YR 4/2	5 YR 4/2	10 YR 4/2
Moteado					10 YR 5/6 (40%)	10 YR 4/4 (10%)	10 YR 4/4 (40%)
Fragmentos gruesos	Tipo		Gravas	Gravas			
	%		5	10			
Estructura		grmf-1	grm-1	MA	MA	MA	GS
Consistencia		friable	Lig. firme	Lig. firme	Lig. firme	Firme	friable
Raíces		pocas finas	muy pocas finas				

pH		7.96	8.18	8.13	8	8.12	8.21
CE	dS m <sup>-1</sup>	0.42	0.23	0.31	0.29	0.29	0.29
CaCO <sub>3</sub>	%	3.7	2.9	11	1	5.3	8.8
MO	%	1.46	0.15	0.06	0.06	0.11	0.07
C orgánico	%	0.85	0.09	0.03	0.03	0.06	0.04
P disponible	mg kg <sup>-1</sup>	31	20.1	3.7	4.4	5.1	4.6
K disponible	mg kg <sup>-1</sup>	332	366	171	163	159	88
Arena	%	37	45	9	15	13	55
Limo	%	36	28	42	58	36	34
Arcilla	%	27	27	49	27	51	11
Clase textural		Fr.Ar.	Fr.Ar.	Ar.L.	Fr.Ar.L	Ar.	Fr.A
CIC	cmolc kg <sup>-1</sup>	12.8	11.2	15.52	18.4	19.84	6.72
Ca cambiante	cmolc kg <sup>-1</sup>	9.05	7.53	12.07	14.89	16.09	4.79
Mg cambiante	cmolc kg <sup>-1</sup>	2.5	2.42	2.57	2.52	2.85	1.42

K cambiabile	cmolc kg <sup>-1</sup>	0.95	0.94	0.48	0.6	0.54	0.31
Na cambiabile	cmolc kg <sup>-1</sup>	0.3	0.31	0.41	0.39	0.37	0.2
Al + H cambiabile	cmolc kg <sup>-1</sup>	0	0	0	0	0	0



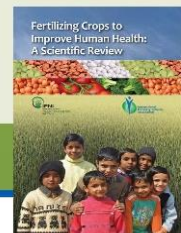
## ANEXO 15: Cronograma de actividades

Actividad	Fecha	Días después de la siembra
Preparación del terreno	9/06/2017	-10
Marcado del terreno	15/06/2017	-4
Siembra	19/06/2017	0
Fertilización edáfica N P K Zn	19/06/2017	0
Aporque	19/07/2017	30
Segunda fertilización N K	19/07/2017	30
Primera fertilización foliar Zn	4/08/2017	45
Segunda fertilización foliar Zn	15/08/2017	56
Tercera fertilización foliar Zn	22/08/2017	63
Cuarta fertilización foliar Zn	31/08/2017	70
Muestreo de hojas	19/09/2017	90
Muestreo de plantas	9/10/2017	110
Corte del follaje	14/10/2017	118
Cosecha	18/10/2017	122
Procesamiento de tubérculos	20/10/2017	124
Análisis químico en laboratorio	30/10/2017	134

## ANEXO 16: Los cultivos, animales y personas necesitan 16 nutrientes



[www.ipni.net](http://www.ipni.net) [www.fertilizer.org](http://www.fertilizer.org)



# Fertilizar los Cultivos para Mejorar la Salud Humana

Los países están desarrollando con éxito acuerdos mundiales para desarrollar la fertilización con macro y micronutrientes

**Zn B S**

**India**

Rendimientos hasta cuatro veces superiores para pequeños agricultores

En el estado de Karnataka, a través del programa gubernamental Bhoochetana, en colaboración con ICRIAT, los fertilizantes fueron biofortificados con zinc, boro y azufre. Los rendimientos de los cultivos de secano se incrementaron hasta un 345% en girasol, un 230% en mijo, un 240% en cacahuete, un 190% en maíz, un 110% en soja y un 27% en sorgo.

**Se**

**Finlandia**

Combatiendo las enfermedades del corazón

A partir de 1984, el Gobierno hizo obligatoria la adición de selenio a todos los fertilizantes multinutrientes, con el fin de combatir los problemas de corazón.

**I**

**China**

Erradicando las deficiencias de yodo mediante la fertilización

Añadir iodato potásico al canal de riego en la provincia de Xinjiang dio lugar a un triplicado de sus niveles de yodo, una reducción de un 90% en la mortalidad infantil y casi la total eliminación de los desórdenes por deficiencia de yodo en la zona.

**Zn Cu Mo**

**Turquía, India, Australia & Sudáfrica**

Más nutrientes en los granos y mayor producción en regiones semiáridas

La deficiencia de Zinc en trigo generalmente ocurre cuando el aporte de agua al suelo es insuficiente, debido a precipitaciones limitadas y a una distribución irregular de las lluvias. En regiones semiáridas, mantener en el suelo una cantidad elevada de Zn disponible para la planta contribuye a una mayor concentración de Zn en el grano y además incrementa el rendimiento del cultivo. En los años 50, en el sur de Australia se inició el cultivo de más de 8 millones de ha de terreno para producción de cereal y pastos, tras identificar las deficiencias de micronutrientes como un gran freno al rendimiento de las cosechas.

