

**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**



**ESCUELA DE POSGRADO
TESIS PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
DOCTOR EN CIENCIAS PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE
CON MENCIÓN EN
GESTIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE

ACUMULACIÓN DE CADMIO (Cd) y OTROS ELEMENTOS
TRAZA EN SISTEMAS DE CULTIVO DE PAPA DE LA
REGIÓN AMAZONAS: RELACIÓN CON ALGUNOS
FACTORES DE MANEJO Y LAS PROPIEDADES DEL
SUELO**

Autor:

M. Sc. Víctor Hugo Gómez Ramírez

Asesor:

Dr. Mauricio Andrés Molina Roco

Registro: (.....)

CHACHAPOYAS – PERÚ

2023

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE LA TESIS EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNTRM



ANEXO 6-H

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE LA TESIS DE MAESTRÍA ()/DOCTORADO (X) EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNTRM

1. Datos de autor 1

Apellidos y nombres (tener en cuenta las tildes): Victor Hugo Gómez Ramírez
DNI N°: 43665590
Correo electrónico: victor.gomez@untrm.edu.pe
Nombre de la Maestría () / Doctorado (X): Ciencias para el Desarrollo Sustentable

Datos de autor 2

Apellidos y nombres (tener en cuenta las tildes): _____
UNI N°: _____
Correo electrónico: _____
Nombre de la Maestría () / Doctorado () : _____

2. Título de la tesis para obtener el grado académico de Maestro () / Doctor (X)

"Acumulación de cadmio (Cd) y otros elementos traza en sistemas de cultivo de papa de la región Amazonas: Relación con algunos factores de manejo y las propiedades del suelo"

3. Datos de asesor 1

Apellidos y nombres: Mauricio Andrés Molina Roco
DNI, Pasaporte, C.E N°: 13.474.444-8
Open Research and Contributor-ORCID (<https://orcid.org/0000-0002-9570-0970>) <https://orcid.org/0000-0003-2224-1677>

Datos de asesor 2

Apellidos y nombres: _____
DNI, Pasaporte, C.E N°: _____
Open Research and Contributor-ORCID (<https://orcid.org/0000-0002-9570-0970>)

4. Campo del conocimiento según Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos- OCDE (ejemplo: Ciencias médicas, Ciencias de la Salud-Medicina básica-Inmunología)

https://catalogos.concytec.gob.pe/vocabulario/ocde_ford.html
1.05.08 -- Ciencias del medio ambiente

5. Originalidad del Trabajo

Con la presentación de esta ficha, el(la) autor(a) o autores(as) señalan expresamente que la obra es original, ya que sus contenidos son producto de su directa contribución intelectual. Se reconoce también que todos los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal.

6. Autorización de publicación

El(los) titular(es) de los derechos de autor otorga a la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM), la autorización para la publicación del documento indicado en el punto 2, bajo la *Licencia creative commons* de tipo BY-NC: Licencia que permite distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de su obra de forma no comercial por lo que la Universidad deberá publicar la obra poniéndola en acceso libre en el repositorio institucional de la UNTRM y a su vez en el Registro Nacional de Trabajos de Investigación -RENATI, dejando constancia que el archivo digital que se está entregando, contiene la versión final del documento sustentado y aprobado por el Jurado Evaluador.




Firma del autor 1


Firma del Asesor 1

Chachapoyas, 24, junio, 2023

Firma del autor 2

Firma del Asesor 2

DEDICATORIA

A mi hijo Wilson Lionel, por ser mi mayor motivación para superarme día a día.

A mi esposa Juana, por su amor y apoyo incondicional.

A mi madre y abuelita materna, si bien físicamente ya no están, ustedes siguen siendo mi motivación para seguir adelante en los momentos de dificultad.

A toda mi familia, por su apoyo incondicional en esta etapa de mi vida académica.

AGRADECIMIENTO

Esta investigación o proyecto ha sido financiado por el Proyecto Concytec - Banco Mundial “Mejoramiento y Ampliación de los Servicios del Sistema Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación Tecnológica” 8682-PE, a través de su unidad ejecutora ProCiencia. [contrato número 03-2018-FONDECYT-BM-PDAEG].

Al Dr. Mauricio Andrés Molina Roco, por su dedicación, paciencia y criterio para guiarme en cada una de las etapas de este trabajo. Sin su apoyo, esto no hubiese sido posible.

Al Laboratorio de Investigación de Suelos y Aguas de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, por el soporte en la parte experimental de este trabajo. De manera especial se agradece a Elder Chichipe Vela, Edith Calderón Ordoñez y Jesús Rascon Barrios; personal que labora en esta institución de los cuales siempre recibí apoyo incondicional.

**AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE
MENDOZA DE AMAZONAS**

Jorge Luis Maicelo Quintana Ph.D.

Rector

Dr. Oscar Andrés Gamarra Torres

Vicerrector Académico

Dra. María Nelly Luján Espinoza

Vicerrectora de Investigación

Dr. Efraín Manuelito Castro Alayo

Director de la Escuela de Posgrado

VISTO BUENO DEL ASESOR DE LA TESIS



UNTRM

REGLAMENTO GENERAL
PARA EL OTORGAMIENTO DEL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER, MAESTRO O DOCTOR Y DEL TÍTULO PROFESIONAL

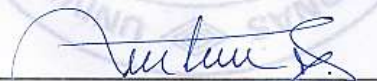
ANEXO 6-L

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO () / DOCTOR (X)

El que suscribe el presente, docente de la UNTRM () / Profesional externo (X), hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada Acumulación de cadmio (Cd) y otros elementos traza en sistemas de cultivo de papa de la región Amazonas: Relación con algunos factores de manejo y propiedades del suelo. cuyo autor Víctor Hugo Gómez Ramírez es estudiante del _____ ciclo/egresado (X) de la Escuela de Posgrado, Maestría () / Doctorado (X) en ciencias para el Desarrollo Sustentable, con correo electrónico institucional victor.gomez@untrm.edu.pe

El suscrito da el Visto Bueno a la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de observaciones que formulen en Acta en conjunto, y estar presente en la sustentación.

Chachapoyas, 10 de abril de 2023


Firma y nombre completo del Asesor

Dr. Mauricio Andrés Molina Roco



JURADO EVALUADOR DE LA TESIS



.....
Dr. Carlos Eduardo Millones Chanamé
Presidente



.....
Ligia Magali García Rosero Ph.D.
Secretaria



.....
Dra. Mariel del Rocío Chotón Calvo
Vocal

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS



UNTRM

Reglamento del Proceso de Graduación en la
Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional
Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas

ANEXO 3

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

Los suscritos, miembros del Jurado Evaluador del Proyecto de Tesis (X)/Tesis () Tesis en Formato de Artículo Científico () titulado:

Acomulación de Cadmio (Cd) y otros elementos traza en sistemas de cultivo de papa de la región Amazonas: relación con algunos factores de manejo

presentado por el Aspirante Victor Hugo Gomez Ramirez

para obtener el Grado Académico de Maestro ()/Doctor (X) en Creencias para el Desarrollo Sustentable

de la Escuela de Posgrado de la UNTRM, hacemos constar que después de revisar la originalidad del Proyecto de Tesis ()/Tesis (X)/Tesis en formato de artículo científico () con el software de prevención de plagio **Turnitin**, verificamos:

a) De acuerdo con el informe de originalidad (adjunto), el Proyecto de Tesis ()/Tesis (X)/ Tesis en formato de artículo científico () tiene 18 % de similitud, que es menor al 25% permitido en la UNTRM.

b) La persona responsable de someter el trabajo al software de prevención de plagio **Turnitin** fue:

Dr. Carlos Eduardo Millones Chanamé y pertenece al área () / oficina () / dependencia () de Facultad de Educación y Creencias de la Comunicación

Chachapoyas, 19 de diciembre del 2022



[Signature]
SECRETARIO

[Signature]
PRESIDENTE

[Signature]
VOCAL

OBSERVACIONES:

.....
.....

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS



ANEXO 6-5

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO () / DOCTOR (✓)

En la ciudad de Chachapoyas, el día 12 de Abril del año 2023 siendo las 09:30 horas, el aspirante Victor Hugo Gómez Romero, Asesorado por Dr. Mauricio Andrés Molina Poca, defiende en sesión pública presencial (✓) a distancia () la Tesis titulada: Acumulación de cadmio (Cd) y otros elementos traza en sistemas de cultivo de papa de la región Amazónica: Relación con algunas formas de manejo y las propiedades del suelo Ciénagas para el desarrollo Sostenible, a ser otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas; ante el Jurado Evaluador, conformado por:

Presidente: Carlos Eduardo Hillaris Chanani

Secretario: Ligia Magali García Posco

Vocal: Huonel del Rocío Chelán Celso

Procedió el aspirante a hacer la exposición de la Introducción, Material y método, Resultados, Discusión y Conclusiones, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la Tesis presentada, los miembros del Jurado Evaluador pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones y objeciones consideraron oportunas, las cuales fueron contestadas por el aspirante.

Tras la intervención de los miembros del Jurado Evaluador y las oportunas respuestas del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los presentes en el acto de sustentación, para que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.

Seguidamente, a puerta cerrada, el Jurado Evaluador determinó la calificación global concedida a la sustentación de la Tesis de Maestría () / Doctorado (✓), en términos de:

A probado (✓) por Unanimidad (✓) / Mayoría () Desaprobado ()

Otorgada la calificación, el Secretario del Jurado Evaluador lee la presente Acta en esta misma sesión pública. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las 11:26 horas del mismo día y fecha, el Jurado Evaluador concluye el acto de sustentación de la Tesis para obtener el Grado Académico de Maestro () / Doctor (✓).


SECRETARIO


PRESIDENTE


VOCAL

OBSERVACIONES:
El doctorando sustentó el 12/04/23, sin embargo, al hallarse observaciones por parte del jurado, estas fueron levantadas el 15/05/2023.

ÍNDICE

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE LA TESIS EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNTRM.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS.....	v
VISTO BUENO DEL ASESOR DE LA TESIS	vi
JURADO EVALUADOR DE LA TESIS.....	vii
CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS.....	viii
ACTA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS.....	ix
ÍNDICE.....	x
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xvi
RESUMEN	xx
ABSTRACT.....	xxi
I. INTRODUCCIÓN.....	22
II. MATERIAL Y MÉTODOS	29
2.1. Ubicación.....	29
2.2. Materiales, equipos y reactivos	29
2.3. Población, muestra y muestreo	32
2.4. Metodología	37
III. RESULTADOS.....	55
3.1. Fase I: Objetivo específico 1.....	55

3.1.1. Determinación de fertilizantes utilizados en el cultivo de papa en la región Amazonas	55
3.1.2. Determinación de elementos traza en fertilizantes utilizados para el cultivo de papa en la región Amazonas	55
3.1.3. Estimación de aportes de elementos traza a través de fertilizantes	56
3.2. Fase II: Objetivo específico 2	58
3.2.1. Actividad 1: Caracterización fisicoquímica y determinación de Cd, Pb, Cu y Zn en suelos de cultivos de papa de la región Amazonas	58
3.2.2. Actividad 2: Determinación de la concentración y absorción de Cd, Pb, Cu y Zn en partes vegetales (raíz, tallos, hojas y tubérculos) de cultivos de papa seleccionados de la región Amazonas	83
3.2.3. Actividad 3: Determinación de relaciones entre las propiedades del suelo y los factores de manejo con la concentración y absorción de elementos traza en cultivos de papa	94
3.3. Fase III: Objetivo específico 3	112
3.3.1. Resultados de la aplicación del instrumento de recolección de datos	112
3.3.2. Alternativas para la sustentabilidad del cultivo de papa en la región Amazonas	116
IV. DISCUSIONES	119
4.1. Elementos traza en fertilizantes	119
4.2. Propiedades fisicoquímicas de los suelos para cultivo de papa en la región Amazonas	121
4.3. Elementos traza en suelos de cultivo de papa	122
4.4. Concentración y absorción de ETs en la planta de papa	126
4.5. Relaciones entre concentraciones de ETs y concentraciones de ETs en planta	130
4.6. Sustentabilidad para el cultivo de papa en la región Amazonas	132

V. CONCLUSIONES	134
VI. RECOMENDACIONES	136
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
VIII. ANEXOS	153

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ubicación referencial de las parcelas de cultivos de papa.	29
Tabla 2. Materiales utilizados en la investigación.	29
Tabla 3. Equipos utilizados en la investigación (imágenes se muestran en el Anexo 14)....	30
Tabla 4. Reactivos utilizados en la investigación.	31
Tabla 5. Ranking según hectáreas se siembra de cultivo de papa en la provincia de Chachapoyas por distritos, periodo 2018-2020.	39
Tabla 6. Ranking según hectáreas se siembra de cultivo de papa en la provincia de Luya por distritos, periodo 2018-2020.	40
Tabla 7. Métodos de análisis de las propiedades fisicoquímicas del suelo.	43
Tabla 8. Composición individual de nutrientes de la mezcla física de fertilizantes utilizados en el cultivo de papa en la región Amazonas.	55
Tabla 9. Concentración y desviación estándar de elementos traza en fertilizantes utilizados para cultivo de papa en la región Amazonas.	56
Tabla 10. Composición de la mezcla comercial de fertilizantes utilizado en el cultivo de papa.	57
Tabla 11. Composición de la presentación comercial individual de los fertilizantes utilizados para el cultivo de papa.	57
Tabla 12. Aporte mínimo y máximo de ETs por hectárea en una temporada de cultivo de papa en la región Amazonas.	58
Tabla 13. Datos generales de los puntos de muestreo de suelos de cultivo de papa.	59
Tabla 14. Rango, media, mediana, desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV) de propiedades físico químicas de suelos para cultivo de papa de la región Amazonas.	62
Tabla 15. Rango de concentración, media y mediana (mg kg^{-1}), desviación estándar (D.E.), coeficiente de variación (C.V.) de ETs en suelos de cultivo de papa de la región Amazonas.	63
Tabla 16. Resultados del test de Normalidad Shapiro Wilk para las propiedades fisicoquímicas y concentraciones de ETs de los suelos para cultivos de papa de la región Amazonas.	64

Tabla 17. ACP de las propiedades fisicoquímicas y concentración de ETs de 40 suelos para cultivo de papa de la región Amazonas, se muestra la desviación estándar, la proporción de la varianza y la proporción acumulativa.	69
Tabla 18. Factor de carga de los tres primeros componentes principales (PC) para variables de los suelos de cultivo de papa.	70
Tabla 19. Modelos de regresión para predecir ETs en el suelo basado en la concentración de ETs y las propiedades fisicoquímicas de los suelos.	72
Tabla 20. Propiedades fisicoquímicas de los seis suelos seleccionados de cultivo de papa (parte 1).	75
Tabla 21. Propiedades fisicoquímicas de los seis suelos seleccionados de cultivo de papa (parte 2).	76
Tabla 22. Concentración total y disponible de ETs en suelos seleccionados de cultivo de papa.	77
Tabla 23. Rango, media, mediana, desviación estándar y coeficiente de variación de propiedades químicas de suelos de parcelas sin cultivar (parte 1).	81
Tabla 24. Rango, media, mediana, desviación estándar y coeficiente de variación de propiedades químicas de suelos de parcelas sin cultivar (parte 2).	81
Tabla 25. Concentración, rango, media, mediana, desviación estándar y coeficiente de variación de ETs en parcelas sin cultivar.	82
Tabla 26. Normalidad y p-valor para la comparación de medias de las propiedades químicas de los suelos seleccionados cultivados y suelos sin cultivar.	83
Tabla 27. Materia seca en los diferentes órganos de las plantas y materia seca total de las plantas seleccionadas.	85
Tabla 28. Porcentaje de masa seca en los diferentes órganos de una planta de papa variedad huayro.	85
Tabla 29. Rendimiento en masa por hectárea de las parcelas seleccionadas de cultivo de papa variedad huayro.	86
Tabla 30. Concentración de plomo en las diferentes partes de la planta de papa variedad huayro de las parcelas seleccionadas.	89
Tabla 31. Concentración de cobre en las diferentes partes de la planta de papa variedad huayro de las parcelas seleccionadas.	89

Tabla 32. Concentración de Zinc en las diferentes partes de la planta de papa variedad huayro de las parcelas seleccionadas.....	90
Tabla 33. Absorción de Pb del tubérculo y absorción total en gramos por hectárea.	90
Tabla 34. Absorción de Cu del tubérculo y absorción total en gramos por hectárea.	91
Tabla 35. Absorción de Zn del tubérculo y absorción total en gramos por hectárea.....	91
Tabla 36. Factor de transferencia de Pb entre las distintas partes de la planta de papa variedad huayro de las parcelas seleccionadas.	92
Tabla 37. Factor de transferencia de Cu entre las distintas partes de la planta de papa variedad huayro de las parcelas seleccionadas.	92
Tabla 38. Factor de transferencia de Zn entre las distintas partes de la planta de papa variedad huayro de las parcelas seleccionadas.	93
Tabla 39. BCF total de ETs, BCF disponible de zinc y Kd de zinc para cultivo de papa en parcelas seleccionadas.	94
Tabla 40. Matriz de correlación entre propiedades del suelo y propiedades de la planta de papa de parcelas seleccionadas (parte 1).....	95
Tabla 41. Matriz de correlación entre propiedades del suelo y propiedades de la planta de papa de parcelas seleccionadas (parte 2).....	96
Tabla 42: Matriz de correlación entre propiedades del suelo y propiedades de la planta de papa de parcelas seleccionadas (parte3).....	97
Tabla 43. Modelos de regresión para predecir ETs en tejidos vegetales basado en la concentración de ETs y otras propiedades fisicoquímicas de los suelos.	103
Tabla 44. Resumen de la aplicación de instrumento de recolección de datos a agricultores de papa en la región Amazonas.....	116
Tabla 45. Normativa aplicable a fertilizantes para la concentración de Cd y Pb.	120
Tabla 46. Normativa para ETs en suelos agrícolas de diferentes países.	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Muestras de fertilizantes utilizados en el cultivo de papa en la región Amazonas.	32
Figura 2. Muestra de suelo para cultivo de papa en el distrito de Cheto, provincia de Chachapoyas.....	34
Figura 3. Georreferenciación de los puntos de muestreo de suelos.....	34
Figura 4. Sistema de cultivo de papa variedad INIA 323 seleccionado para la investigación.	35
Figura 5. Muestra de plantas de papa variedad INIA 323.	36
Figura 6. Muestra de tubérculos de papa variedad INIA 323.....	36
Figura 7. Digestión de muestras de fertilizantes inorgánicos utilizados en el cultivo de papa.	41
Figura 8. Pesado de muestras de suelo.	44
Figura 9. Determinación de textura en de los suelos de cultivo de papa.	44
Figura 10. Determinación de pH en muestras de suelos.....	45
Figura 11. Determinación de fósforo en suelos.	45
Figura 12. Determinación de materia orgánica en muestras de suelos.....	46
Figura 13. Digestión de muestras de suelo para determinación de la concentración total de elementos traza.....	46
Figura 14. Determinación de elementos traza en muestras de suelos en el equipo MP-AES.	47
Figura 15. Digestatos finales de muestras de tejidos vegetales de papa.....	49
Figura 16. Soluciones de muestras de partes vegetales para determinación de fósforo.	49
Figura 17. Metodología para la propuesta de desarrollo sustentable para el cultivo de papa en la región Amazonas.....	54
Figura 18. Mapa de puntos de muestreo de suelos para cultivos de papa en la región Amazonas (2021).	60
Figura 19: Matriz de correlaciones de las propiedades fisicoquímicas y concentraciones de ETs de suelos para cultivo de papa de la región Amazonas.....	65
Figura 20. Red de correlaciones de las propiedades fisicoquímicas y concentración de ETs de suelos de cultivo de papa de la región Amazonas.	66

Figura 21. a) Influencia del pH sobre el Ca ⁺² ; b) Influencia del pH sobre la CIC; c) Influencia del pH sobre la CICE y d) Influencia del contenido de Pb sobre el contenido de Zn.	68
Figura 22. Proporción de la varianza explicada por cada componente del ACP para las propiedades fisicoquímicas y concentración de ETs de 40 suelos para cultivo de papa de la región Amazonas.....	69
Figura 23. Dirección de las propiedades fisicoquímicas de los suelos analizados dentro de los 2 componentes más importantes (biplot).	71
Figura 24. Dirección de las propiedades fisicoquímicas de los suelos analizados agrupados por distritos dentro de los dos componentes más importantes. Distritos: CHE(Cheto), CON(Conila), JAL(La Jalca), LEV(Levanto), LON(Longuita), LUY(Luya), QUJ(Quinjalca), SAT(Santo Tomás), SOL(Soloco) y TRI(Trita)..	71
Figura 25. Matriz de correlaciones de las propiedades fisicoquímicas y concentración de ETs en suelos seleccionados para cultivo de papa.....	78
Figura 26. Red de correlaciones de las propiedades fisicoquímicas y concentración de ETs de suelos seleccionados de cultivo de papa.....	79
Figura 27. Matriz de correlaciones de la materia seca en diferentes partes de la planta de papa y el rendimiento fresco. Solo se muestran las correlaciones significativas (p<0,05)	87
Figura 28. Influencia de la materia seca del tubérculo sobre el rendimiento fresco en la variedad huayro.	87
Figura 29. a) Influencia de la concentración de Pb en el suelo sobre la concentración de Pb en la raíz; b) Influencia de la materia orgánica en el suelo sobre la concentración de Pb en la raíz; c) Influencia de la acidez intercambiable del suelo sobre la concentración de Pb en la raíz y d) Influencia de la concentración de Zn en el suelo sobre la concentración de Pb en la raíz.	98
Figura 30. a) Influencia de la concentración de Cu en el suelo sobre la concentración de Cu en la raíz; b) Influencia de la materia orgánica en el suelo sobre la concentración de Cu en la raíz; c) Influencia de la concentración de Cu en el suelo sobre la concentración de Cu en el tubérculo y d) Influencia de la concentración de Zn en el suelo sobre la concentración de Zn en el tubérculo.....	99

Figura 31. a) Influencia de la concentración de Pb en el suelo sobre el BCF_{Pb} ; b) Influencia de la concentración de Zn_{EDTA} en el suelo sobre sobre el BCF_{Pb} ; c) Influencia de la concentración de Cu en el suelo sobre sobre el BCF_{Cu} y d) Influencia de la concentración de Zn_{EDTA} en el suelo sobre el BCF_{Cu}	100
Figura 32. a) Influencia de la concentración de Zn en el suelo sobre el BCF_{Zn} ; b) Influencia de la concentración de Zn_{EDTA} en el suelo sobre el BCF_{Zn} ; c) Influencia de la concentración de Zn_{EDTA} en el suelo sobre el BCF_{ZnEDTA} y d) Influencia de la concentración de Pb en el suelo sobre el BCF_{ZnEDTA}	101
Figura 33. a) Influencia de la concentración de Zn_{EDTA} en el suelo sobre el Kd_{Zn} ; b) Influencia de la concentración de Pb en el suelo sobre el Kd_{Zn} ; c) Influencia del contenido de P Olsen en el suelo sobre la absorción total de Zn y d) Influencia del porcentaje de limo en el suelo sobre el rendimiento fresco.....	102
Figura 34. Análisis de ruta que muestra el efecto directo e indirecto que algunas variables del suelo tienen en el BCF_{Pb}	105
Figura 35. Análisis de ruta que muestra el efecto directo e indirecto que algunas variables del suelo tienen en el BCF_{Cu}	106
Figura 36. Análisis de ruta que muestra el efecto directo e indirecto que algunas variables del suelo tienen en el BCF_{Zn}	107
Figura 37. Análisis de ruta que muestra el efecto directo e indirecto que algunas variables del suelo tienen en el $Pb_{raíz}$	107
Figura 38. Análisis de ruta que muestra el efecto directo e indirecto que algunas variables del suelo tienen en el $Cu_{raíz}$	108
Figura 39. Análisis de ruta que muestra el efecto directo e indirecto que algunas variables del suelo tienen en el $Zn_{raíz}$	108
Figura 40. Análisis de ruta que muestra el efecto directo e indirecto que algunas variables del suelo tienen en el Zn_{tub}	109
Figura 41. Análisis de ruta que muestra el efecto directo e indirecto que algunas variables del suelo tienen en la Absorción total de Pb por la planta de papa.	110
Figura 42. Análisis de ruta que muestra el efecto directo e indirecto que algunas variables del suelo tienen en la Absorción total de Cu por la planta de papa.	110

Figura 43. Análisis de ruta que muestra el efecto directo e indirecto que algunas variables del suelo tienen en la Absorción total de Zn por la planta de papa.	111
Figura 44. Análisis de ruta que muestra el efecto directo e indirecto que algunas variables del suelo tienen en el rendimiento fresco de papa.	111
Figura 45. Porcentaje de áreas de cultivo de papa en la región Amazonas, 2020.	112
Figura 46. Porcentaje de agricultores consultados si realizan un análisis de suelo previo a la siembra.	115

RESUMEN

Los elementos traza (ETs) están en bajas concentraciones en el suelo y algunos no cumplen función alguna para las plantas y podrían llegar ser tóxicos. La acumulación de ETs en los suelos se debe principalmente a fuentes antropogénicas. El cultivo de papa es predominante en la región Amazonas. Por lo que, se determinaron las concentraciones de ETs en los fertilizantes utilizados para este cultivo. Se caracterizó fisicoquímicamente los suelos de cultivo, y se seleccionaron suelos de cultivo para la determinación de ETs en tejidos vegetales. Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Investigación de Suelos y Aguas de la UNTRM. Se realizó análisis de regresión lineal múltiple con los que se desarrolló modelos de predicción para la concentración de ETs en la planta. Las concentraciones de ETs en fertilizantes estuvieron dentro de los límites normativos de diferentes países. Los suelos de cultivo tuvieron propiedades variables y en general cumplen con los requerimientos para el cultivo de papa. Las concentraciones de ETs en los suelos siguieron el orden $Zn > Pb > Cu > Cd$. Comparados con los límites legales, un significativo porcentaje de suelos estuvieron por encima de los umbrales para la concentración de Pb en suelos agrícolas. Las concentraciones de Pb superan lo establecido por la OMS y FAO para tubérculos. Las concentraciones de ETs generalmente fueron mayores en la raíz y tallo y menores en las partes comestibles, en el tubérculo siguieron el orden $Pb > Zn > Cu$. Se encontraron relaciones entre las concentraciones de ETs en la planta y las propiedades fisicoquímicas de los suelos.

Palabras clave: Papa, elementos traza, suelo, propiedades fisicoquímicas.

ABSTRACT

Trace elements (TEs) are found in low concentrations in soils and some of them have no function for plants and could become toxic. The accumulation of ETs in soils is mainly due to anthropogenic sources. Potato cultivation is predominant in the Amazon region. Therefore, the concentrations of ETs in the fertilizers used for this crop were determined. The physicochemical characterization of the crop soils was carried out, and crop soils were selected for the determination of ETs in plant tissues. The analyses were carried out at the Soil and Water Research Laboratory of the UNTRM. Multiple linear regression analysis was performed to develop predictive models for ETs concentration in the plant. ET concentrations in fertilizers were within the regulatory limits of different countries. Crop soils had variable properties and generally met the requirements for potato cultivation. ETs concentrations in soils followed the order Zn>Pb>Cu>Cd. Compared to legal limits, a significant percentage of soils were above the thresholds for Pb concentration in agricultural soils. Pb concentrations exceeded those established by WHO and FAO for tubers. ET concentrations were generally higher in the root and stem and lower in the edible parts, in the tuber they followed the order Pb>Zn>Cu. Relationships were found between ET concentrations in the plant and the physicochemical properties of the soils.

Keywords: Potato, trace elements, soil, physicochemical properties.

I. INTRODUCCIÓN

La agricultura es una actividad primaria fundamental para el desarrollo de la sociedad y lo ha sido también a lo largo de la historia. Representa la base de la seguridad alimentaria y en países en vías de desarrollo es el impulsor de la economía. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) indica que esta actividad sigue siendo la única forma de ingresos de cerca del 70 % de la población rural de menores ingresos del planeta (García, 2006). En el Perú el aporte de la agricultura al producto bruto interno (PBI) es de 7,3 % y con tendencia a crecer en los últimos años (Banco Mundial, 2017). Si bien queda claro la importancia de la agricultura, en la actualidad se ha puesto especial atención a la contaminación de los suelos agrícolas. Esto viene generando preocupación con respecto a la seguridad alimentaria. La búsqueda de mayores rendimientos ha contribuido al uso intensivo de fertilizantes, enmiendas y plaguicidas, lo cual podría ser una fuente importante de ingreso de contaminantes a los suelos, contaminantes tales como los elementos traza (ETs). Los suelos para la agricultura son la base del sistema alimentario, así como también son fundamentales en varios procesos ecológicos (Kumar et al., 2019) . Por lo tanto, la contaminación de los suelos por ETs, ha empezado a generar preocupación, ya que representa el ingreso de estos elementos a la cadena alimentaria mediante los diferentes cultivos.

Los ETs son aquellos elementos que generalmente no son biodegradables, suelen encontrarse en la naturaleza en bajas concentraciones. Muchos de ellos no son necesarias para las plantas, animales y humanos; pero pueden llegar a ser tóxicos y causar daños a los organismos si superan ciertos umbrales de concentración. Esta definición incluye a los metales pesados, metaloides, micronutrientes y otros elementos (Pierzynski et al., 2005). A largo plazo, estos elementos se van acumulando en el suelo principalmente por fuentes antropogénicas, tales como las derivadas de actividades industriales, mineras y agrícolas (Antoniadis et al., 2019). Entre los ETs tóxicos de mayor importancia ambiental podemos nombrar al cadmio (Cd), plomo (Pb) y Mercurio (Hg) (Alarcón-Corredor, 2009).

1.1. El cultivo de papa

La papa (*Solanum tuberosum*) es uno de los alimentos básicos más importantes del mundo detrás del maíz, el trigo y el arroz (FAO, 2006). Es originaria del altiplano peruano boliviano (International Potato Center, 2019). Es un cultivo de fuerte adaptación al medio ambiente, tiene elevado rendimiento y un alto valor nutricional (Zhang et al., 2017). La papa tiene un alto contenido de proteínas (ocho tipos de aminoácidos esenciales), gran cantidad de vitaminas (incluida la vitamina C), abundante fibra y escasa grasa (Peng et al., 2018). En el 2014, Perú ocupó el 14° lugar en el mundo entre los países que cultivan papa, ocupando el segundo lugar en América y el primero en América del Sur respecto de la producción; en el Perú se cultiva en 19 de las 25 regiones, siendo Puno la región de mayor producción. Perú tiene la mayor diversidad de papas en el mundo, cuenta con ocho especies nativas domesticadas y 2301 variedades (MIDAGRI, 2017). Según la FAO en el 2018, el área cosechada en el Perú fue de 323 092 hectáreas, con un rendimiento promedio de 15,85 toneladas por hectárea (FAO, 2020).

En la región Amazonas la papa se cultiva principalmente en las provincias de Luya y Chachapoyas y se constituye también en uno de los más importantes, cultivándose hasta ocho variedades (Huayro, Huamantanga, Chauchas, Suela colorada, Yungay, Canchán y Amarilis), entre las que destaca la variedad Huayro, la cual representa cerca del 51 % de la superficie total cultivada, con un rendimiento entre 14 a 16 toneladas por hectárea (INIA, 2014). Entre agosto de 2018 y julio de 2019 el área sembrada de papa en la región Amazonas fue de 4 356.50 has, de las cuales la provincia de Chachapoyas representa el 48,5 % y la provincia de Luya el 47,9 %; la producción total en ese periodo fue de 30 871.94 toneladas (MIDAGRI, 2020).

Para el cultivo de la papa en la región Amazonas se hace uso intensivo de fertilizantes químicos con posible contenido de ETs como el Cd, impactando negativamente en la calidad de los productos y en el suelo (Oliva et al., 2019). El potencial ingreso de elementos traza al suelo a través de los fertilizantes se ve favorecido también, porque en la región Amazonas los agricultores generalmente agregan fertilizantes sin realizar un análisis de suelos previo.

1.2. Fertilizantes y elementos traza

La fertilización en la agricultura se ha convertido según muchas investigaciones en una fuente importante de ingreso de ETs a los suelos. Los fertilizantes poseen concentraciones variables de estos elementos, destacando mayores concentraciones en los de naturaleza fosforada. Según Molina et al. (2009), los fertilizantes fosforados tienen mayores concentraciones de ETs de relevancia toxicológica y ambiental. En Alemania, Kratz et al. (2016) determinaron concentraciones de ETs en fertilizantes y tuvieron como resultado niveles elevados de Cd, manganeso (Mn), hierro (Fe) y níquel (Ni). En el caso del Cd y el Ni se superaba la normativa el límite legal alemana para fertilizantes. En Brasil, Silva et al. (2017) evaluaron el riesgo asociado a la aplicación de fertilizantes de naturaleza fosforada a los suelos. En esta investigación se destaca la presencia de concentraciones elevadas de Cd en los fertilizantes que tienen como material de origen a la roca fosfórica, concluyendo que estos representan el principal riesgo para la calidad del suelo. Los fertilizantes de naturaleza orgánica también pueden representar un importante ingreso de ETs a los suelos agrícolas. Investigaciones han evidenciado la presencia elementos como Cd, Pb y As en fertilizantes de naturaleza orgánica en Tailandia (Nookabkaew et al., 2016), China (Gong et al., 2019; Yang et al., 2017). En la mayoría de los casos el Cd presentó mayores concentraciones que incluso para el caso de China, superaban los estándares permitidos para fertilizantes orgánicos.

Por lo previamente revisado respecto de los fertilizantes principalmente de naturaleza fosfórica, se hace necesario investigar el aporte de ETs que estos materiales podrían ingresar a los suelos agrícolas y además de ello podrían ser absorbidos por los cultivos como la papa en la región Amazonas. El empleo de fertilizantes fosforados a largo plazo puede ser un agravante de esta problemática y en la actualidad es motivo de preocupación por el peligro al que está asociado la absorción de elementos como el Cd, Pb y As y su posterior ingreso a la cadena alimentaria (Singh et al., 2017).

1.3. Acumulación de elementos traza en la papa

Diversas investigaciones sustentan la acumulación de ETs en la papa, generalmente estos estudios se centran en determinar la concentración de estos elementos en los tubérculos por su importancia directa en la alimentación. En algunos casos las concentraciones de ETs en los tubérculos incluso han superado los límites máximos establecidos por la FAO y la

Organización Mundial de la Salud (OMS), generando aún mucha más preocupación. Si bien es cierto la fuente de ETs de las investigaciones son variables, hay un gran número de ellas en las que se atribuye el ingreso de estos elementos a la fertilización. Así tenemos estudios realizados en países como Irán (Jalali y Meyari, 2016), Serbia (Bošković-Rakočević et al., 2017), China (Liu et al., 2018), Sri Lanka (Silva et al., 2018) y Nueva Zelanda (Gray et al., 2019). Así mismo, Oliva et al. (2019) determinaron Cd en sistemas de cultivo de papa en la región Amazonas (Perú). Teniendo como resultado concentraciones de Cd en tubérculos de papa de hasta 0,23 ppm, valor que supera el 0,1 ppm establecido en el Codex Alimentario (FAO, 2014). De esta manera se hace necesario abordar la problemática de una manera más profunda en los sistemas cultivos de papa de la región Amazonas.