**Se**

**Australia & Nueva Zelanda**

Alimentos funcionales mejorados con selenio

La biofortificación del trigo mediante fertilizantes con selenio ayuda a mejorar los niveles de nutrientes y a poner en el mercado un trigo con beneficios para la salud humana. El brócoli es uno de los alimentos anticancerígenos más prometedores.

**B Cu I Mo Se S Zn**

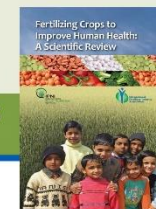
Boro Cobre Iodo Molibdeno Selenio Azufre Zinc

**Las prácticas de fertilización inteligentes proporcionan los micronutrientes necesarios para unas plantas sanas y para una nutrición humana equilibrada.**



[www.ipni.net](http://www.ipni.net)

[www.fertilizer.org](http://www.fertilizer.org)



# Fertilizar los Cultivos para Mejorar la Salud Humana

Las deficiencias de micronutrientes afectan severamente a la población mundial



La malnutrición afecta a las personas, fundamentalmente a los niños, que o no tienen suficiente para comer o no toman la cantidad adecuada de micronutrientes



Los fertilizantes proporcionan nutrientes a los suelos, al ganado y a las personas



N	Nitrógeno
P	Fósforo
K	Potasio
I	Iodo
Fe	Hierro
Zn	Zinc
Cu	Cobre
Se	Selenio
S	Azufre

Añadir micronutrientes a los fertilizantes permite erradicar las deficiencias de Zn, Se y I

LA AGRICULTURA y LA FERTILIZACIÓN PUEDEN MEJORAR

LA CALIDAD ⇒ Añadir fertilizantes y micronutrientes al suelo puede aumentar el contenido, composición y biodisponibilidad de vitaminas y micronutrientes



LA CANTIDAD ⇒ Las deficiencias en nutrientes limitan el rendimiento de los cultivos



LA DIVERSIDAD ⇒ Añadir fertilizantes y micronutrientes puede tener un impacto positivo en las propiedades de los alimentos y de las plantas que requieren los consumidores, tales como el color, la forma, el tamaño, la ausencia de defectos visibles, la textura, el dulzor, la acidez, el aroma, el sabor y la vida útil



LA SEGURIDAD ⇒ Los fertilizantes han disminuido los riesgos de enfermedades en las personas



DE LOS CULTIVOS

Plantas y Suelos Sanos Nutren Personas Sanas

MÁS ALIMENTOS

MEJOR NUTRICIÓN

VIDAS MÁS SANAS

Los fertilizantes mejoran la seguridad alimentaria y la nutrición



**SALVANDO Y MEJORANDO LAS VIDAS DE LOS NIÑOS**



[www.ipni.net](http://www.ipni.net)

[www.fertilizer.org](http://www.fertilizer.org)

# Fertilizar los Cultivos para Mejorar la Salud Humana

**Zn** 1/3 de la población mundial es deficiente en zinc

La malnutrición provoca problemas de crecimiento, pérdida de masa muscular y deficiencia de vitamina A y zinc, causando el **45%** de las muertes infantiles, 3,1 millones de muertes anuales.

**2.000 MILLONES** de personas en el mundo son deficientes en zinc  
**800,000** personas mueren cada año de enfermedades debidas a un predominio en la deficiencia de zinc  
**450,000** son niños menores de 5 años

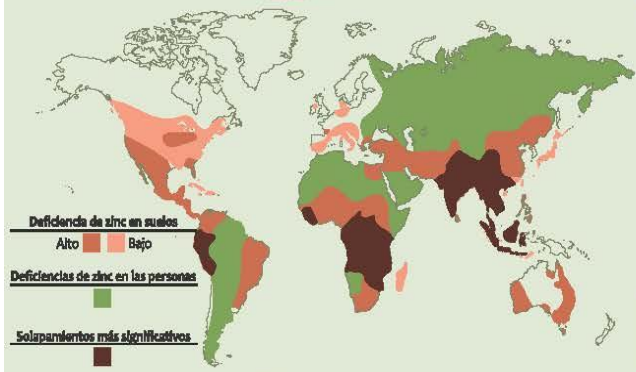
El zinc y la vitamina A han sido identificados como la **1ª** solución más rentable para la malnutrición

**“El zinc es una mercancía para salvar vidas”**  
- Ban Ki-moon Secretario General de la ONU

La deficiencia de zinc es un problema global, que afecta tanto a las personas como a las plantas

La deficiencia de zinc en los suelos produce un impacto en la seguridad alimentaria y nutricional, dando lugar a graves consecuencias para la salud.

## Deficiencia de zinc: el panorama mundial



India tiene uno de los índices más altos de deficiencia de zinc en los suelos y en las personas

El **50%** de los suelos de India son deficientes en Zinc, y llegará al **63% en 2025** si no se hace nada.