1.4. Factores que determinan la acumulación de elementos traza en la papa

La absorción y la acumulación de ETs potencialmente tóxicos en el cultivo de papa pueden verse influenciados por ciertos factores tales como de suelo, de manejo y ambientales. Entre todos estos factores, el suelo se presenta como el más importante puesto que es determinante en la disponibilidad de los ETs para los cultivos; la solubilidad y movilidad de estos dependen de propiedades como el potencial de hidrógeno (pH), materia orgánica, textura, capacidad de intercambio catiónico (CIC), presencia de otros elementos e incluso la presencia de microorganismos (Gupta et al., 2019). Específicamente en cultivo de papa, según (Bojanowska y Jackowska, 2015) las propiedades más efectivas para monitorear concentraciones de Cd y Pb en los tubérculos son el pH del suelo, la fracción de limo y arcilla, nitrógeno mineral y el fósforo disponible. Por otro lado, Sanderson et al. (2019) demostró que la mayoría de propiedades del suelo están relacionadas con la acumulación de Cd en el tubérculo, siendo la concentración de cinc (Zn) y el pH del suelo las variables más significativas.

Los factores de manejo también pueden ser determinantes en la acumulación y absorción de ETs, entre estos factores tenemos las variedades de papa, uso de fertilizantes, uso de pesticidas, riego, sistemas de producción, etc. Las investigaciones en este caso se han centrado en evaluar distintas variedades de papa, encontrando diferencias significativas en la acumulación de Cd (Ashrafzadeh et al., 2017; Gray et al., 2019; Mengist et al., 2017; Ye et al., 2020). Por otro lado, también algunas investigaciones han encontrado influencia de

algunos factores ambientales tales como la transpiración del suelo (Ingwersen y Streck, 2005), altitud (Zhang et al., 2017) y la temperatura del aire (Yi et al., 2020). En todos estos casos los factores ambientales influyeron significativamente en la absorción de Cd por el cultivo. Por lo tanto, es importante determinar los factores que influyen en la acumulación de ETs en el cultivo de papa en la región Amazonas, ya que con dicha información es posible evaluar alternativas que pudiesen aplicarse más adelante para disminuir la absorción de estos elementos para el cultivo seguro de este producto.

1.5. Modelamiento y evaluación de riesgos por elementos traza en cultivos de papa

Para evaluar de una mejor manera a lo que pueden estar expuestos los sistemas de cultivo de papa respecto de los ETs, se utiliza el modelamiento matemático. Esta es una herramienta con la que se puede estudiar el comportamiento de los sistemas naturales, se pueden modelar los procesos físicos y químicos; no obstante, en la realidad los procesos suelen ser más complejos, pues el comportamiento de las variables depende de otras variables incluyendo la sinergia entre ellas (Ascurra, 2019). También utilizando esta herramienta ha sido posible determinar los principales factores que pueden influir en la acumulación y la absorción de ETs en cultivos como la papa (Bešter et al., 2013; Sanderson et al., 2019; Zhang et al., 2017). Es posible entonces utilizar estas herramientas para determinar los principales factores de campo que determinan la absorción y acumulación de ETs en los cultivos de papa de la región Amazonas, específicamente en la variedad INIA 323 (huayro amazonense). De esta manera los modelos predictivos que resulten de esta investigación serán útiles para los agricultores, y en el mejor de los casos también ser útiles para los responsables políticos locales y regionales, a los cuales les permitirá realizar mejores evaluaciones sobre el uso seguro del suelo y la producción segura de alimentos (Ding et al., 2013; Viala et al., 2017).

Para la evaluación de riesgos que pueden representar la acumulación de ETs en los agroecosistemas también se utilizan ciertos índices o factores. Por ejemplo, el factor de bioacumulación (BCF) también llamado factor de acumulación o transferencia, que describe la transferencia de ETs del suelo a los tejidos vegetales (Chen et al., 2009). Para el caso de la papa será la relación que existe entre la concentración de ETs en el tubérculo y la concentración de ETs en el suelo (Sanderson et al., 2019). En esta investigación incluso el BCF de Cd en el tubérculo de papa proporcionó una evaluación más precisa de la influencia

de las variables del suelo respecto de la acumulación de Cd en tubérculos de papa. Por otro lado, el coeficiente de partición (K_d) que es la relación de la concentración de un elemento traza entre la fase sólida y la fase solución (Degryse et al., 2009; Filipović et al., 2016; Legind et al., 2012). Se utiliza para expresar la adsorción de ETs al suelo (Nakamura et al., 2017). El K_d se utiliza junto al BCF para la evaluación de riesgos que representan los ETs en los sistemas de cultivos (Yang et al., 2017), también con ellos se han desarrollado modelos predictivos teniendo en cuenta factores del suelo como el pH (De Vries et al., 2011; Ding et al., 2013).

1.6. Necesidad de la sostenibilidad en el cultivo de papa

Por otro lado, la búsqueda de mayores rendimientos de los cultivos utilizando de manera intensiva los fertilizantes, además de algunas otras prácticas de manejo han conducido a la degradación de los suelos y a través de ello la degradación del medio ambiente e impactar en la sociedad. La agricultura es necesaria, pero de la manera convencional es insostenible, pues propicia la explotación del suelo, agua y bosque causando degradación y contaminación (Salmeron y Valverde, 2016). Por lo que se hace necesario equilibrar la productividad con los resultados ambientales y sociales, lo que se traduce en promover el concepto de agricultura sostenible (Garibaldi et al., 2017). Para alcanzar la sostenibilidad de los agroecosistemas de manera general, la fertilidad y la productividad del suelo son elementos estratégicos vitales que se deben mejorar y conservar. Esta problemática no es ajena en la región Amazonas, y de forma más específica en el cultivo de papa. Es así como esta investigación de acuerdo a los resultados obtenidos brinda una propuesta de sustentabilidad para el cultivo de papa en la región Amazonas.

De esta manera el presente trabajo de investigación justifica su importancia en todos sus aspectos. Uno de ellos es la importancia del cultivo de papa en la región Amazonas, la cual se produce de forma mayoritaria en las provincias de la Luya y Chachapoyas. Esta importancia está directamente relacionada con la alimentación de la población y los efectos en la salud que pueden representar a largo plazo, el ingreso de ETs potencialmente tóxicos a la cadena alimentaria. Además, se justifica en la importancia de determinar las relaciones existentes entre la absorción y acumulación de estos elementos por el cultivo de papa y las propiedades del suelo y factores de manejo. El conocimiento generado será valioso para

proponer alternativas en el futuro, cuyo objetivo será el de disminuir la absorción y acumulación de ETs como el Cd en la papa, lo cual contribuirá a la producción segura y sustentable de este alimento.

Los objetivos que se plantearon en esta investigación son los siguientes:

Objetivo general

Evaluar la potencial acumulación de elementos traza en sistemas de cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) de la región Amazonas.

Objetivos específicos

Determinar la concentración de cadmio, plomo, cobre y cinc en los fertilizantes comúnmente utilizados en sistemas de cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) de la región Amazonas en Perú.

Determinar posibles relaciones, a través de un modelo empírico, entre las propiedades físico-químicas del suelo con la concentración, extracción e índice de bioacumulación de estos elementos en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.)

Diseñar una propuesta de desarrollo sustentable para el cultivo de papa en la región Amazonas, con énfasis en el manejo de la acumulación de elementos traza.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Ubicación

Esta investigación se realizó en la región Amazonas. Las parcelas de cultivos de papa estuvieron ubicadas en las provincias de Luya y Chachapoyas por ser las provincias predominantes en el cultivo de esta especie. Las ubicaciones de las parcelas seleccionadas se detallan a en la Tabla 1.

Tabla 1. *Ubicación referencial de las parcelas de cultivos de papa.*

Código de parcela	Coordenadas geográficas		Altitud (m.s.n.m.)	Distrito	Provincia
SS01	197055	9316724	2578,4	Quinjalca	Chachapoyas
SS02	182530	9269376	2961,3	Santo Tomás	Luya
SS03	197084	9316989	2547,8	Quinjalca	Chachapoyas
SS04	181807	9304444	2957,2	Levanto	Chachapoyas
SS05	828276	9313353	2915,8	Conila	Luya
SS06	183354	9303798	3090,2	Levanto	Chachapoyas

2.2. Materiales, equipos y reactivos

Para llevar a cabo esta investigación se utilizó diferentes materiales, equipos y reactivos los cuales se detallan en las Tablas 2, 3 y 4. Imágenes de los principales equipos utilizados se muestran en el Anexo 14.

Tabla 2. *Materiales utilizados en la investigación.*

N°	Material
1	Bolsas herméticas para muestreo de fertilizantes y suelos
2	Palana de corte para muestreo de suelos
3	Espátulas para muestreo de suelos
4	Tamizador para suelos
5	Morteros de porcelana
6	Tubos para digestión de muestras
7	Fiolas de 25 mL, 50 mL, 250 y 500 mL.
8	Vasos de precipitado de 50 mL, 100 mL, 250 mL y 500 mL
9	Probeta de 100 mL, 500 mL y 1000 mL
10	Matraces de 250 mL
11	Matraces de Erlenmeyer de 125 mL
12	Bureta
13	Tubos de ensayo

14	Gradillas para tubos de ensayo
15	Termómetros
16	Hidrómetro de suelos
17	Titulador automático
18	Frascos de vidrio con tapa de plástico de 50 mL
19	Frascos de plástico con tapa de 50 mL
20	Embudos
21	Papel filtro Whatman N° 42
22	Papel aluminio
23	Pipetas
24	Picetas
25	Crisoles
26	Sobres manila
27	Engrapador
28	Navaja / cúter
29	Papel toalla
30	Cinta adhesiva
31	Plumones indelebles
32	Fuentes de aluminio

Tabla 3. *Equipos utilizados en la investigación (imágenes se muestran en el Anexo 14).*

N°	Equipo
1	Espectrómetro de emisión atómica de plasma por microondas (MP-AES)
2	Potenciómetro de mesa marca HANNA
3	Espectrofotómetro UV-visible marca THERMO SCIENTIFIC
4	Bloque digestor de muestras marca PSELECTA
5	Estufa marca ECOCELL
6	Agitador de muestras marca GFL
7	Campana extractora de gases tóxicos marca ESCO
8	Balanza analítica marca OHAUS
9	Balanza analítica ADAM Nimbus
10	Agitador mecánico para textura
11	Molino para suelos
12	Molino para muestras vegetales (tamiz de poro de 0.5 mm)
13	Equipo GPS
14	Laptop
15	Celular

Tabla 4. *Reactivos utilizados en la investigación.*

N°	Reactivos
1	Ácido nítrico concentrado
2	Ácido clorhídrico concentrado
3	Soluciones estándares de Cd, Pb, Cu y Zn.
4	Solución de hexametáfosfato de sodio al 10 %
5	Alcohol amílico
6	Agua desionizada
7	Peróxido de hidrógeno al 30 % v/v
8	Solución buffer de calibración 4,01; 7,00 y 10,01
9	Solución de mantenimiento de electrodos
10	Solución estándar de conductividad eléctrica 1412 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 0,0146 mS/cm
11	Dicromato de potasio 1N
12	Ácido sulfúrico concentrado
13	Solución de sal de Mohr 0,5 N
14	Bicarbonato de sodio 0,5 M pH 8,5
15	Tartrato de antimonio y potasio
16	Carbón activado
17	Ácido ascórbico
18	Hidróxido de sodio
19	Molibdato de amonio
20	Acetato de amonio 1 N, pH 7
21	Alcohol etílico 96 ° GL
22	Reactivo de Nessler A
23	Indicador de fenolftaleína 0,1 %
24	Formaldehido al 37 %
25	Cloruro de sodio al 10 %
26	Ácido acético
27	Hidróxido de amonio
28	Ácido etildiaminotetraacético 0,05 M
29	Hidróxido de amonio al 32 %
30	Soluciones estándar de fósforo
31	Solución de vanadato de amonio, 0,9 g/l

2.3. Población, muestra y muestreo

2.3.1. Fase I

Población

Constituida por todos los fertilizantes utilizados para el cultivo de papa de variedad Huayro Amazonense (INIA 323) en la región Amazonas. Los fertilizantes que se incluyeron fueron: urea (nitrogenado), fosfato di amónico (fosforado), cloruro de potasio (potásico) y un fertilizante de naturaleza orgánica denominado gallinaza.

Muestra

La muestra de fertilizante estuvo constituida por un kilogramo de cada uno de los fertilizantes utilizados para el cultivo de papa variedad Huayro Amazonense (INIA 323) en la región Amazonas. En la siguiente figura se pueden ver las diferentes muestras de los fertilizantes:



Figura 1. Muestras de fertilizantes utilizados en el cultivo de papa en la región Amazonas.

Muestreo

El muestreo fue no probabilístico de tipo intencional y se recolectaron las muestras de las casas comerciales de fertilizantes de la ciudad de Chachapoyas en la región Amazonas.

2.3.2. Fase II

Actividad 1: Caracterización y determinación de Cd, Pb, Cu y Zn en suelos de cultivos de papa de la región Amazonas

Población

Inicialmente la población fue de 40 muestras de suelos de cultivo de papa, luego se seleccionaron seis suelos intervenidos para sistemas de cultivo de papa (en los que se sembró la variedad de estudio) y seis suelos sin cultivar que son adyacentes a los suelos seleccionados para cultivo de papa de la región Amazonas, se consideraron las provincias de Luya y Chachapoyas.

Muestra

Las muestras estuvieron constituidas por dos kilogramos de suelo para sistemas de cultivo de papa de la región Amazonas. Las muestras de suelo se realizaron a una profundidad de 0-30 cm (Eissa y Negim, 2018; Jalali y Meyari, 2016; Özkan y Uygur, 2019).

Muestreo

El muestreo fue probabilístico de tipo sistemático y se realizó para cada productor de forma individual. Cada parcela fue subdividida y se seleccionó un área relativamente uniforme de una hectárea, esto representó la unidad de muestreo. Se obtuvo tres muestras distribuidas de manera uniforme (grilla definida), cada muestra estuvo compuesta de cinco submuestras. Esta intensidad de muestreo asegura la representatividad de la muestra (Havlin et al., 2005). El muestreo de suelos se realizó antes de la siembra. Para el muestreo de suelos sin cultivar, se procedió de la misma manera.



Figura 2. Muestra de suelo para cultivo de papa en el distrito de Cheto, provincia de Chachapoyas.



Figura 3. Georreferenciación de los puntos de muestreo de suelos.

Actividad 2: Determinación de la concentración y absorción de Cd, Pb, Cu y Zn en partes vegetales (raíces, tallos, hojas y tubérculos) de cultivos de papa seleccionados de la región Amazonas

Población

Seis sistemas de cultivo de papa de la variedad INIA 323 (huayro amazonense) que fueron cultivados en los suelos seleccionados en la actividad 1 de esta fase.

Muestra

Tres puntos de muestreo en cada sistema de cultivo, tres plantas seguidas sobre la hilera por punto de muestreo, de la cual se consideraron separadamente las raíces, tallos, hojas y tubérculos. En el caso de los tubérculos se tomaron 6-10 de cada planta (Jalali y Meyari, 2016).

Muestreo

El muestreo fue probabilístico de tipo sistemático. Se recolectaron muestras tanto de raíces, tallos, hojas y tubérculos de los sistemas de cultivo de papa seleccionados en la actividad 1 de esta fase de la investigación. Las muestras se tomaron 15 días antes de la cosecha, esto para evitar la pérdida de material vegetal.



Figura 4. Sistema de cultivo de papa variedad INIA 323 seleccionado para la investigación.



Figura 5. Muestra de plantas de papa variedad INIA 323.



Figura 6. Muestra de tubérculos de papa variedad INIA 323.

Actividad 3: Determinación de posibles relaciones entre las propiedades fisicoquímicas del suelo con la concentración y absorción de elementos traza en papa (*Solanum tuberosum* L.) variedad INIA 323 (huayro amazonense) de la región Amazonas.

Se utilizó la información de las propiedades fisicoquímicas de los seis suelos de sistemas de cultivo de papa seleccionados en la fase II de la investigación.

2.3.3. Fase III: Objetivo específico 3

Diseño una propuesta de desarrollo sustentable para el cultivo de papa en la región Amazonas.

2.4. Metodología

2.4.1. Fase I: Objetivo específico 1

Determinación de fertilizantes a analizar

Para determinar los fertilizantes a analizar se realizó una encuesta (Anexo 1) a 40 agricultores de la región Amazonas en las provincias de Luya y Chachapoyas. La encuesta se aplicó entre los meses de octubre y noviembre de 2020. En esta encuesta se determinó los fertilizantes que se utilizan para el cultivo de la papa en la región Amazonas, además de las dosis de fertilización que utilizan los productores para el cultivo de papa. Esta encuesta fue validada por especialistas (Anexo 2) antes de su aplicación. La información recopilada en esta encuesta también nos fue útil para la fase tres de la investigación.

Para determinar la cantidad de agricultores a los que se aplicó la encuesta se usó la fórmula de la población finita, teniendo en cuenta que según el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI, 2020) que el número de productores de papa de la región Amazonas es de 5 304.

$$n = \frac{N * Z_{\alpha}^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z_{\alpha}^2 * p * q}$$

Donde:

n = Tamaño de muestra buscado

N = Tamaño de la población (5 304)

Z = Parámetro estadístico que depende del nivel de confianza (1,96 para un nivel de confianza del 95 %)

e = Error de aceptación máximo aceptado (7 %)

p = Probabilidad de que ocurra el evento estudiado (éxito) (95 %)

$q=1- p$ = Probabilidad de que no ocurra el evento estudiado. (5 %)

De esta manera, al reemplazar los datos se obtuvo un resultado de 37 muestras; por lo que se decidió realizar un total de 40 encuestas. Como el estudio está orientado a las provincias de Luya y Chachapoyas por ser las que más producen papa en la región Amazonas, se realizaron 20 encuestas en cada provincia. Para elegir los distritos en los que se aplicó la encuesta, se tuvo en cuenta los distritos de mayor área de siembra. En áreas más grandes de siembra se utilizan mayores cantidades de fertilizantes; además, la producción en estos distritos tiene objetivos comerciales, de esta manera la aplicación de fertilizantes tiende a ser mayor en busca de rendimientos más elevados. Para dicha elección se obtuvo información del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego sobre el cultivo de papa en las provincias de Luya y Chachapoyas de los últimos tres años, la cual se detalla en la Tablas 5 y 6. Como criterio se tomó en cuenta que el instrumento se aplicará a los distritos que tengan mayor área sembrada y en suma representen el 50 % del área total de cada provincia. De esta manera quedaron 5 distritos de cada provincia en los cuales se aplicó las encuestas. Los distritos seleccionados en la provincia de Chachapoyas fueron: Soloco, Levanto, Cheto, La Jalca y Quinjalca. Los distritos seleccionados en la provincia de Luya fueron: Luya, Trita, Conila, Santo Tomás y Longuita.

Tabla 5. *Ranking según hectáreas se siembra de cultivo de papa en la provincia de Chachapoyas por distritos, periodo 2018-2020.*

Distrito	Área de siembra (has)	Sumatoria de área de siembra (has)	Porcentaje acumulado
Soloco	704,00	704,00	12,58 %
Levanto	638,00	1342,00	23,99 %
Cheto	588,00	1930,00	34,50 %
La Jalca	507,00	2437,00	43,56 %
Quinjalca	430,00	2867,00	51,25 %
Leymebamba	424,50	3291,50	58,83 %
Chiliquín	322,00	3613,50	64,59 %
Asunción	312,00	3925,50	70,17 %
Maino	308,00	4233,50	75,67 %
M. Castilla	265,50	4499,00	80,42 %
Granada	184,00	4683,00	83,71 %
Olleros	158,00	4841,00	86,53 %
Molinopampa	152,00	4993,00	89,25 %
Magdalena	131,00	5124,00	91,59 %
Chachapoyas	112,00	5236,00	93,59 %
Chuquibamba	109,50	5345,50	95,55 %
Balzas	89,50	5435,00	97,15 %
Montevideo	65,00	5500,00	98,31 %
Sonche	56,00	5556,00	99,31 %
Huancas	26,50	5582,50	99,79 %
Daguas	12,00	5594,50	100,00 %
TOTAL	5594,50		

Nota: Elaborado con la información del (MIDAGRI, 2020)

Tabla 6. *Ranking según hectáreas se siembra de cultivo de papa en la provincia de Luya por distritos, periodo 2018-2020.*

Distrito	Área de siembra (has)	Sumatoria de área de siembra (has)	Porcentaje acumulado
Luya	527,00	527,00	12,51 %
Trita	508,00	1035,00	24,58 %
Conila	499,00	1534,00	36,43 %
Santo Tomás	485,00	2019,00	47,95 %
Longuita	340,00	2359,00	56,02 %
Lamud	282,00	2641,00	62,72 %
Luya Viejo	199,00	2840,00	67,44 %
S.F. Yeso	194,00	3034,00	72,05 %
María	187,00	3221,00	76,49 %
Colcamar	186,00	3407,00	80,91 %
Santa Catalina	173,00	3580,00	85,02 %
San Jerónimo	142,00	3722,00	88,39 %
Tingo	108,00	3830,00	90,95 %
Lonya Chico	84,00	3914,00	92,95 %
San Cristobal	79,00	3993,00	94,82 %
Cocabamba	75,00	4068,00	96,60 %
S.J. Lopecancha	67,00	4135,00	98,20 %
Pisuquia	30,00	4165,00	98,91 %
Camporredondo	23,00	4188,00	99,45 %
Providencia	13,00	4201,00	99,76 %
Inguilpata	10,00	4211,00	100,00 %
TOTAL	4211,00		

Nota: Elaborado con la información del (MIDAGRI, 2020)

Análisis de fertilizantes

Para la determinación de Cd, Pb, Cu y Zn en los fertilizantes se utilizó el método de digestión de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos 3050B (US-EPA, 1996). Este método se utiliza comúnmente para cuantificar contenidos totales de varios ETs, entre ellos Cd, Pb, Cu y Zn, para los cuales el método proporciona una alta recuperación.

El proceso de digestión de muestras para los fertilizantes de naturaleza inorgánica se realizó según el método 3050B, pero solamente hasta cierta etapa, puesto que la digestión fue

completa en las muestras, el método completo se adjunta en el Anexo 4. Para los fertilizantes inorgánicos el método se resume de la siguiente manera: Se tomó una muestra de 1 g de fertilizante la cual previamente se trituró en un mortero; luego a la muestra se añadió 10 mL de una solución de ácido nítrico (HNO_3) 1:1 en un tubo de digestión de vidrio y las muestras se calentaron a 95 ± 5 °C durante 15 minutos. Luego de haber enfriado 10 minutos se añadió 5 mL de HNO_3 concentrado y se calentó durante otros 30 minutos. Luego de enfriar 10 minutos se llevó la muestra a calentamiento a 95 ± 5 °C sin hervir durante dos horas. Las partículas en el digestato se eliminaron por filtración y se aforó el resumen a 25 mL con agua ultrapura. En la Figura 7 se muestran imágenes del proceso de digestión de fertilizantes inorgánicos. Para el caso de la gallinaza que es de naturaleza orgánica se realizó el método de digestión completo. En todos los casos los análisis se realizaron por triplicado.

Luego de la digestión de las muestras se determinó las concentraciones los elementos en un espectrómetro de emisión atómica de plasma por microondas (MP-AES) (Figura 1) del Laboratorio de Investigación de Suelos y Aguas (LABISAG) del Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES-CES) – Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM).

Se estimó el aporte de ETs al suelo (g/ha) analizados en función de la dosis promedio de fertilización del cultivo y la concentración de estos elementos determinadas en los análisis de laboratorio.

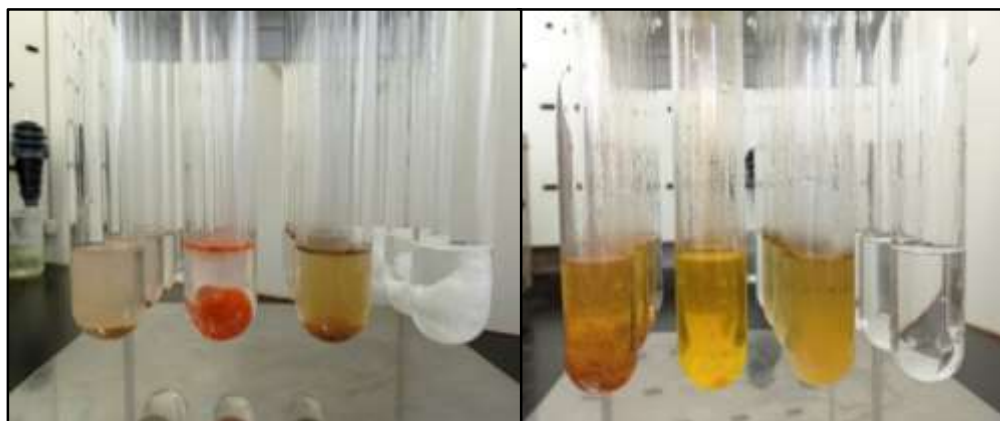


Figura 7. Digestión de muestras de fertilizantes inorgánicos utilizados en el cultivo de papa.

Análisis de datos de los fertilizantes

Para cada ET analizado en cada grupo se determinó la desviación estándar, media aritmética, mediana y el rango de concentración. También se calculó el coeficiente de variación de un elemento específico para cada tipo de fertilizante.

Con los datos de concentración ETs de cada fertilizante para cultivo de papa y los datos de dosis de fertilización se obtuvo el aporte mínimo y máximo de ETs por fertilización para una temporada de cultivo de papa. Para ello se utilizó la siguiente fórmula:

$$Aporte\ ET = CET_{fertilizante} * \%Fert * DF$$

Donde:

$CET_{fertilizante}$ = Concentración de ET del fertilizante ($mg\ kg^{-1}$)

$\%Fert$ = Porcentaje del fertilizante en la mezcla comercial

DF = Dosis de fertilización (kg/ha)

2.4.2. Fase II

Actividad 1: Caracterización y determinación de Cd, Pb, Cu y Zn en suelos de cultivos de papa de la región Amazonas

Selección de suelos de cultivo de papa

Las provincias en las que se hizo la selección de suelos de papa, fueron Luya y Chachapoyas. Para seleccionar los suelos que formaron parte de la investigación se realizó una encuesta a diferentes productores de papa, con el objetivo de determinar: la cantidad de años de cultivo de papa que tiene la parcela, el tipo de fertilizante utilizado, dosis de fertilización, momento de aplicación de los fertilizantes, etc. También se tuvo en cuenta la confiabilidad y accesibilidad al agricultor.

Análisis de suelos

Inicialmente fueron realizados los análisis de 40 muestras de suelos para cultivo de papa, luego se seleccionaron seis parcelas para la siguiente fase de investigación, además se consideraron muestras de suelos adyacentes a las seis parcelas seleccionadas, las cuales también fueron analizadas.

La determinación de la concentración total de Cd, Pb, Cu y Zn en suelos se realizó después de la digestión según el método 3050 B de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA, 1996). La determinación de la concentración disponible de Cd, Pb, Cu y Zn se utilizó una solución extractante de ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) a una concentración 0,05 molar y un pH de 7,0. A una muestra de 5,0 g de suelo se le agregó 20 mL de la solución extractante EDTA, luego se llevó a agitación por 15 minutos para después filtrar (Rodríguez, 2017). Para la determinación de los ETs se utilizó un MP-AES del LABISAG, INDES-CES, UNTRM.

Las propiedades fisicoquímicas del suelo también se determinaron en el Laboratorio de Investigación de Suelos y Aguas del INDES-CES (UNTRM). Para estos análisis se siguió la metodología indicada en la Tabla 7.

Tabla 7. *Métodos de análisis de las propiedades fisicoquímicas del suelo.*

Parámetros	Método
Físicos	
Textura	Hidrómetro y el método de tamizado (Gee y Bauder, 1986)
Cantidad de arcilla (<2 μ m)	Hidrómetro (Bao, 2000)
Químicos	
pH	pHmetro Hanna, en una relación suelo agua 1:2.5 (Bao, 2000)
Materia orgánica	Walkley - Black (Walkley, 1934)
Capacidad de intercambio catiónico	Con acetato de amonio (Gregorich y Carter, 2007)
Conductividad eléctrica	Conductímetro Hanna (Gregorich y Carter, 2007)
Nitrógeno total en suelos	Método KJheldahl (Bremner, 1996)
Fósforo disponible en suelos	Olsen modificado (Vargas et al., 1992) y determinación en un espectrómetro UV-visible.
Potasio, calcio y magnesio en suelos	Extracción con acetato de amonio y determinación con el MP-AES.



Figura 8. Pesado de muestras de suelo.



Figura 9. Determinación de textura en de los suelos de cultivo de papa.



Figura 10. Determinación de pH en muestras de suelos.



Figura 11. Determinación de fósforo en suelos.



Figura 12. Determinación de materia orgánica en muestras de suelos.



Figura 13. Digestión de muestras de suelo para determinación de la concentración total de elementos traza.

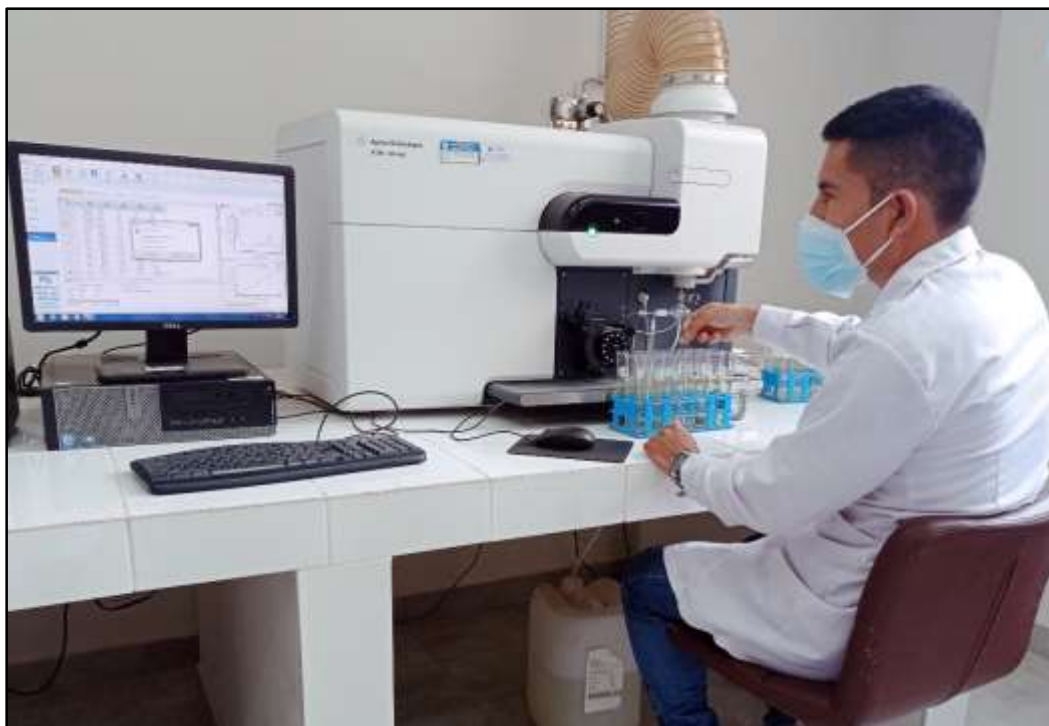


Figura 14. Determinación de elementos traza en muestras de suelos en el equipo MP-AES.

Análisis de datos de suelos

Se determinó la media, mediana, rango, desviación estándar y coeficiente de variación para las propiedades fisicoquímicas y el contenido de ETs de los 40 suelos seleccionados. Se realizó el test de normalidad Shapiro Wilk para los datos de propiedades fisicoquímicas y concentración de ETs para los 40 suelos para cultivo de papa, luego se realizó el análisis de correlación de Spearman. También se realizó análisis de regresión simple para las propiedades que presentaron mayor correlación, además de que la correlación era significativa. Se realizó también un análisis de componentes principales (ACP) para las propiedades fisicoquímicas y las concentraciones de ETs de los 40 suelos. Se realizó el análisis de regresión múltiple (RLM) backward, forward y stepwise para la selección de variables y creación de modelos con las variables más significativas.

Para los datos de propiedades fisicoquímicas y concentración de ETs de los seis suelos seleccionados se determinó el rango, media, mediana, desviación estándar y coeficiente de variación. Se realizó también análisis de correlación de Spearman, ello previo test de normalidad de Shapiro Wilk. Para los seis suelos adyacentes sin cultivar se determinó el

rango, media, mediana, desviación estándar y coeficiente de variación de las propiedades fisicoquímicas y las concentraciones de ETs. Luego se realizó una comparación entre las propiedades fisicoquímicas y concentración de ETs entre los seis suelos seleccionados cultivados y los seis suelos de parcelas adyacentes no cultivados. Se realizó entonces el test de normalidad de Shapiro Wilk, luego se realizó la prueba T student para las variables con distribución normal y la prueba de Wilcoxon para las variables que no presentaron distribución normal.

Actividad 2: Determinación de la concentración y absorción de Cd, Pb, Cu y Zn en partes vegetales (raíces, tallos, hojas y tubérculos) de cultivos de papa seleccionados de la región Amazonas

Análisis de partes vegetales

Esta actividad comprendió el análisis de las partes vegetales de los seis sistemas de cultivos de papa de los suelos seleccionados en la actividad 1 de esta fase. Se realizó la separación de las plantas y tubérculos al momento de cosecha. En el laboratorio, previo al secado las muestras se lavaron (triple lavado) y se separó las plantas en sus diferentes órganos (raíz, tallo y hojas). Se cuantificó la producción de materia fresca y el rendimiento en el caso de tubérculos. Se realizó un proceso de secado de las muestras por separado (raíz, tallos, hojas, tubérculos y cáscara de tubérculos) a 70 °C hasta masa constante y luego a las muestras se le realizó un molido (Mengist et al., 2017). Se realizó una digestión ácida de las muestras vegetales utilizando HNO₃ y H₂O₂ adecuando las metodologías descritas por Jalali y Meyari (2016) y Figueroa et al. (2008). Se pesaron 0,25 gramos de muestra y se agregaron 5 mL de HNO₃ concentrado, luego se calentaron a 65 °C por 60 minutos y 120 °C por 60 minutos. Una vez las muestras enfriadas se agregaron 0,25 mL de H₂O₂ y se dejó reaccionar por 30 minutos. Luego se filtró y se aforó a 25 mL con agua ultrapura. La determinación de Cd, Pb, Cu y Zinc; se realizó en un espectrómetro de emisión atómica de plasma por microondas (MP-AES) en el Laboratorio de Investigación de Suelos y Aguas del Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva – Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Los análisis de P en las partes vegetales, se realizó por colorimetría de fosfo-vanadomolibdato (Sadzawka et al., 2007) y se determinaron utilizando un espectrofotómetro UV-visible. Este método utiliza la solución

obtenida en la digestión ácida para determinación de Cd, Pb, Cu y Zn, de la cual se toma un mililitro y se agrega cuatro mililitros de la solución de nitro-vanadomolibdato.



Figura 15. Digestatos finales de muestras de tejidos vegetales de papa.



Figura 16. Soluciones de muestras de partes vegetales para determinación de fósforo.