La falta de zinc está provocando casos de diarrea en India, que representa el **25%** de las muertes mundiales por diarrea en niños menores de 5 años

Enriquecer los granos de arroz y de trigo con zinc podría salvar las vidas de alrededor de **48,000** niños de India al año

Turquía ha utilizado el zinc para incrementar el rendimiento de los cultivos y para mejorar la salud humana

El zinc es deficiente en el **50%** de los suelos agrícolas del mundo y es reconocido como la deficiencia de micronutrientes más crítica en los cultivos del mundo



El **70%** de la ingesta calórica diaria en la mayoría de los países en vías de desarrollo proviene de cultivos básicos, que son generalmente pobres en zinc.

La mejora económica resultante de aplicar fertilizantes con zinc en Turquía es aproximadamente de **us\$100 millones** al año

En Anatolia Central, Turquía, la aplicación de fertilizantes con zinc ha producido notables incrementos en los rendimientos de los cultivos, y ha contribuido enormemente a aliviar las anomalías por deficiencias de zinc en la población local.

La fertilización con zinc es una solución simple, asequible y sostenible para incrementar los rendimientos de los cultivos y los ingresos de los agricultores, y para salvar las vidas de los niños.

## ANEXO 20: Beneficios de los nutrientes en las plantas y humanos

<p><b>BENEFITS FOR PLANTS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Vital for amino acids, proteins, DNA and RNA for growth and reproduction.</li> <li>Helps leaves grow strong and green by assisting with chlorophyll production.</li> </ul>	 <p><b>Nitrogen</b></p>	<p><b>BENEFITS FOR HUMANS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Is part of all proteins that humans consume.</li> <li>Food proteins supply essential amino acids that we need to produce proteins.</li> </ul>
<p><b>PLANT SOURCES:</b> Legumes, nuts and some grains and seeds are all high in protein</p>		
<p><b>BENEFITS FOR PLANTS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Assists with the growth of early seedlings, roots and flowers.</li> <li>Helps store and transport the sun's energy.</li> </ul>	 <p><b>Phosphorus</b></p>	<p><b>BENEFITS FOR HUMANS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Important for regulating calcium and building strong bones.</li> <li>Plays a key role in molecules involved in energy transfer in the body.</li> </ul>
<p><b>PLANT SOURCES:</b> Whole grains, nuts, seeds, legumes, cauliflower, mushrooms</p>		
<p><b>BENEFITS FOR PLANTS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Enhances tolerance to stresses such as drought and diseases.</li> <li>Required for moving sugars and carbohydrates within plants.</li> </ul>	 <p><b>Potassium</b></p>	<p><b>BENEFITS FOR HUMANS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Helps control heart rhythm, build proteins and use carbohydrates.</li> <li>Central to blood pH balance and supports normal growth.</li> </ul>
<p><b>PLANT SOURCES:</b> Sweet potatoes, pumpkins, lentils, potatoes, bananas, prunes</p>		
<p><b>BENEFITS FOR PLANTS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Helps resist disease through the growth and development of cell walls.</li> <li>Stimulates microbial activity and nutrient uptake.</li> </ul>	 <p><b>Calcium</b></p>	<p><b>BENEFITS FOR HUMANS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Required to build and maintain strong bones and teeth.</li> <li>Plays a role in nerve transmissions and muscle contractions.</li> </ul>
<p><b>PLANT SOURCES:</b> Leafy vegetables, nuts, seeds, soy products</p>		
<p><b>BENEFITS FOR PLANTS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>An essential component for some amino acids and proteins.</li> <li>Important in photosynthesis and for winter crop hardiness.</li> </ul>	 <p><b>Sulphur</b></p>	<p><b>BENEFITS FOR HUMANS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Necessary for insulin production and part of an important antioxidant.</li> <li>Helps keep hair, skin and nails strong and healthy.</li> </ul>
<p><b>PLANT SOURCES:</b> Cabbage, onions, mushrooms, garlic, asparagus, kale</p>		
<p><b>BENEFITS FOR PLANTS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Key for photosynthesis which captures the sun's energy for growth.</li> <li>Improves root formation and nutrient and water efficiency.</li> </ul>	 <p><b>Magnesium</b></p>	<p><b>BENEFITS FOR HUMANS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Supports muscle and nerve function and keeps your heart beating regularly.</li> <li>Builds strong bones and needed for energy production.</li> </ul>
<p><b>PLANT SOURCES:</b> Spinach, legumes, nuts, seeds, whole grains, avocado</p>		
<p><b>BENEFITS FOR PLANTS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>An essential component of cell wall formation.</li> <li>Important for flowering and fruiting.</li> </ul>	 <p><b>Boron</b></p>	<p><b>BENEFITS FOR HUMANS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Contributes to healthy bone development and cell membrane maintenance.</li> <li>Alleviates arthritic symptoms and facilitates hormone action.</li> </ul>
<p><b>PLANT SOURCES:</b> Raisins, nuts, legumes, prunes, dates</p>		
<p><b>BENEFITS FOR PLANTS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Helps minimize water loss during stressful dry periods.</li> <li>Assists nutrient transportation within plants.</li> </ul>	 <p><b>Chlorine</b></p>	<p><b>BENEFITS FOR HUMANS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Regulates the balance of fluids in the body.</li> <li>Necessary for the absorption of vitamin B12.</li> </ul>
<p><b>PLANT SOURCES:</b> Salt, cabbage, cauliflower, tomatoes, potatoes, seaweed</p>		
<p><b>BENEFITS FOR PLANTS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Plays a major role in photosynthesis and activates several enzymes.</li> <li>Is closely linked to Vitamin A production and helps produce protein.</li> </ul>	 <p><b>Copper</b></p>	<p><b>BENEFITS FOR HUMANS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Essential for the immune and nervous system and skeletal health.</li> <li>Supports iron metabolism and the formation of red blood cells.</li> </ul>
<p><b>PLANT SOURCES:</b> Leafy vegetables, whole grains, legumes, prunes, avocados</p>		
<p><b>BENEFITS FOR PLANTS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Vital for the formation of chlorophyll and acts as an oxygen carrier.</li> <li>Required for energy transfer and nitrogen reduction and fixation.</li> </ul>	 <p><b>Iron</b></p>	<p><b>BENEFITS FOR HUMANS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>A key component of hemoglobin in red blood cells.</li> <li>Needed to maintain healthy cells, skin, hair and nails.</li> </ul>
<p><b>PLANT SOURCES:</b> Legumes, chocolate, soy products, leafy vegetables, whole grains</p>		
<p><b>BENEFITS FOR PLANTS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Aids in chlorophyll synthesis which affects photosynthesis.</li> <li>Regulates carbohydrate metabolism and stimulates growth.</li> </ul>	 <p><b>Manganese</b></p>	<p><b>BENEFITS FOR HUMANS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Regulates blood sugar and enhances the absorption of calcium.</li> <li>Helps the body form connective tissue and bones.</li> </ul>
<p><b>PLANT SOURCES:</b> Grains, legumes, seeds, nuts, leafy vegetables, tea, coffee</p>		
<p><b>BENEFITS FOR PLANTS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Helps turn nitrates into usable forms.</li> <li>Required for nitrogen fixation in legume plants.</li> </ul>	 <p><b>Molybdenum</b></p>	<p><b>BENEFITS FOR HUMANS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Helps the liver break down drugs and toxins.</li> <li>Prevents the dangerous buildup of sulphites in the body.</li> </ul>
<p><b>PLANT SOURCES:</b> Legumes, whole grains, nuts, leafy vegetables, tomatoes</p>		
<p><b>BENEFITS FOR PLANTS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Required for plant nitrogen metabolism.</li> <li>Helps legumes to fix nitrogen.</li> </ul>	 <p><b>Nickel</b></p>	<p><b>BENEFITS FOR HUMANS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Increases hormonal activity.</li> <li>Is a part of all human organs.</li> </ul>
<p><b>PLANT SOURCES:</b> Nuts, legumes, soy products, grains, chocolate</p>		
<p><b>BENEFITS FOR PLANTS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Used for critical early stage chlorophyll and carbohydrate production.</li> <li>Aids stress tolerance, growth hormones and the enzyme system.</li> </ul>	 <p><b>Zinc</b></p>	<p><b>BENEFITS FOR HUMANS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Helps the immune system fight off invading bacteria and viruses.</li> <li>Plays a vital role in cognitive development and cellular growth.</li> </ul>
<p><b>PLANT SOURCES:</b> Nuts, whole grains, legumes, soy products, potatoes, chocolate</p>		

Fuente: International Fertilizer Association

ANEXO 21: Función de los minerales en las plantas y humanos

# Soil the foundation of nutrition

**Soil macronutrients:** NITROGEN (N), PHOSPHORUS (P), POTASSIUM (K)

**Soil micronutrients:** BORON (B), MOLYBDENUM (Mo), IRON (Fe), ZINC (Zn), MANGANESE (Mn), COPPER (Cu), SODIUM (Na), CHLORINE (Cl), SILICON (Si), MAGNESIUM (Mg)

**Role of 18 nutrients necessary for plant growth and human health**

**Plant Functions:**

- Promote plant growth
- Improves winter hardiness
- Involved in photosynthesis
- Increase disease resistance
- Reduces plant respiration
- Promotes root formation and growth
- Increases water-use efficiency
- Stimulates microbial activity
- Promote nodule formation on legumes
- Involved in carbohydrate metabolism and translocation of starches
- Promote reproduction
- Aid translocation of photosynthesis from leaves to fruiting organs
- Acts as an O<sub>2</sub> carrier
- Fruit formation
- Quickens maturity
- Fruit quality
- Fruit flavour
- Seed formation
- Seed quality
- Enhances maturity of small grains
- Aids in enzyme functionality and plant use of Fe and P
- Responsible for enzyme activity
- Helps enzyme activity and increases the availability of P and Ca

**Human Health Functions:**

- Plays a key role in brain and muscle function
- Contributes to perception of taste
- Needed for immune system health
- Key component of protein
- Essential for muscle and nerve activity
- Important in immune system health, blood clotting and pressure regulation
- A component of proteins, DNA, RNA and blood
- Promotes digestive process
- Maintains acid-base balance
- Needed for proper fluid balance
- Essential to fetal development and functioning of reproductive system
- Key component of enzymes
- Helps deliver oxygen to the tissues
- Important for healthy bones
- A component of enzymes, DNA, RNA, proteins and promotes immune system health
- A component of enzymes and involved in Fe metabolism