Absorción de elementos traza:

Utilizando los datos de concentración de Cd, Pb, Cu y Zn (mg kg^{-1}) en los tejidos vegetales y la producción de materia seca (MS, kg/ha), se calculó la absorción total de ETs en la planta y la absorción (extracción) total de elementos en los tubérculos:

$$\text{Extracción tubérculo (g/ha)} = C_{\text{tubérculo}} \times MS_{\text{tubérculo}}$$

$$\text{Extracción total } \left(\frac{\text{g}}{\text{ha}}\right) = C_{\text{tubérculo}} \times MS_{\text{tubérculo}} + C_{\text{hojas}} \times MS_{\text{hojas}} + C_{\text{tallos}} \times MS_{\text{tallos}} + C_{\text{raíz}} \times MS_{\text{raíz}}$$

Donde C y MS son la concentración de ETs y la producción de materia seca en las diferentes partes de la planta respectivamente. Además, se calculó el factor de concentración biológica en tubérculos, BCF, o denominado también factor de bioacumulación o transferencia (Ai et al., 2018; Zhang et al., 2017; Zhuang et al., 2009). Se utilizó la siguiente fórmula:

$$BCF_{\text{total}} = \frac{C_{\text{tubérculo}}}{C_{\text{soil}}}$$

Donde, C_{soil} es la concentración total o disponible de ETs en el suelo.

Coefficiente de partición:

Para Zn, se calculó el coeficiente de partición sólido-disponible (K_d), el cual está matemáticamente definido por:

$$K_d = \frac{C_{\text{total}}}{C_{\text{disponible}}}$$

Donde, C_{total} y $C_{\text{disponible}}$ son la concentración total (fase sólida) y de la concentración disponible de un ET en el suelo, respectivamente (Chen et al. 2006).

Análisis de datos

Se determinó el promedio y la desviación estándar de la producción de materia seca en los órganos de la planta de papa de las seis parcelas seleccionadas. Se realizó la comparación de medias de estos datos utilizando el test de Tukey, el test de normalidad se realizó mediante Shapiro Wilk. Se determinó también el promedio más la desviación estándar del porcentaje

materia seca en los diferentes órganos de la planta de papa para las seis parcelas seleccionadas. Además, para estos datos se realizó el análisis de varianza con el test de Tukey para los que tenían distribución normal y la prueba de homocedasticidad con el test de Bartlett. Para los que no tenían una distribución normal realizó la comparación con el test de Kruskal Wallis.

Se determinó el promedio y desviación estándar del rendimiento fresco y se realizó un análisis de varianza con el test de Tukey del rendimiento fresco para encontrar diferencias entre los sitios seleccionados, el análisis de normalidad se realizó con el test de Shapiro Wilk y la prueba de homocedasticidad con el test de Bartlett. Se realizó un análisis de correlación de Spearman entre la cantidad de materia seca en cada parte de la planta y el rendimiento fresco en cada parcela, para el test de normalidad se utilizó Shapiro Wilk.

Se determinó también el promedio y la desviación estándar de las concentraciones de ETs en las diferentes partes de la planta de papa de las seis parcelas seleccionadas. Se realizó el test de Tukey para los datos con distribución normal, la prueba de normalidad se realizó con Shapiro Wilk y la prueba de homocedasticidad con el test de Bartlett. Para los datos que no tenían una distribución normal o no tenían homocedasticidad se realizó la comparación con Kruskal Wallis.

Se determinó el promedio y la desviación estándar del factor de transferencia entre las partes de la planta de papa de las seis parcelas seleccionadas. Se realizó análisis de varianza con el test de Tukey para los datos con distribución normal, la prueba de normalidad se realizó con Shapiro Wilk y la prueba de homocedasticidad con Bartlett. Para los datos que no tenían una distribución normal o no tenían homocedasticidad se realizó la comparación con Kruskal Wallis.

Se determinó el promedio y la desviación estándar del factor de bioconcentración total (BCF) para las plantas de papa de las seis parcelas seleccionadas. Se realizó análisis de varianza con el test de Tukey para los datos con distribución normal (BCF_{Pb}), la prueba de normalidad se realizó con Shapiro Wilk y la prueba de homocedasticidad con Bartlett. Para los datos que no tenían una distribución normal o no tenían homocedasticidad se realizó la comparación con Kruskal Wallis.

Actividad 3: Determinación de relaciones entre las propiedades del suelo y los factores de manejo con la concentración y absorción de elementos traça en cultivos de papa

Se utilizó la información obtenida en las fases I, II y III de la investigación y se llevó a cabo el siguiente plan:

- Se evaluaron las variables de entrada del modelo, de acuerdo con la caracterización realizada previamente (propiedades físico-químicas de los suelos, concentración, absorción y BCF para tallos, hojas y tubérculos).
- Se identificaron y seleccionaron las variables de mayor influencia en la concentración, absorción y BCF de ETs en el cultivo de la papa empleando el software R. Esto se realizó mediante análisis de correlación.
- Se propuso los modelos que estuvieron acorde con las variables de mayor influencia en la concentración de ETs en el cultivo de la papa. Se utilizó el Software R para resolver el modelo de acuerdo a un procedimiento de regresión múltiple. Las variables altamente correlacionadas fueron removidas mediante un análisis de colinealidad.
- Se realizó también Path Analysis (PA) o análisis de ruta, este es un método que evalúa el ajuste de modelos teóricos, en este modelo se proponen una serie de relaciones de dependencia entre variables. Se considera una extensión del modelo de regresión múltiple, en la que se comprueba el efecto directo de las variables independientes; además, de la interacción entre las variables predictoras y el efecto indirecto de las mismas sobre las variables dependientes (Aron y Aron, 2001).

Análisis de datos

Para determinar las posibles relaciones entre las propiedades del suelo con la concentración y absorción de ETs y las variables de planta. Se realizó un análisis de correlación de Spearman entre todas las variables de suelo y de planta. El test de normalidad se realizó con Shapiro Wilk. Además, se realizó un análisis de regresión simple entre las variables que

tenían mayor correlación. Se realizó la selección de variables con regresión lineal múltiple backward, forward y stepwise para crear modelos con las variables más significativas, a los valores residuales se le hizo el test de Shapiro Wilk para determinar la normalidad. Finalmente se realizó PA para las variables suelo y planta que presentaban correlación significativa, además se agregó variables de suelo que según la literatura tienen influencia sobre las variables analizadas en planta.

2.4.3. Fase III: Objetivo específico 3

La metodología para la propuesta de desarrollo sustentable está representada en la Figura 25. Para alcanzar la sostenibilidad de los agroecosistemas, la fertilidad y la productividad del suelo son elementos estratégicos vitales que se deben mejorar y conservar. De esta manera la propuesta de desarrollo sustentable que se plantea para el cultivo de papa de la región Amazonas, está enfocada en los elementos estratégicos ya descritos y tuvo como punto de partida los resultados de las fases anteriores de esta investigación. En el aspecto económico se propuso estrategias para mejorar y conservar la productividad del cultivo y la calidad del producto cosechado. En el aspecto social se propuso estrategias para la conservación de los suelos para cultivo de papa, de esta manera se conservará la fuente laboral de los agricultores y la fuente de alimentos que representa este cultivo. En el aspecto ambiental se brinda estrategias para hacer el uso adecuado de fertilizantes químicos y del suelo; con lo cual se reducirá el probable ingreso de elementos tóxicos al suelo y a los cultivos.

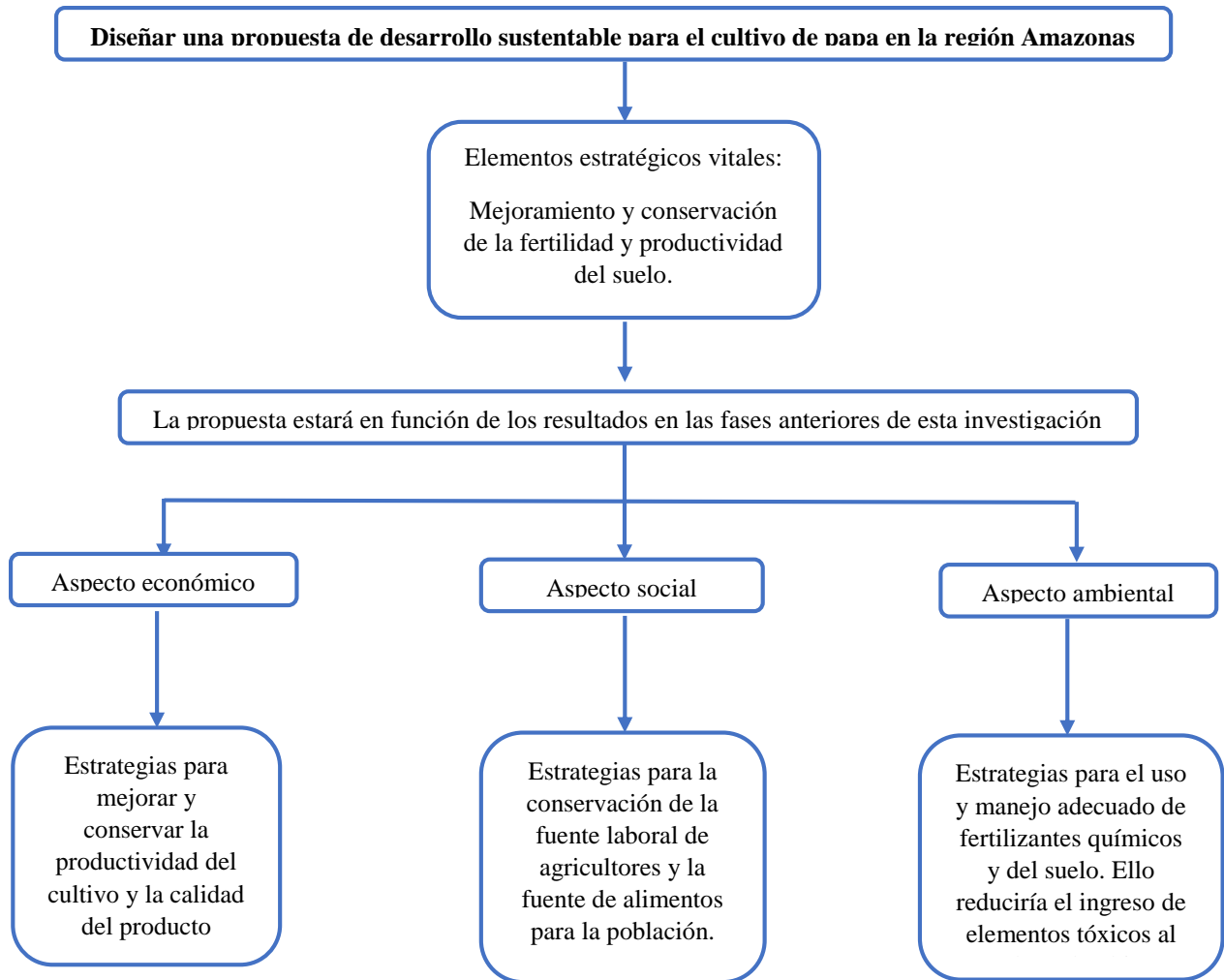


Figura 17. Metodología para la propuesta de desarrollo sustentable para el cultivo de papa en la región Amazonas.

III. RESULTADOS

3.1. Fase I: Objetivo específico 1

3.1.1. Determinación de fertilizantes utilizados en el cultivo de papa en la región Amazonas

Consultados por el tipo de fertilizante utilizado, el 100 % de los agricultores encuestados respondió utilizar fertilizantes inorgánicos. El fertilizante inorgánico utilizado es el denominado “papa sierra”, el cual es una mezcla de urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), fosfato di amónico ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$), cloruro de potasio (KCl) y sulfato doble de potasio y magnesio ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4$). La composición de nutrientes de estos fertilizantes según su etiqueta y ficha técnica se muestran en la Tabla 8. Las dosis utilizadas varían según el tipo de suelo, si el suelo se va a cultivar por primera vez el uso de fertilizantes es menor; caso contrario si el suelo ya se viene utilizando para cultivos, la dosis será mayor. Así, según la información recabada, como mínimo se utilizan 500 kg/hectárea y como máximo 1500 kg/hectárea. Es importante destacar que el 23 % de los encuestados también utiliza de manera esporádica el fertilizante de naturaleza orgánica denominado “gallinaza”.

Tabla 8. *Composición individual de nutrientes de la mezcla física de fertilizantes utilizados en el cultivo de papa en la región Amazonas.*

Fertilizante	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	S (%)	MgO (%)
Urea	46	-	-	-	-
Fosfato di amónico	18	46	-	-	-
Cloruro de potasio	-	-	60	-	-
Sulfato de potasio y magnesio	0	0	22	22	18

*Datos de las fichas técnicas de los fertilizantes. Porcentaje en masa.

3.1.2. Determinación de elementos traza en fertilizantes utilizados para el cultivo de papa en la región Amazonas

Los fertilizantes para analizar fueron determinados a través de una encuesta realizada a agricultores de papa. Para el cultivo de papa, los agricultores utilizan una mezcla de cuatro fertilizantes inorgánicos, por lo tanto, se analizaron los mismos individualmente. Además, se analizó el fertilizante orgánico gallinaza, el cual también es utilizado por los agricultores. Se determinaron las concentraciones de Cd, Pb, Cu y Zn. Los resultados se detallan en la Tabla

9. Los límites de detección calculados además de los porcentajes de recuperación para cada uno de los ETs analizados se muestran el Anexo 08.

Tabla 9. *Concentración y desviación estándar de elementos traza en fertilizantes utilizados para cultivo de papa en la región Amazonas.*

Código de fertilizante	Concentración de elementos traza (ppm)			
	Cd	Pb	Cu	Zn
CDA	<L.D	14,17 ± 0,30	<L.D	0,16 ± 0,03
FDA	3,02 ± 0,07	11,00 ± 0,19	<L.D	71,92 ± 3,30
CDP	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D
SDPM	<L.D	6,31 ± 0,15	<L.D	<L.D
GALL	<L.D	<L.D	44,83 ± 1,62	310,83 ± 11,50

*CDA: urea; FDA: fosfato diamónico; CDP: Cloruro de potasio; SDPM: Sulfato de potasio y magnesio; GALL: Gallinaza. <L.D.: Concentración menor al límite de detección.

En los resultados evidenciaron la presencia de Cd en uno de los cuatro fertilizantes inorgánicos, en este caso se trata del fertilizante de naturaleza fosforada. La presencia de Pb se evidencia en tres de cuatro fertilizantes inorgánicos, con concentraciones mayores en la urea y el fosfato di amónico. Respecto del Cu, su presencia estuvo por debajo del límite de detección en los fertilizantes inorgánicos. Se evidenció también la presencia de Zn en el fosfato di amónico en concentraciones que superan los 70 ppm. En el caso de la gallinaza no se evidenció presencia de Cd y Pb, pero si se evidenció la presencia de Cu y Zn.

3.1.3. Estimación de aportes de elementos traza a través de fertilizantes

Con la concentración promedio de ETs en los fertilizantes y las dosis utilizadas en el cultivo de papa, se pueden estimar el aporte de estos elementos al suelo a través de la fertilización. En la región Amazonas, se utiliza la mezcla física de fertilizantes mencionada que incluye los elementos que aparecen en la Tabla 8, la cual se comercializa en bolsas de polietileno de 50 kg (ver ficha técnica en el Anexo 5). La composición de esta mezcla comercial se detalla en la Tabla 10. Cabe señalar, que también estos fertilizantes se comercializan de forma individual en bolsas de polietileno de 50 kg (ver fichas técnicas en Anexo 6), la composición individual de los fertilizantes se detalla en la Tabla 11.

Tabla 10. *Composición de la mezcla comercial de fertilizantes utilizado en el cultivo de papa.*

Fertilizante	Elemento o compuesto	Porcentaje (%)
Urea	N	15
Fosfato di amónico	P ₂ O ₅	25
Cloruro de potasio	K ₂ O	15
Sulfato de potasio y magnesio	MgO	2
	S	3

*Información de la ficha técnica del producto.

Tabla 11. *Composición de la presentación comercial individual de los fertilizantes utilizados para el cultivo de papa.*

Fertilizante	Elemento o compuesto	Porcentaje (%)
Urea	N	46
Fosfato di amónico	P ₂ O ₅	46
	N	18
Cloruro de potasio	K ₂ O	60
	MgO	18
Sulfato de potasio y magnesio	S	22
	K ₂ O	22

*Información de la ficha técnica del producto.

Con los datos de la Tabla 9, 10 y 11 se puede estimar la cantidad de ETs que podrían ingresar en una temporada de cultivo de papa a los suelos fertilizando con la mezcla comercial objeto de estudio. Teniendo en cuenta también la tasa de fertilización mínima (500 kg de mezcla física de fertilizantes) y máxima (1500 kg de mezcla física fertilizantes) por hectárea en los suelos de cultivo de papa de la región Amazonas. Al tratarse de una mezcla comercial de 4 fertilizantes distintos, se calculó con la ayuda de las fichas técnicas el porcentaje de cada fertilizante en la mezcla. El aporte de ETs según la dosis de fertilización dada por los agricultores se muestran en la Tabla 12 y se calcularon con la siguiente ecuación:

Tabla 12. *Aporte mínimo y máximo de ETs por hectárea en una temporada de cultivo de papa en la región Amazonas.*

Fertilizante	% en mezcla	Aporte mínimo (mg/ha)				Aporte máximo (mg/ha)			
		Cd	Pb	Cu	Zn	Cd	Pb	Cu	Zn
CDA	11,4	---	807,7	---	9,1	---	2423,1	---	27,4
FDA	54,7	823,2	3008,5	---	19670,1	2469,7	9025,5	---	59010,4
CDP	20,2	---	---	---	---	---	---	---	---
SDPM	13,7	---	432,2	---	---	---	1296,7	---	---
TOTAL	100 %	823,2	4248,4	---	19679,2	2469,7	12745,3	---	59037,8

*CDA: urea; FDA: fosfato diamónico; CDP: Cloruro de potasio; SDPM: Sulfato de potasio y magnesio.