**Soil degradation leads to the loss of soil micro and macronutrients**

**Nutrient-poor soils are unable to produce healthy food with all the necessary nutrients for a healthy person**

**Over 2 billion people suffer from micronutrient deficiencies**

**Reduce erosion**

**Ensure crop rotation**

**Keep soil surface covered**

**Minimize tillage**

**Increase soil organic matter content**

**Sustainable soil management for healthy soils, healthy food and healthy people**

**Food and Agriculture Organization of the United Nations**

With the financial support of the Russian Federation

## Healthy soils for a healthy life

2015 International Year of Soils  
fao.org/soils-2015

SHAO2015-180256/171215

ANEXO 22: Ingesta dietética recomendada (RDA) y límites superiores de ingesta (UL) para zinc por edad, género y tipo de dieta<sup>1</sup>

Edad	Genero	RDA (mg/d)		UL (mg/d)
		Dieta mixta o vegetariana refinada	Dieta no refinada, basada en cereales	
6 – 11 meses	M/F	4	5	6
1 – 3 años	M/F	3	3	8
4 – 8 años	M/F	4	5	14
9 – 13 años	M/F	6	9	26
14 – 18 años	M	10	14	44
14 – 18 años	F	9	11	39
Embarazada	F	11	15	39
Nodriz	F	10	11	39
≥ 19 años	M	13	19	40
≥ 19 años	F	8	9	40
Embarazada	F	10	13	40
Nodriz	F	9	10	40

<sup>1</sup> Adaptado de: International Zinc Nutrition Consultative Group (IZiNCG). Technical Document #1. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control. Food Nutr Bull 2004; 25(suppl 2): S94–204.

Fuente: López de Romaña et al. (2010)



ANEXO 23: Dosis diarias de suplementos de zinc sugeridas por el IZiNCG<sup>1</sup>

Edad, genero	Dosis (mg/d)
7 – 11 meses	5
1 – 3 años	5
4 – 8 años	10
9 – 13 años	10
14 – 18 años, M	10
14 – 18 años, F	10
Embarazada	20
Nodriz	20
≥ 19 años, M	20
≥ 19 años, F	20
Embarazada	20
Nodriz	20

<sup>1</sup>Adaptado de: International Zinc Nutrition Consultative Group (IZiNCG). Technical Document #1. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control. Food Nutr Bull 2004; 25(suppl 2): S94–204.

Fuente: López de Romaña et al. (2010)