El aporte de Cd estimado para una temporada de cultivo de papa utilizando la mezcla comercial de fertilizante oscilaría entre 823,2 y 2469,7 mg/ha. En el caso del Pb el aporte estaría en el rango de 4248,4 – 12745,3 mg/ha. El aporte del Cu no se calculó, dado que los resultados de concentraciones en los fertilizantes de la mezcla comercial estuvieron por debajo del límite de detección. En el caso del zinc el rango de aporte oscilaría entre 19679,2 y 59037,8 mg/ha.

3.2. Fase II: Objetivo específico 2

3.2.1. Actividad 1: Caracterización fisicoquímica y determinación de Cd, Pb, Cu y Zn en suelos de cultivos de papa de la región Amazonas

3.2.1.1. Suelos para caracterización

Para esta actividad se recolectaron un total de 40 muestras de suelos para cultivo de papa variedad Huayro Amazonense, la recolección se realizó entre los meses de enero a marzo del 2021. Para los lugares de recolección de las muestras se consideraron los cinco distritos de cada provincia que se determinaron en la fase I de la investigación (en la mayoría de los casos fueron agricultores distintos a los que fueron encuestados). Los puntos de muestreo fueron georreferenciados, en la Tabla 13 se dan detalles de estas, el rango de altitud de las parcelas que se muestrearon estuvo entre 2028,4 y 3423,2 m.s.n.m.

Tabla 13. *Datos generales de los puntos de muestreo de suelos de cultivo de papa.*

Código	Distrito	Sector	Provincia	Altitud (m.s.n.m.)
S-01	Santo Tomás	Santo Tomás	Luya	2783,8
S-02	Santo Tomás	San Salvador	Luya	2961,3
S-03	Quinjalca	Cashac	Chachapoyas	2803,2
S-04	Quinjalca	Cliche	Chachapoyas	2710,6
S-05	Quinjalca	Lamche	Chachapoyas	3147,8
S-06	Quinjalca	Chontapampa	Chachapoyas	2578,4
S-07	Quinjalca	Chontapampa	Chachapoyas	2547,8
S-08	Quinjalca	Chontapampa	Chachapoyas	2330,5
S-09	La Jalca	Shocme	Chachapoyas	2028,4
S-10	La Jalca	Callca	Chachapoyas	3021,4
S-11	La Jalca	Shipashaco	Chachapoyas	2953,2
S-12	La Jalca	Shipashaco	Chachapoyas	2944,1
S-13	Levanto	Levanto	Chachapoyas	2904,7
S-14	Trita	Trita	Luya	2868,1
S-15	Trita	Trita	Luya	2917,2
S-16	Trita	Trita	Luya	2996,0
S-17	Trita	Trita	Luya	3017,6
S-18	Conila	Conila	Luya	2937,2
S-19	Luya	Chocta	Luya	2928,9
S-20	Luya	Chocta	Luya	2967,6
S-21	Conila	Conila	Luya	2640,6
S-22	Longuita	Choctamal	Luya	3423,2
S-23	Levanto	Levanto	Chachapoyas	2957,2
S-24	Longuita	Choctamal	Luya	2866,2
S-25	Longuita	Choctamal	Luya	2891,3
S-26	Longuita	Choctamal	Luya	2914,6
S-27	Longuita	Corralpampa	Luya	2753,1
S-28	Conila	Conila	Luya	2915,8
S-29	Conila	Conila	Luya	2772,2
S-30	Luya	Corobamba	Luya	2774,2
S-31	Luya	Corobamba	Luya	2775,9
S-32	Levanto	Quilluella	Chachapoyas	3081,6
S-33	Levanto	Quilluella	Chachapoyas	3090,2
S-34	Soloco	Lluytranca	Chachapoyas	2960,8
S-35	Soloco	Lluytranca	Chachapoyas	3019,9
S-36	Cheto	Pumayacu	Chachapoyas	2582,9
S-37	Cheto	Pumayacu	Chachapoyas	2380,9
S-38	Cheto	Pumayacu	Chachapoyas	2301,9
S-39	Cheto	Pumayacu	Chachapoyas	2158,6
S-40	Cheto	Pumayacu	Chachapoyas	2222,9

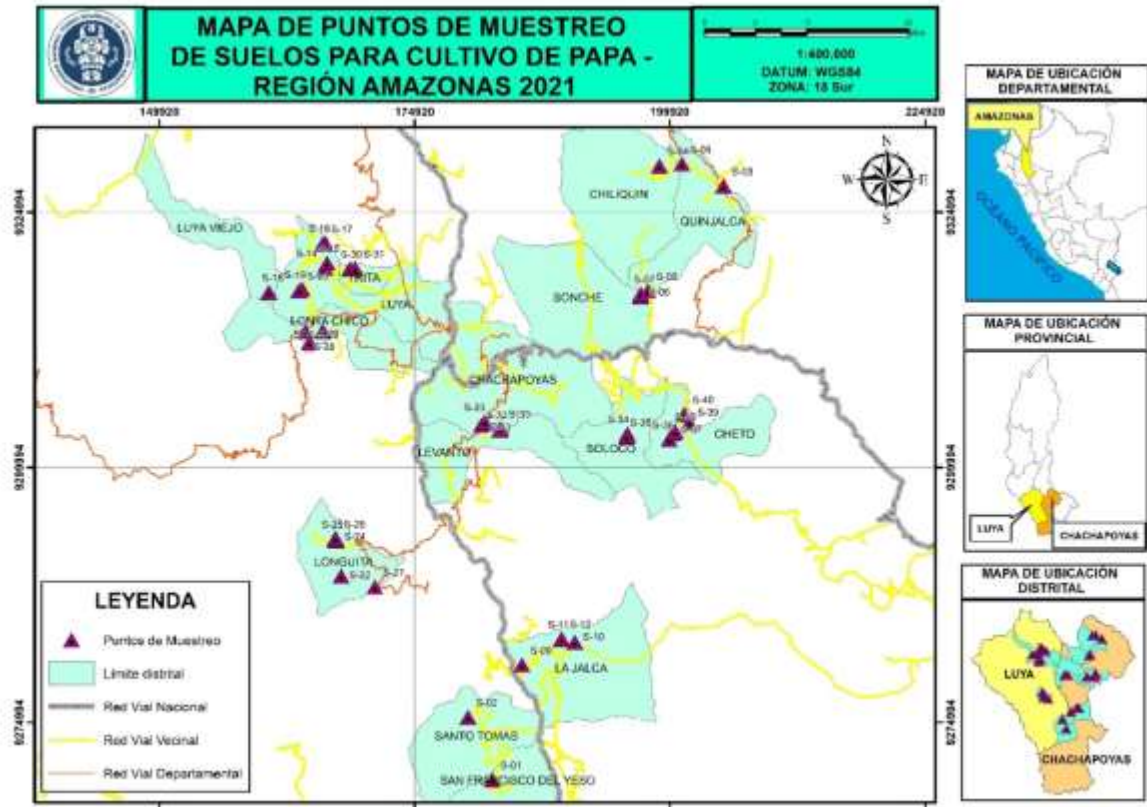


Figura 18. Mapa de puntos de muestreo de suelos para cultivos de papa en la región Amazonas (2021).

Propiedades fisicoquímicas

En la Figura 18 se puede visualizar el mapa de los 40 puntos de muestreo. En la Tabla 14 se muestra la estadística descriptiva de las propiedades fisicoquímicas de los suelos muestreados. Se observa que el pH y el porcentaje de nitrógeno, son las propiedades que presentaron menor variabilidad entre los suelos analizados, con 15,6 y 20,8 % de coeficiente de variación (CV) respectivamente; por el contrario, la conductividad eléctrica (CE), el fósforo, calcio de intercambio (Ca^{2+}), magnesio de intercambio (Mg^{2+}) y la acidez intercambiable ($Al^{3+}H^+$) fueron las propiedades que presentaron una alta variabilidad entre los suelos estudiados, esta última con un CV de 247,7 %. Los datos completos de las propiedades fisicoquímicas se adjuntan en el Anexo 7.

La medición de pH se realizó con dos relaciones de suelo:agua, con resultados muy similares. El valor promedio de pH (1:2.5) fue de 5,9 ($\pm 0,9$) lo que indica la presencia de una acidez generalizada en los suelos. La conductividad eléctrica también se midió en dos relaciones agua:suelo al igual que el pH, el promedio de la CE (1:2.5) en los suelos analizados fue de 0,12 dS/m ($\pm 0,1$), para este parámetro la variabilidad fue de 91,6 %.

El contenido porcentual promedio de materia orgánica en los suelos analizados fue de 5,9 % ($\pm 1,2$) con un coeficiente de variación del 21,0 %, lo cual indica la baja variabilidad de los suelos estudiados respecto a este parámetro. El contenido de fósforo Olsen de los suelos analizados en promedio fue de 29,3 ppm ($\pm 24,1$), más allá del promedio el contenido de este elemento en los suelos fue muy variable y estuvo en el rango de 1,7 a 102,9 ppm con un coeficiente de variación de 82,3 %.

El valor promedio de la CIC de los 40 suelos estudiados fue de 16,8 ($\pm 9,1$) meq/100g, con una variabilidad del 53,9 %, lo cual indica una muy alta variabilidad. El contenido de los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} presentó muy alta variabilidad, con 83,7 % y 92,8 % y 50,0 % respectivamente. Por su parte el Na^{+} presentó variabilidad moderada con 34,1 %.

Desde el punto de vista de la clasificación textural, los suelos se clasificaron principalmente en suelos francos arenosos (60 %), franco arcilloso arenoso (12,5 %) y franco arcilloso (12,5 %). El contenido de arena, limo y arcilla en promedio en los suelos estudiados fue del 58,3, 22,1 y 19,6 % respectivamente; la variabilidad de estas características fue de 22,8, 29,1 y 60,8 % respectivamente.

Tabla 14. *Rango, media, mediana, desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV) de propiedades físico químicas de suelos para cultivo de papa de la región Amazonas.*

Propiedad	Rango	Media	Mediana	D.E.	C.V. (%)
pH (1:1)	4,3 – 8,1	5,7	5,5	0,9	16,0
pH (1:2.5)	4,3 – 8,3	5,9	5,7	0,9	15,6
C.E (dS/m) (1:1)	0,0 – 0,83	0,21	0,16	0,2	82,8
C.E (dS/m) (1:2.5)	0,0 – 0,58	0,12	0,08	0,1	91,6
M.O. (%)	1,5 – 7,5	5,9	5,9	1,2	21,0
C (%)*	0,9 – 4,4	3,4	3,4	0,7	21,0
N (%)*	0,08 – 0,37	0,29	0,30	0,1	20,8
P Olsen (ppm)	1,7 – 102,9	29,3	26,6	24,1	82,3
K (ppm)	16,5 – 582,7	243,9	242,4	130,6	53,5
C.I.C. (meq/100g)	7,2 – 36,5	16,8	13,2	9,1	53,9
Ca ²⁺ (meq/100g)	1,6 – 32,9	11,3	7,7	9,4	83,7
Mg ²⁺ (meq/100g)	0,14 – 5,4	1,06	0,84	1,0	92,8
Na ⁺ (meq/100g)	0,0 – 0,34	0,19	0,20	0,1	34,1
K ⁺ (meq/100g)	0,17 – 1,43	0,59	0,53	0,3	50,0
Al ³⁺ H ⁺ (meq/100g)	0,0 – 1,8	0,14	0,0	0,4	247,7
% Saturación de bases	30,2 – 100,0	70,4	70,8	21,4	30,5
Limo (%)	8,0 – 35,3	22,1	22,2	6,4	29,1
Arcilla (%)	8,0 – 61,3	19,6	14,8	11,9	60,8
Arena (%)	20,0 – 81,3	58,3	60,3	13,3	22,8

*El cálculo del % C y % N se realizó a partir de los datos de la determinación del % de materia orgánica (M.O.).

Contenido total de Cd, Pb, Cu y Zn

Se determinó la concentración total de ETs en los 40 suelos estudiados. En la Tabla 15 se muestra la estadística descriptiva de las concentraciones de Cd, Pb, Cu y Zn en los 40 suelos. Los datos completos de las concentraciones de ETs se adjuntan en el Anexo 7.

Tabla 15. Rango de concentración, media y mediana (mg kg^{-1}), desviación estándar (D.E.), coeficiente de variación (C.V.) de ETs en suelos de cultivo de papa de la región Amazonas.

Elemento traza	Rango	Media	Mediana	D.E.	C.V. (%)
Cd	< L.D.* – 4,0	0,2	0,0	0,7	300,6
Pb	<L.D.* – 623,5	110,2	64,4	119,7	108,6
Cu	4,1 – 74,1	19,7	13,2	17,3	87,7
Zn	7,3 – 819,5	180,4	114,0	187,3	103,8

*L.D.: Límite de detección.

La concentración promedio de Cd en los suelos estudiados fue de $0,24 \text{ mg kg}^{-1} (\pm 0,7)$, con una concentración máxima de $4,0 \text{ mg kg}^{-1}$. La mayoría de los suelos (82,5 %) presentaron concentraciones de Cd por debajo del límite de detección. Sin embargo, siete suelos presentaron concentraciones variables de cadmio.

La concentración promedio de Pb en los suelos estudiados fue de $110,2 \text{ mg kg}^{-1}$, lo cual indica en general suelos con elevado contenido de Pb, teniendo en cuenta que la concentración máxima encontrada fue de $623,5 \text{ mg kg}^{-1}$.

Se realizó un análisis de correlación incluyendo todas las propiedades fisicoquímicas y las concentraciones de ETs de los 40 suelos muestreados. Se realizó el test de normalidad de Shapiro Wilk (Tabla 16) y como la mayoría de las variables no presentaban normalidad se realizó el análisis de correlación de Spearman. La matriz de correlaciones se presenta en la Figura 19, además también se muestra una red de correlaciones en la Figura 20.

Tabla 16. *Resultados del test de Normalidad Shapiro Wilk para las propiedades fisicoquímicas y concentraciones de ETs de los suelos para cultivos de papa de la región Amazonas.*

Variable	Estadístico	p-valor	Normalidad
Arena	0,96	0,15	SI
Limo	0,98	0,81	SI
Arcilla	0,81	<0,001	NO
PH125	0,89	<0,001	NO
PH11	0,88	<0,001	NO
CE125	0,71	<0,001	NO
CE11	0,81	<0,001	NO
MO	0,89	<0,001	NO
P-Olsen	0,91	<0,001	NO
K	0,96	0,1768	SI
Ca ²⁺	0,85	<0,001	NO
Mg ²⁺	0,68	<0,001	NO
K ⁺	0,93	0,01	NO
Na ⁺	0,96	0,12	SI
Al ³⁺ +H ⁺	0,47	<0,001	NO
CICE	0,85	<0,001	NO
SB	0,86	<0,001	NO
PSB	0,94	0,03	NO
CIC	0,86	<0,001	NO
Cd	0,39	<0,001	NO
Pb	0,71	<0,001	NO
Cu	0,79	<0,001	NO
Zn	0,79	<0,001	NO

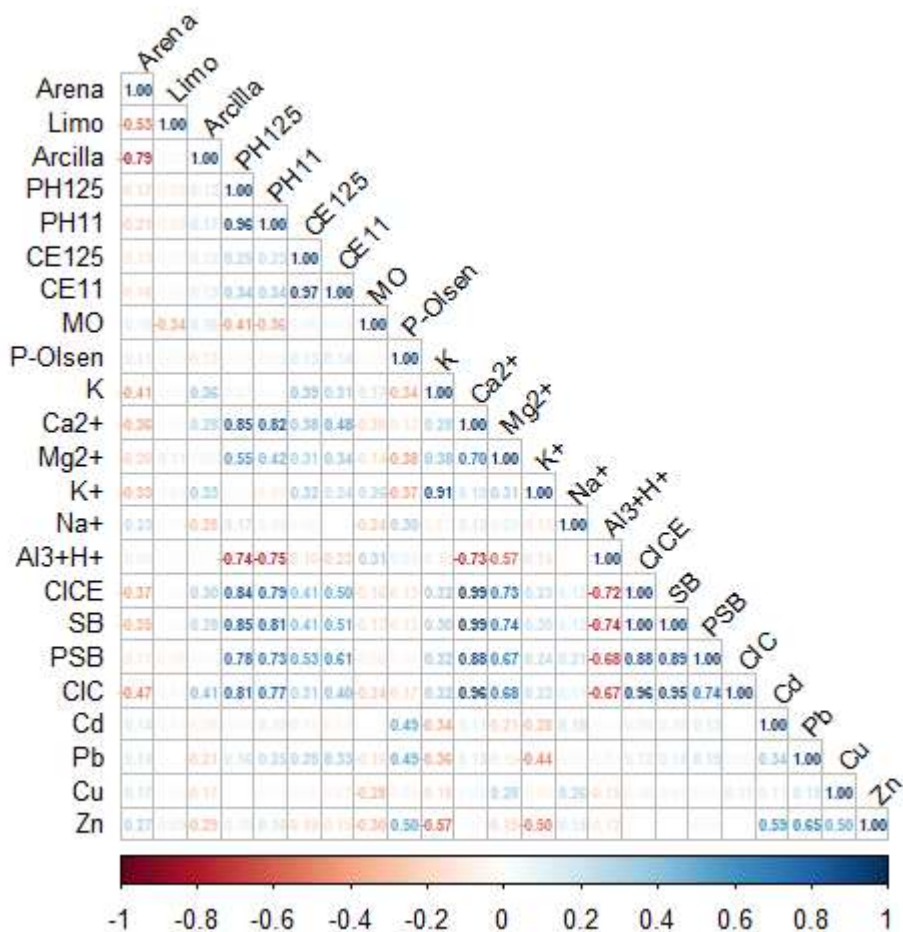


Figura 19: Matriz de correlaciones de las propiedades fisicoquímicas y concentraciones de ETs de suelos para cultivo de papa de la región Amazonas.

Se evidenció la existencia de correlación positiva entre el pH (1:2.5) y el Ca^{2+} ($r=0,85$, $p<0,01$), Mg^{2+} ($r=0,55$, $p<0,01$), CICE ($r=0,84$, $p<0,01$), SB ($r=0,85$, $p<0,01$), PSB ($r=0,78$, $p<0,01$) y CIC ($r=0,81$, $p<0,01$); además el pH (1:2.5) correlacionó negativamente con la $Al^{3+}H^+$ ($r=-0,74$, $p<0,01$). Por su lado la CE (1:1) mostró correlación positiva con Ca^{2+} ($r=0,48$, $p<0,01$), CICE ($r=0,50$, $p<0,01$), SB ($r=0,51$, $p<0,01$) y PSB ($r=0,61$, $p<0,01$).

El Ca^{2+} mostró también correlación positiva con Mg^{2+} ($r=0,70$, $p<0,01$), CICE ($r=0,99$, $p<0,01$), SB ($r=0,99$, $p<0,01$), PSB ($r=0,88$, $p<0,01$) y CIC ($r=0,96$, $p<0,01$) y correlación negativa con la $Al^{3+}H^+$ ($r=-0,73$, $p<0,01$). Por su parte el Mg^{2+} mostró correlación positiva con la CICE ($r=0,73$, $p<0,01$), SB ($r=0,74$, $p<0,01$), PSB ($r=0,67$, $p<0,01$) y CIC ($r=0,68$, $p<0,01$) y correlación negativa con la $Al^{3+}H^+$ ($r=-0,57$, $p<0,01$). La $Al^{3+}H^+$ correlacionó

negativamente con la CICE ($r=-0,72$, $p<0,01$), SB ($r=-0,74$, $p<0,01$), PSB ($r=-0,68$, $p<0,01$) y CIC ($r=-0,67$, $p<0,01$).

Propiedades físicas como la arena, limo y arcilla, de manera general no mostraron correlación con las propiedades químicas del suelo y la concentración de ETs en el suelo, salvo la arena con la CIC que tuvieron una correlación negativa ($r=-0,47$, $p<0,01$) y la arcilla con la CIC que tuvieron una correlación positiva ($r=0,41$, $p=0,01$). Si existió correlación negativa entre las mismas propiedades físicas, así la arena correlacionó negativamente con el limo ($r=-0,53$, $p<0,01$) y la arcilla ($r=-0,79$, $p<0,01$).

Respecto de los contenidos totales de ETs el Cd mostró correlación positiva con el contenido de P Olsen ($r=0,49$, $p<0,01$) y con el contenido de Zn ($r=0,59$, $p<0,01$). El Pb también correlacionó positivamente con el P Olsen ($r=0,49$, $p<0,01$) y tuvo una correlación negativa con el K^+ ($r=-0,44$, $p<0,01$). Por su parte el Zn fue el ET que correlacionó con más variables, mostrando correlación positiva con P Olsen ($r=0,50$, $p<0,01$), Pb ($r=0,65$, $p<0,01$) y Cu ($r=0,50$, $p<0,01$) y correlación negativa con el contenido total de K ($r=-0,57$, $p<0,01$) y potasio de intercambio ($r=-0,50$, $p<0,01$).

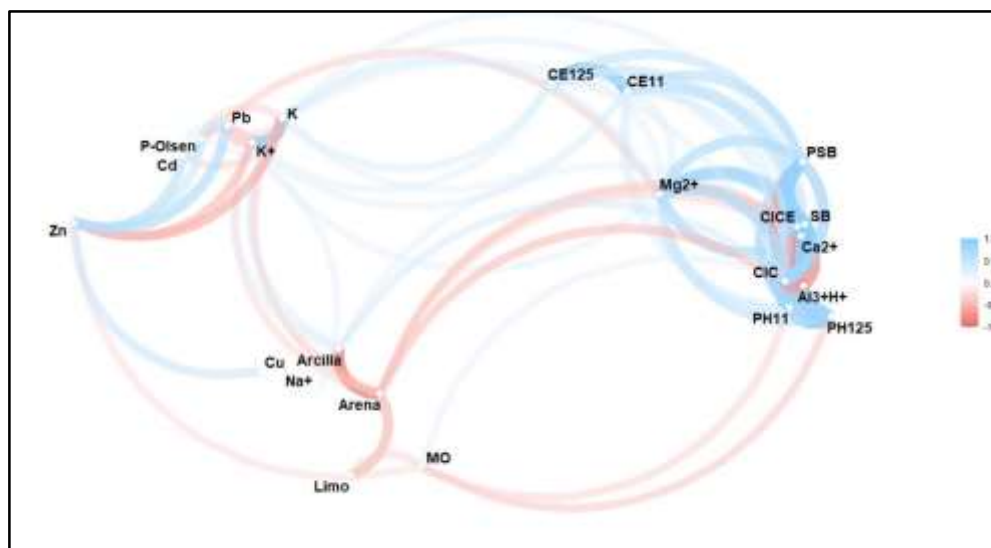


Figura 20. Red de correlaciones de las propiedades fisicoquímicas y concentración de ETs de suelos de cultivo de papa de la región Amazonas.

Se realizó también el análisis de regresión lineal simple para las propiedades que presentaron mayor correlación. Los gráficos se pueden ver a detalle en la Figura 21. Así, en la Figura 21a

se puede apreciar la influencia del pH (1:2.5) sobre el Ca^{2+} , de esta manera el 64,04 % del Ca^{2+} en el suelo es explicado por el pH (1:2.5); si el pH; va aumentado también aumentará el Ca^{2+} . En la Figura 21b se muestra que el 54,53 % de la CIC es explicada por el pH (1:2.5) de suelo, de esta manera conforme aumenta el pH se van produciendo nuevas cargas negativas en el complejo de cambio. En la Figura 21c se muestra que el 62,44 % de la CICE es explicada por el pH (1:2.5) del suelo. Finalmente, en la Figura 21d se evidencia que el 59,08 % de la concentración de Zn en el suelo se explica por la concentración de Pb en el suelo, esto se traduce en que mientras más contenido de Pb haya en el suelo, también se irá incrementando el contenido de Zn en el suelo.

Se realizó también un análisis de componentes principales (ACP) para las propiedades fisicoquímicas y las concentraciones de ETs de los 40 suelos. En la Tabla 17 se muestra los datos completos de este análisis. En la Figura 22 se muestra la proporción acumulada para 10 componentes, sin embargo, los dos primeros componentes explican ya el 52 % de la varianza, siendo los más importantes. También en la Tabla 18 se muestran el factor de carga de las variables de los suelos analizados para los tres primeros componentes principales. Según este parámetro, para el primer componente principal (PC1) que explica el 34,79 % de la varianza total, se asoció principalmente a las variables Ca^{2+} , CICE, SB, CIC y pH. El componente principal dos (PC2) que explica el 17,05 % de la varianza total se asoció principalmente al contenido de Zn y Pb, al contenido de potasio y contenido de fósforo Olsen. Por su parte el componente principal tres (PC3) se asoció principalmente con la CE y el contenido de Pb en el suelo. En la Figura 23 se muestra la dirección de las propiedades fisicoquímicas en los componentes 1 y 2, que juntos explican el 51,8 % de la varianza. También en la Figura 24 se muestra la dirección de las propiedades fisicoquímicas de los suelos en los componentes 1 y 2 agrupadas por distritos de las provincias de Luya y Chachapoyas. Se observan algunos distritos que tienen una distribución distinguible entre los componentes del ACP.

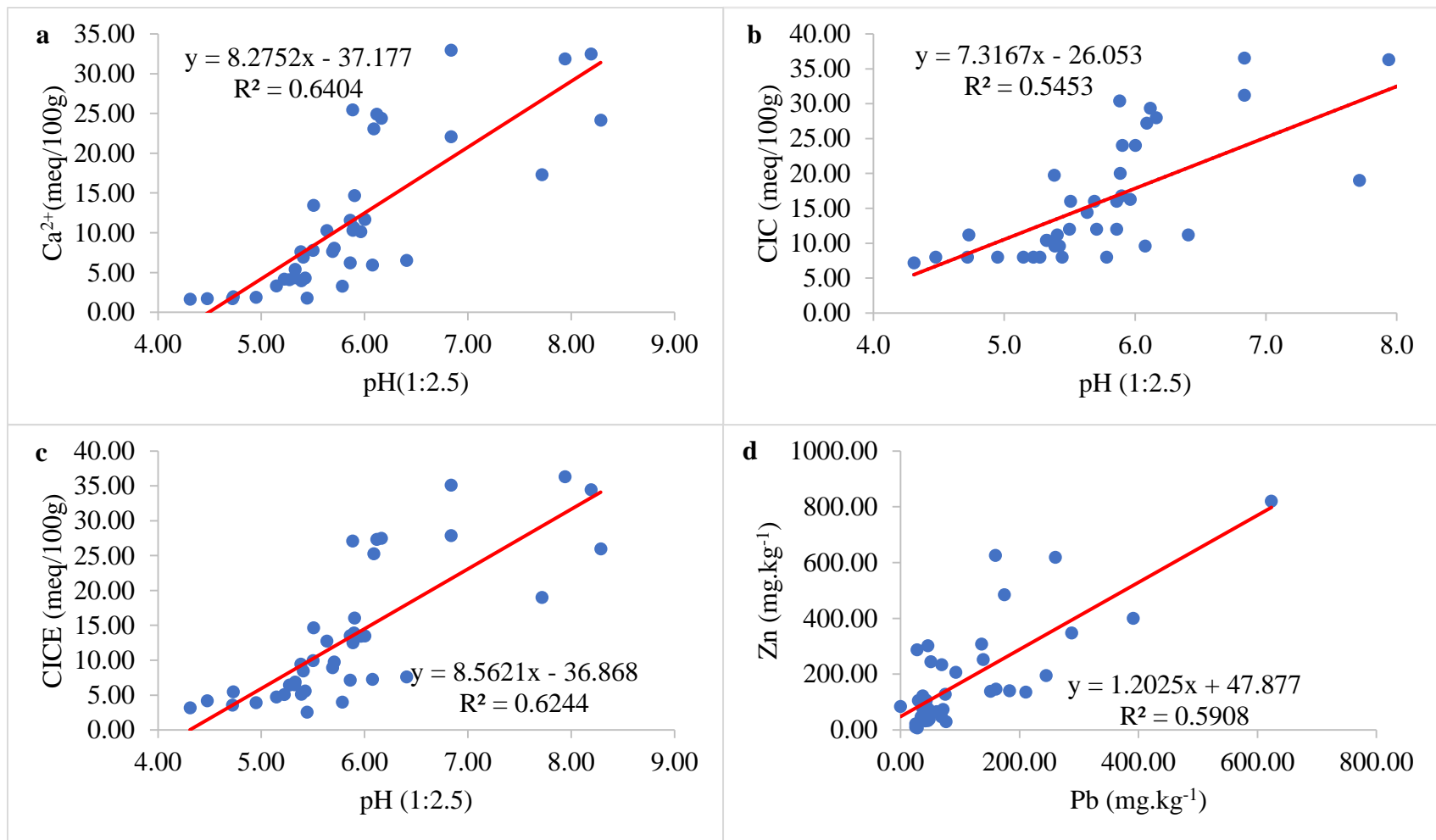


Figura 21. a) Influencia del pH sobre el Ca^{2+} ; b) Influencia del pH sobre la CIC; c) Influencia del pH sobre la CICE y d) Influencia del contenido de Pb sobre el contenido de Zn.

Tabla 17. ACP de las propiedades fisicoquímicas y concentración de ETs de 40 suelos para cultivo de papa de la región Amazonas, se muestra la desviación estándar, la proporción de la varianza y la proporción acumulativa.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Desviación estándar	2,83	1,98	1,43	1,31	1,19	1,10	1,02	0,99
Proporción de la varianza	0,35	0,17	0,09	0,08	0,06	0,05	0,05	0,04
Proporción acumulada	0,35	0,52	0,61	0,68	0,74	0,80	0,84	0,89

	PC9	PC10	PC11	PC12	PC13	PC14	PC15	PC16
Desviación estándar	0,80	0,78	0,72	0,51	0,48	0,38	0,34	0,26
Proporción de la varianza	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
Proporción acumulada	0,91	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	1,00

	PC17	PC18	PC19	PC20	PC21	PC22	PC23
Desviación estándar	0,20	0,13	0,08	0,07	0,00	0,00	0,00
Proporción de la varianza	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Proporción acumulada	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

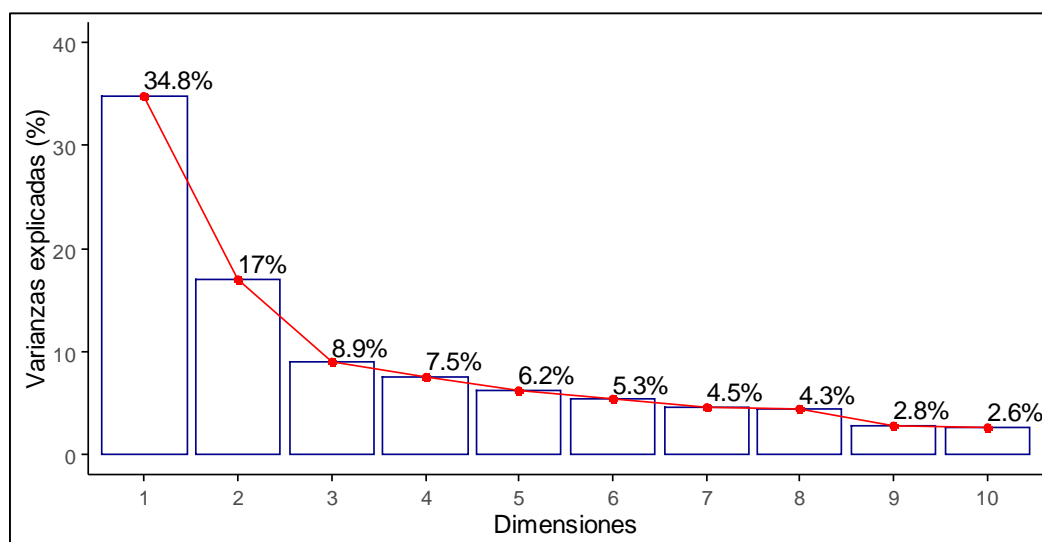


Figura 22. Proporción de la varianza explicada por cada componente del ACP para las propiedades fisicoquímicas y concentración de ETs de 40 suelos para cultivo de papa de la región Amazonas.

Tabla 18. *Factor de carga de los tres primeros componentes principales (PC) para variables de los suelos de cultivo de papa.*

Variable	PC1	PC2	PC3
Arena	0,20	0,20	-0,11
Limo	-0,03	0,06	-0,01
Arcilla	-0,20	-0,26	0,13
PH125	-0,30	0,13	-0,17
PH11	-0,30	0,14	-0,13
CE125	-0,21	0,08	0,40
CE11	-0,23	0,12	0,41
MO	0,08	-0,16	0,28
P-Olsen	0,03	0,34	0,29
K	-0,13	-0,35	0,20
Ca ²⁺	-0,35	-0,02	-0,04
Mg ²⁺	-0,19	0,04	-0,20
K ⁺	-0,07	-0,35	0,23
Na ⁺	-0,02	0,14	-0,23
Al ³⁺ H ⁺	0,15	-0,20	0,22
CICE	-0,35	-0,03	-0,04
SB	-0,35	-0,02	-0,05
PSB	-0,29	0,08	-0,07
CIC	-0,33	-0,04	-0,07
Cd	0,00	0,22	0,01
Pb	-0,02	0,38	0,31
Cu	0,05	0,11	-0,19
Zn	0,00	0,42	0,21

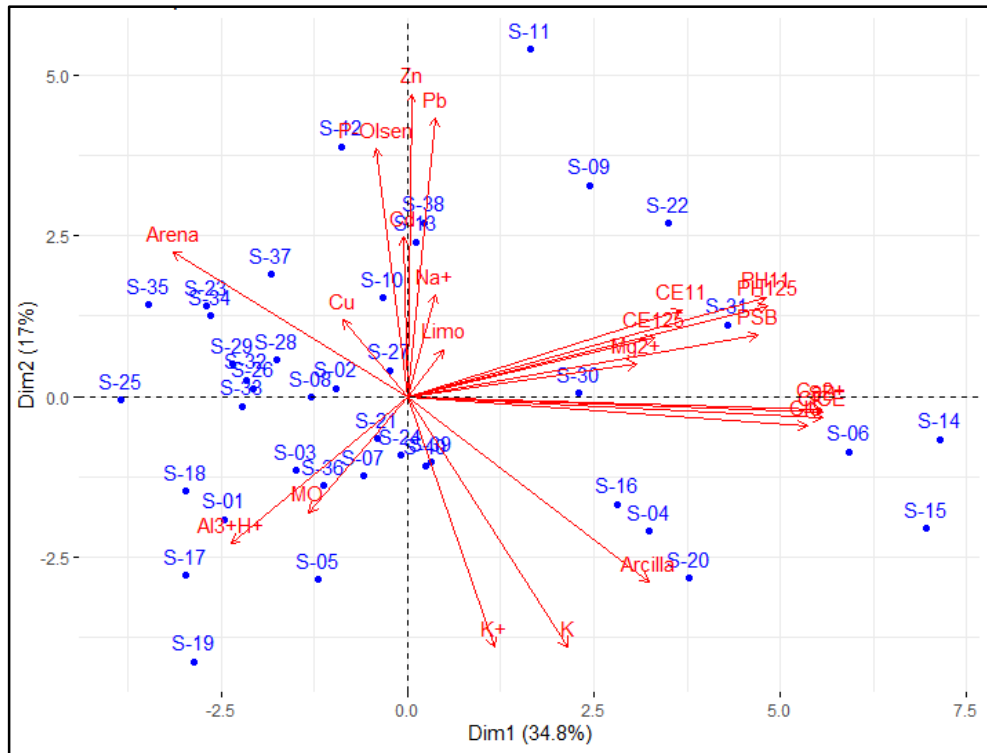


Figura 23. Dirección de las propiedades fisicoquímicas de los suelos analizados dentro de los 2 componentes más importantes (biplot).