ANEXO 24: Tabla de Composición de Alimentos- Tubérculos

**U - TUBÉRCULOS, RAÍCES Y DERIVADOS**

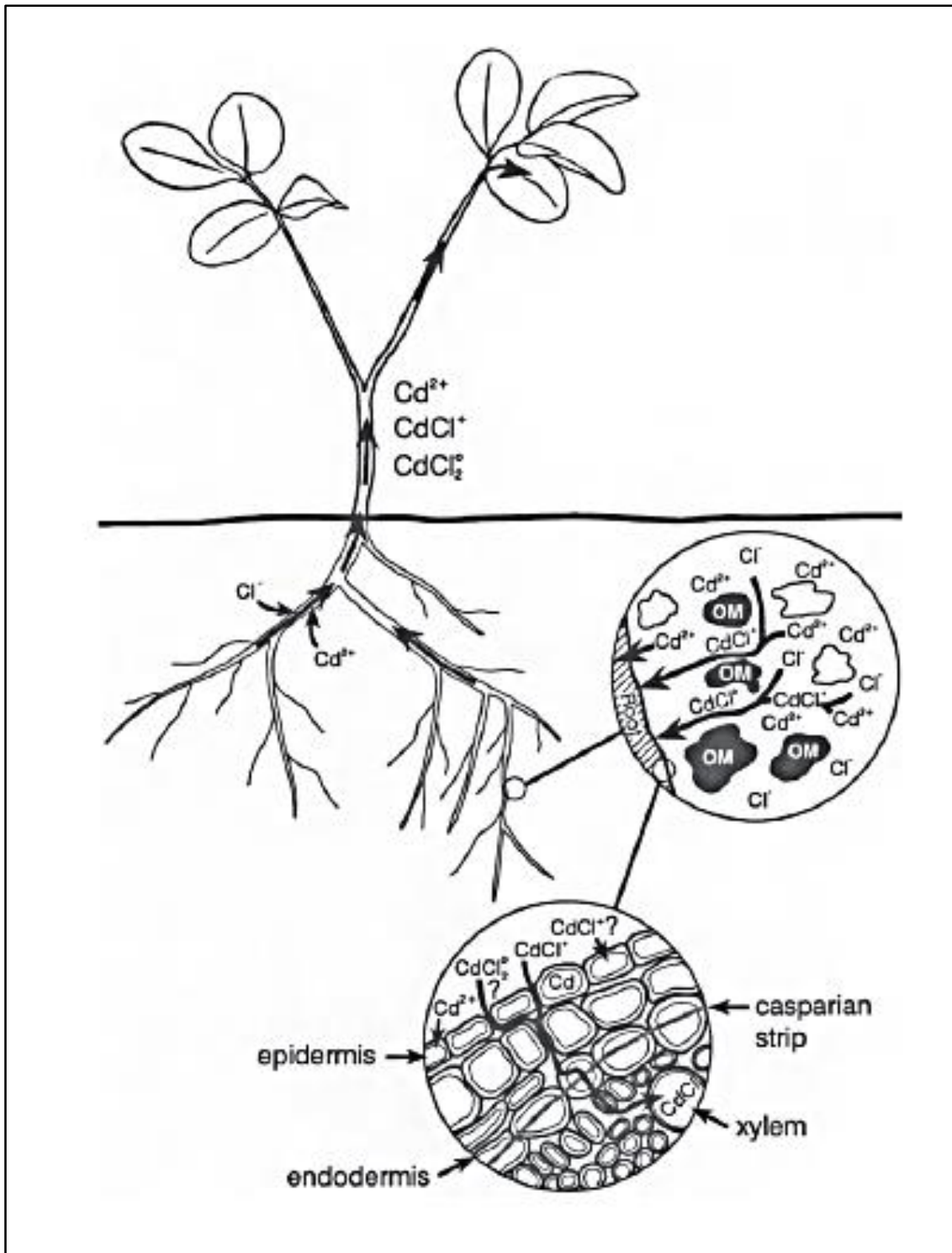
Composición en 100 g de alimentos

CÓDIGO	Nombre del alimento	Energía <ENERC> kcal	Energía <ENERC> kJ	Agua <WATER> g	Proteínas <PROCNT> g	Grasa total <FAT> g	Carbohidratos totales <CHOCDF> g	Carbohidratos disponibles <CHOAVL> g	Fibra cruda g	Fibra dietaria <FIBTG> g	Cenizas <ASH> g
U 1	Arracacha o racacha	97	406	75,1	0,7	0,3		22,9	1,1	•	1,0
U 2	Ashipa	178	745	55,3	1,4	0,3	42,7	40,8	0,9	1,9	0,3
U 3	Camote amarillo sin cáscara	116	485	69,9	1,2	0,2	27,6	24,6	1,0	3,0	1,1
U 4	Camote blanco	119	498	68,8	1,7	0,1	28,3	28,3	0,9	•	1,1
U 5	Camote morado sin cáscara	110	460	71,6	1,4	0,3	25,7	25,7	0,9	•	1,0
U 6	Camote, harina de	353	1477	9,9	2,1	0,9	84,3	81,3	1,8	3,0	2,8
U 7	Curao	65	272	82,5	1,6	0,1	14,7	14,7	0,6	•	1,1
U 8	Koshhipa	142	594	63,2	1,6	0,2	33,6	33,6	1,2	•	1,4
U 9	Kuros	98	410	74,5	1,8	0,2	22,6	22,6	1,1	•	0,9
U 10	Llacón	54	226	86,6	0,3	0,3	12,5	12,5	0,5	•	0,3
U 11	Maca (tubérculo seco)	314	1314	15,3	11,8	1,6	66,3	66,3	•	•	5,0
U 12	Maca silvestre	71	297	79,8	3,5	1,0	13,2	13,2	•	•	2,5
U 13	Maca, afrechillo	330	1381	12,0	10,5	0,6	73,4	73,4	•	•	3,5
U 14	Maca, almidón	350	1464	11,0	6,1	1,2	80,1	80,1	•	•	1,6
U 15	Maca, pasta integral	292	1222	11,1	14,0	1,0	68,4	68,4	•	•	5,5
U 16	Mashua P.C.	50	209	87,4	1,5	0,7	9,8	9,8	0,9	•	0,6
U 17	Olluco sin cáscara	62	259	83,7	1,1	0,1	14,3	14,3	0,8	•	0,8
U 18	Papa amarilla sin cáscara	103	431	73,2	2,0	0,4	23,3	22,9	0,7	0,4	1,1
U 19	Papa blanca	97	406	74,5	2,1	0,1	22,3	19,9	0,6	2,4	1,0
U 20	Papa chuño negro	333	1393	14,1	4,0	0,2	79,4	79,4	1,9	•	2,3
U 21	Papa color morado deshidratada	324	1356	13,3	8,7	0,2	74,1	74,1	•	•	3,7
U 22	Papa helada amarga	180	753	54,5	1,8	0,6	42,1	42,1	2,0	•	1,0
U 23	Papa huayro con cáscara	70	293	81,0	1,9	0,1	15,9	15,9	1,7	•	1,1
U 24	Papa moraya chuño pelado	323	1351	18,1	1,9	0,5	77,7	77,7	2,1	•	1,8
U 25	Papa seca	322	1347	14,8	8,2	0,7	72,8	72,8	1,8	•	3,5
U 26	Papa, harina de	332	1389	10,9	6,4	0,4	77,1	71,2	2,3	5,9	5,2
U 27	Papas deshidratadas con lejía	319	1335	14,0	8,0	0,3	73,1	73,1	•	•	4,6
U 28	Pituca o taro	102	427	73,7	1,6	0,5	23,2	19,1	0,8	4,1	1,0
U 29	Pituca, harina de	342	1431	9,7	8,1	0,3	78,6	78,6	•	•	3,3
U 30	Radiche	81	339	78,0	1,8	0,1	18,6	18,6	1,4	•	1,5
U 31	Remolacha raíz	43	180	87,6	1,6	0,2	9,6	6,8	1,0	2,8	1,1
U 32	Sachapapa	112	469	72,2	1,8	1,5	23,5	19,4	0,4	4,1	1,0

Calcio <CA> mg	Fósforo <P> mg	Zinc <ZN> mg	Hierro <FE> mg	β caroteno equivalentes totales <CARTBO> µg	Retinol µg	Vitamina A equivalentes totales <VITA> µg	Tiamina <THIA> mg	Riboflavina <RIBF> mg	Niacina <NIA> mg	Vitamina C <VITC> mg	AscT mg	CÓDIGO
27	50	•	1,10	•	0,00	•	0,09	0,08	2,84	27,10	•	U 1
29	25	0,16	4,80	•	•	1,0	0,06	0,09	0,12	2,10	•	U 2
41	31	0,30	0,80	•	39,00	709,0	0,10	0,05	0,63	10,00	•	U 3
26	33	•	2,50	•	9,00	•	0,14	0,04	0,70	12,90	•	U 4
36	40	•	1,40	•	11,00	•	0,08	0,05	0,82	13,60	•	U 5
153	99	0,30	5,70	•	1542,00	709,0	0,17	0,17	1,67	7,90	•	U 6
22	59	•	1,80	•	14,00	•	0,08	0,06	0,48	3,30	•	U 7
108	138	•	0,30	•	•	•	0,06	0,13	0,54	58,50	•	U 8
11	59	•	0,50	•	0,00	•	0,14	0,04	1,66	9,40	•	U 9
23	21	•	0,30	•	12,00	•	0,02	0,11	0,34	13,10	•	U 10
247	183	•	14,70	•	•	•	0,20	0,35	•	2,50	•	U 11
37	0	•	49,90	•	•	•	0,20	0,35	•	2,10	•	U 12
475	135	•	29,30	•	•	•	0,22	0,65	•	2,00	•	U 13
175	70	•	31,70	•	•	•	0,15	0,07	•	2,80	•	U 14
245	192	•	25,00	•	•	•	0,28	0,60	•	8,00	•	U 15
12	29	•	1,00	•	12,00	•	0,10	0,12	0,67	77,50	•	U 16
3	28	•	1,10	•	5,00	•	0,05	0,03	0,20	11,50	•	U 17
6	52	0,29	0,40	•	0,00	0,0	0,07	0,06	1,85	9,00	•	U 18
9	47	0,29	0,50	•	3,00	0,0	0,09	0,09	1,67	14,00	•	U 19
44	203	•	0,90	•	•	•	0,13	0,17	3,40	1,70	•	U 20
23	180	•	2,60	•	•	•	0,18	0,05	•	1,40	•	U 21
58	54	•	2,80	•	•	•	0,07	0,20	1,65	1,00	•	U 22
10	61	0,33	0,73	•	0,00	0,0	0,08	0,03	1,15	8,60	•	U 23
92	54	•	3,30	•	0,00	•	0,03	0,04	0,38	1,10	•	U 24
47	200	•	4,50	•	0,00	•	0,19	0,09	5,00	3,20	•	U 25
82	199	0,54	1,00	•	0,00	0,0	0,18	0,051	3,507	8,90	•	U 26
48	185	•	1,70	•	•	•	0,22	0,05	•	1,40	•	U 27
50	41	0,23	1,20	•	1,00	4,0	0,03	0,06	0,72	4,40	•	U 28
97	141	•	7,00	•	0,00	•	0,20	0,08	•	1,90	•	U 29
104	52	•	1,40	•	3,00	•	0,03	0,09	0,38	6,00	•	U 30
16	40	0,35	0,80	•	0,00	2,0	0,03	0,04	0,33	4,90	•	U 31
3	30	0,24	0,70	•	0,00	7,0	0,09	0,03	0,44	3,10	•	U 32

Fuente: Reyes et al. (2009)

ANEXO 25: Diagrama esquemático del posible efecto por salinidad de cloruro en el mecanismo de absorción de Cd.



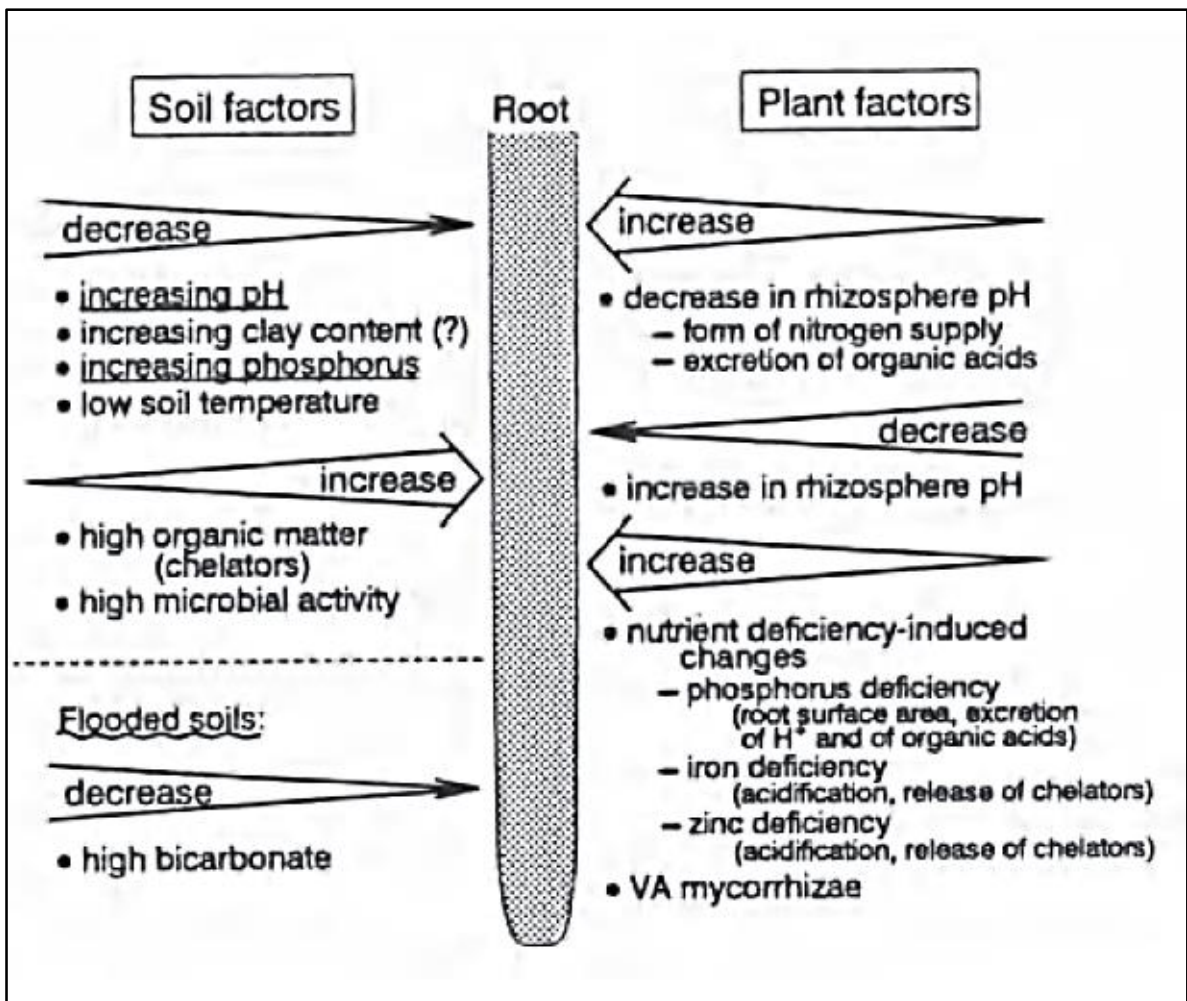
Fuente: Grant et al. 1999.

ANEXO 26: Concentración de Cd en algunas rocas fosfóricas

Phosphate Rock	[Cd] (mg kg <sup>-1</sup> )
USSR (Kola)	0.2
South Africa (Phalaborwa)	4
Chatham Rise phosphorite	2
China (Yunan)	5
Syria (Khneifiss)	5
Syria (Eastern)	5
Jordan	6
Australia (Duchess)	7
Mexico	8
Egypt (Quseir)	8
Florida 72%	9
Egypt (Hamrawein)	9
Makatea	10
Peru (Sechura)	11
Israel	12
Morocco (Khouribga 68 K11)	12
Florida 73.5%	13
Tunisia (Gafsa)	38
Florida 74/75%	17
Florida 68%	16
Mataiva	20
Morocco (Khouribga 72 K20)	24
Youssoufia 68 (Y1)	23
Morocco (Youssoufia 73.5 Y2)	33
Israel (Zin)	32
Morocco (Boucraa)	38
Christmas Island	43
North Carolina (calcined)	43
North Carolina	47
Toga	51
Banaba (Ocean Island)	99
Senegal	90
Nauru	100
Western USA	60–340

Fuente: McLaughlin et al. 1996

ANEXO 27: Presentación esquemática de los principales factores del suelo y la planta que incrementan o disminuyen la disponibilidad y absorción por las plantas.



Fuente: Marschner 1993

ANEXO 28: Resultado del análisis de suelo



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS**  
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



**ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION**

Solicitante : PEDRO PABLO GUTIERREZ VILCHEZ

Departamento : LIMA

Distrito : LA MOLINA

Referencia : H.R. 59167-079SC-17

Bolt.: 467

Provincia : LIMA

Predio :

Fecha : 28/06/17

Número de Muestra		pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO <sub>3</sub> %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
Lab	Claves							Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Al <sup>+3</sup> + H <sup>+</sup>			
5043		7.82	0.71	3.00	1.29	16.2	292	53	25	22	Fr.Ar.A.	13.92	11.32	1.78	0.61	0.21	0.00	13.92	13.92	100

A = Arena , A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso , L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso , Fr.Ar. = Franco Arcilloso,  
 Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

Número de Muestra		Fe ppm	Cu ppm	Mn ppm	Zn ppm	B ppm	S ppm	Pb ppm	Cr ppm	Cd ppm
Lab	Claves									
5043		13.00	15.50	7.50	14.55	2.55	14.05	72.33	21.43	2.46

  
 Sady García Bendezi  
 Jefe del Laboratorio