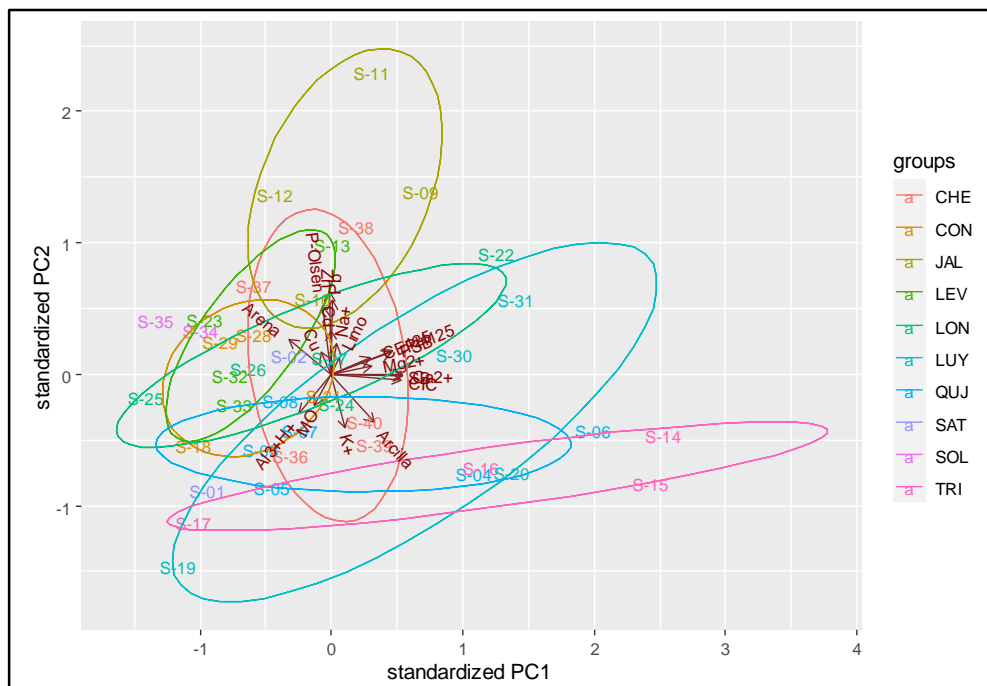


Figura 24. Dirección de las propiedades fisicoquímicas de los suelos analizados agrupados por distritos dentro de los dos componentes más importantes. Distritos: CHE(Cheto), CON(Conila), JAL(La Jalca), LEV(Levanto), LON(Longuita), LUY(Luya), QUJ(Quinjalca), SAT(Santo Tomás), SOL(Soloco) y TRI(Trita).

Modelos de predicción con regresión lineal múltiple

Se realizó la selección de variables con regresión lineal múltiple (RLM) backward, forward y stepwise para crear modelos con las variables más significativas. A los valores residuales de cada modelo se le hizo el test de Shapiro Wilk para determinar la normalidad de su distribución. En la Tabla 19 se muestran los modelos de regresión para predecir ETs en el suelo basada en la concentración de otros ETs y de las propiedades fisicoquímicas de los suelos. Los modelos de regresión de Pb en el suelo y Zn en el suelo son producto de una RLM Stepwise, para el caso del modelo de regresión para el Cu en el suelo este es producto de una RLM backward.

Tabla 19. Modelos de regresión para predecir ETs en el suelo basado en la concentración de ETs y las propiedades fisicoquímicas de los suelos.

n	Modelo de regresión	R ² / p-valor	P-valor Test SW*
40	$Pb_{suelo} = -14,1 + 0,457Zn_{suelo} + 193,2CE - 32,8Cd_{suelo} + 0,914P_{Olsen}$	0,6504 / <0,001	0,2154
40	$Cu_{suelo} = 1,07 - 0,298P_{Olsen} - 7,29Ca^{2+} + 98,4Na^{+} - 6,43SB + 0,059Pb_{suelo}$	0,2655 / <0,001	0,0695
40	$Zn_{suelo} = 10,3 + 4,71P_{Olsen} - 0,413K + 1,891PSB$	0,5175 / <0,001	0,1066

*Test SW: Test de Shapiro Wilk para los residuales del modelo.

Según el modelo de regresión desarrollado para la predicción de Pb en el suelo, la variable explicativa de mayor influencia fue la concentración de Zn en el suelo, además también hay influencias de otras variables como la conductividad eléctrica el contenido de Cd en el suelo y el contenido de P-Olsen. Por su parte, el modelo de predicción para el Cu en el suelo, tiene como principal variable explicativa al contenido de P-Olsen, además hay influencia de propiedades químicas como el calcio y sodio de intercambio. Sin embargo, el modelo de predicción obtenido, aunque significativo, obtuvo un bajo R². Finalmente, el modelo de predicción para el Zn en el suelo al igual que en el caso del Cu, tiene como principal variable explicativa al contenido de P-Olsen.

3.2.1.2. Suelos seleccionados

De acuerdo con las propiedades fisicoquímicas y la concentración de ETs de los 40 suelos muestreados, se escogieron seis parcelas para continuar con la investigación. Una de las dificultades que se encontró al elegir algunas parcelas, fue que algunas parcelas inicialmente elegidas no habían logrado ser sembradas por los agricultores. La principal razón para ello fue que los agricultores no consiguieron semillas de papa de la variedad de estudio, optaron en algunos casos sembrar otra variedad, en otros casos se sembró otros cultivos e inclusive en algunos aptaron por no sembrar ningún cultivo.

Propiedades fisicoquímicas de los suelos seleccionados

Se determinaron las propiedades fisicoquímicas de los seis suelos seleccionados, los datos y la estadística descriptiva se detallan en las Tablas 20 y 21. También se determinó la concentración de ETs total para los cuatro elementos de estudio. Para la concentración disponible de estos elementos (extraíble con EDTA) solo se presentan los datos de Zn, esto debido a que los datos de los demás elementos eran inconsistentes (Tabla 22). Los límites de detección para los elementos disponibles se adjuntan el Anexo 09.

Se observa que el pH y el porcentaje de materia orgánica (MO), son las propiedades que presentaron menor variabilidad entre los seis suelos analizados, con 7,4 y 14,8 % de coeficiente de variación (CV) respectivamente; por el contrario, la conductividad eléctrica, el contenido de fósforo, el contenido de Pb total y el contenido Zn disponible fueron las propiedades que presentaron una alta variabilidad (superior al 70 %) entre los suelos estudiados. El Cu total presentó una alta variabilidad igual al 173,0 % en los seis suelos analizados.

El pH (1:2.5) promedio de los seis suelos seleccionados fue de 5,0 ($\pm 0,4$), lo que indica el carácter ácido de los suelos para cultivo de papa de la región Amazonas. La conductividad eléctrica (1:2.5) en promedio en los seis suelos seleccionados fue de 0,2 mS/cm ($\pm 0,1$). El porcentaje promedio de MO fue de 6,2 ($\pm 0,9$). El contenido de P-Olsen en promedio fue de 14,1 ppm ($\pm 10,2$), en este caso se tuvieron tres suelos con contenidos menores a 10,0 ppm y otros tres suelos con contenidos superiores a 17,0 ppm. La CIC en los suelos seleccionados en promedio fue de 15,2 meq/100 g ($\pm 4,4$), el rango estuvo entre 9,6 – 20,8 meq/100 g. Por

su parte la acidez intercambiable en los suelos seleccionados en promedio fue de 1,2 meq/100 g ($\pm 0,8$).

Respecto de la textura cuatro de los seis suelos seleccionados fueron clasificados como franco arenoso. En promedio el porcentaje de arena en los seis suelos analizados fue de 57,4 % ($\pm 10,2$), esta característica fue la dominante en los suelos analizados. Por su parte el promedio del porcentaje de limo en los seis suelos fue de 24,9 % ($\pm 7,2$) y el promedio del porcentaje de arcilla fue de 17,7 % ($\pm 6,3$) siendo esta característica el de menor proporción en promedio en los suelos analizados.

El contenido de Cd total en los suelos estuvo por debajo de los límites de detección. Sin embargo, el contenido de Pb total estuvo en el rango de 21,9 – 214,1 mg kg⁻¹, en promedio fue de 90,3 mg kg⁻¹ ($\pm 64,7$). El contenido total de Cu en tres de los suelos seleccionados estuvo por debajo del límite de detección para este elemento, sin embargo, los tres suelos seleccionados restantes tuvieron concentraciones variables de Cu. Por su parte el contenido total de Zn en promedio en los suelos seleccionados fue de 109,6 mg kg⁻¹ ($\pm 57,7$). El contenido disponible de ETs solo se consideró el Zn, el cual en promedio fue de 17,7 mg kg⁻¹ ($\pm 6,3$).

Tabla 20. *Propiedades fisicoquímicas de los seis suelos seleccionados de cultivo de papa (parte 1).*

Código de muestra	pH (1:2.5)	pH (1:1)	C.E (1:2.5)	C.E. (1:1)	P Olsen (ppm)	C (%)	M.O. (%)	N (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
SS01-1	5,21	5,00	0,20	0,33	2,35	3,33	5,75	0,29	52,72	14,00	33,28
SS01-2	4,95	4,71	0,14	0,21	4,08	4,00	6,90	0,34	66,72	12,00	21,28
SS01-3	4,90	4,64	0,06	0,10	4,37	3,67	6,32	0,32	48,72	27,00	24,28
SS02-1	5,59	5,44	0,40	0,64	3,50	2,67	4,60	0,23	52,72	30,00	17,28
SS02-2	4,58	4,38	0,23	0,41	8,89	2,67	4,60	0,23	40,72	33,00	26,28
SS02-3	5,85	5,62	0,40	0,61	3,70	2,33	4,02	0,20	48,72	32,00	19,28
SS03-1	5,11	4,91	0,07	0,11	8,12	4,00	6,90	0,34	50,72	30,00	19,28
SS03-2	5,29	5,13	0,07	0,11	4,85	4,00	6,90	0,34	66,72	22,00	11,28
SS03-3	5,18	4,97	0,04	0,09	5,23	4,00	6,90	0,34	60,72	28,00	11,28
SS04-1	4,93	4,74	0,06	0,10	29,67	4,00	6,90	0,34	66,72	22,00	11,28
SS04-2	4,77	4,62	0,05	0,10	29,86	4,00	6,90	0,34	52,72	31,00	16,28
SS04-3	4,95	4,78	0,04	0,10	30,15	4,00	6,90	0,34	66,72	22,00	11,28
SS05-1	4,98	4,77	0,12	0,27	24,76	3,67	6,32	0,32	66,72	18,00	15,28
SS05-2	4,82	4,63	0,37	0,68	20,05	4,00	6,90	0,34	56,72	26,00	17,28
SS05-3	4,55	4,43	0,40	0,62	20,24	3,67	6,32	0,32	34,72	40,00	25,28
SS06-1	5,66	5,60	0,19	0,31	17,74	3,67	6,32	0,32	64,72	21,00	14,28
SS06-2	4,80	4,63	0,35	0,62	17,93	3,33	5,75	0,29	66,72	21,00	12,28
SS06-3	4,56	4,50	0,32	0,54	17,55	3,67	6,32	0,32	68,72	19,00	12,28
Rango	4,5–5,9	4,4–5,6	0,0–0,4	0,1–0,7	2,3–30,1	2,3–4,0	4,0–6,9	0,2–0,3	34,7–68,7	12,0–40,0	11,3–33,3
Media	5,0	4,9	0,2	0,3	14,1	3,6	6,2	0,3	57,4	24,9	17,7
Mediana	4,9	4,8	0,2	0,3	13,2	3,7	6,3	0,3	58,7	24,0	16,8
D.E.	0,4	0,4	0,1	0,2	10,2	0,5	0,9	0,0	10,2	7,2	6,3
C.V.	7,4	7,7	72,5	70,1	72,3	14,8	14,8	14,8	17,8	28,8	35,6

*El cálculo del % C y % N se realizó a partir de los datos de la determinación del % de materia orgánica (M.O.).

Tabla 21. Propiedades fisicoquímicas de los seis suelos seleccionados de cultivo de papa (parte 2).

Código de muestra	C.I.C. (meq/100g)	Ca²⁺ (meq/100g)	Mg²⁺ (meq/100g)	K⁺ (meq/100g)	Na⁺ (meq/100g)	Al³⁺H⁺ (meq/100g)	Suma de cationes (meq/100g)	Suma de bases (meq/100g)	% saturación bases
SS01-1	20,00	12,32	2,22	1,31	1,14	0,87	17,85	16,99	84,95
SS01-2	19,20	8,15	1,59	1,05	2,00	2,04	14,83	12,79	66,62
SS01-3	18,40	4,19	0,94	0,70	1,95	3,34	11,13	7,79	42,31
SS02-1	20,80	11,71	2,60	1,08	3,68	0,18	19,25	19,07	91,66
SS02-2	19,20	3,55	1,15	0,26	0,24	0,82	6,01	5,19	27,05
SS02-3	20,00	9,65	2,21	1,18	1,65	0,11	14,79	14,68	73,39
SS03-1	19,20	5,24	0,96	0,46	0,24	1,80	8,69	6,89	35,90
SS03-2	12,80	6,61	1,25	0,42	1,04	1,20	10,52	9,32	72,82
SS03-3	12,00	4,72	0,98	0,54	0,90	1,66	8,80	7,14	59,49
SS04-1	9,60	2,76	0,70	0,27	1,90	1,47	7,10	5,63	58,65
SS04-2	9,60	2,40	0,51	0,17	2,13	1,57	6,78	5,21	54,31
SS04-3	9,60	2,76	0,70	0,20	1,97	1,05	6,68	5,63	58,60
SS05-1	10,40	3,50	0,99	0,63	1,35	1,43	7,90	6,47	62,21
SS05-2	12,00	2,84	1,20	1,08	2,17	1,04	8,34	7,30	60,85
SS05-3	16,00	1,44	0,51	0,59	1,70	1,33	5,58	4,25	26,56
SS06-1	20,00	11,70	1,57	0,43	3,57	0,09	17,37	17,28	86,40
SS06-2	12,00	5,67	0,75	0,52	1,18	0,29	8,41	8,11	67,61
SS06-3	12,00	4,19	0,65	0,56	1,71	0,57	7,69	7,12	59,29
Rango	9,6-20,8	1,4-12,3	0,5-2,6	0,2-1,3	0,2-3,7	0,1-3,3	5,6-19,2	4,2-19,1	26,6-91,7
Media	15,2	5,7	1,2	0,6	1,7	1,2	10,4	9,3	60,5
Mediana	14,4	4,5	1,0	0,6	1,7	1,1	8,5	7,2	60,2
D.E.	4,4	3,5	0,6	0,4	0,9	0,8	4,4	4,7	18,6
C.V.	28,8	60,9	51,7	56,0	53,8	69,6	42,2	50,8	30,8

Tabla 22. Concentración total y disponible de ETs en suelos seleccionados de cultivo de papa.

Código de muestra	Concentración total (mg kg ⁻¹)				
	Cd	Pb	Cu	Zn	Zn _{EDTA}
SS01-1	< L.D.	32,78	6,75	36,89	0,93
SS01-2	< L.D.	45,81	5,07	54,77	1,08
SS01-3	< L.D.	35,90	5,90	46,71	0,95
SS02-1	< L.D.	166,00	60,61	187,28	10,30
SS02-2	< L.D.	158,95	47,86	177,75	7,57
SS02-3	< L.D.	214,11	60,28	216,01	13,53
SS03-1	< L.D.	28,74	< L.D.	50,15	1,29
SS03-2	< L.D.	26,05	< L.D.	36,46	0,57
SS03-3	< L.D.	21,88	< L.D.	22,62	0,45
SS04-1	< L.D.	95,72	< L.D.	121,23	7,48
SS04-2	< L.D.	101,74	< L.D.	131,96	7,24
SS04-3	< L.D.	97,43	< L.D.	113,92	5,94
SS05-1	< L.D.	38,72	9,96	142,14	4,66
SS05-2	< L.D.	38,16	10,56	163,27	5,20
SS05-3	< L.D.	36,16	10,12	131,24	4,00
SS06-1	< L.D.	173,66	< L.D.	131,77	8,86
SS06-2	< L.D.	169,29	< L.D.	94,42	5,64
SS06-3	< L.D.	143,77	< L.D.	114,78	7,60
Rango	-	21,9-214,1	< L.D.-60,6	22,6-216,0	0,5-13,5
Media	-	90,3	12,1	109,6	5,2
Mediana	-	70,8	2,5	118,0	5,4
D.E.	-	64,7	20,9	57,7	3,8
C.V.	-	71,7	173,0	52,6	73,2

Se realizó un análisis de correlación de las propiedades fisicoquímicas y las concentraciones de ETs de los seis suelos seleccionados. Se realizó el test de normalidad de Shapiro Wilk y como la mayoría de las variables no presentaban normalidad, se realizó el análisis de correlación Spearman. La matriz de correlaciones se presenta en la Figura 25, mientras que, en la Figura 26 se muestra la red de correlaciones para estas mismas variables de los suelos seleccionados.

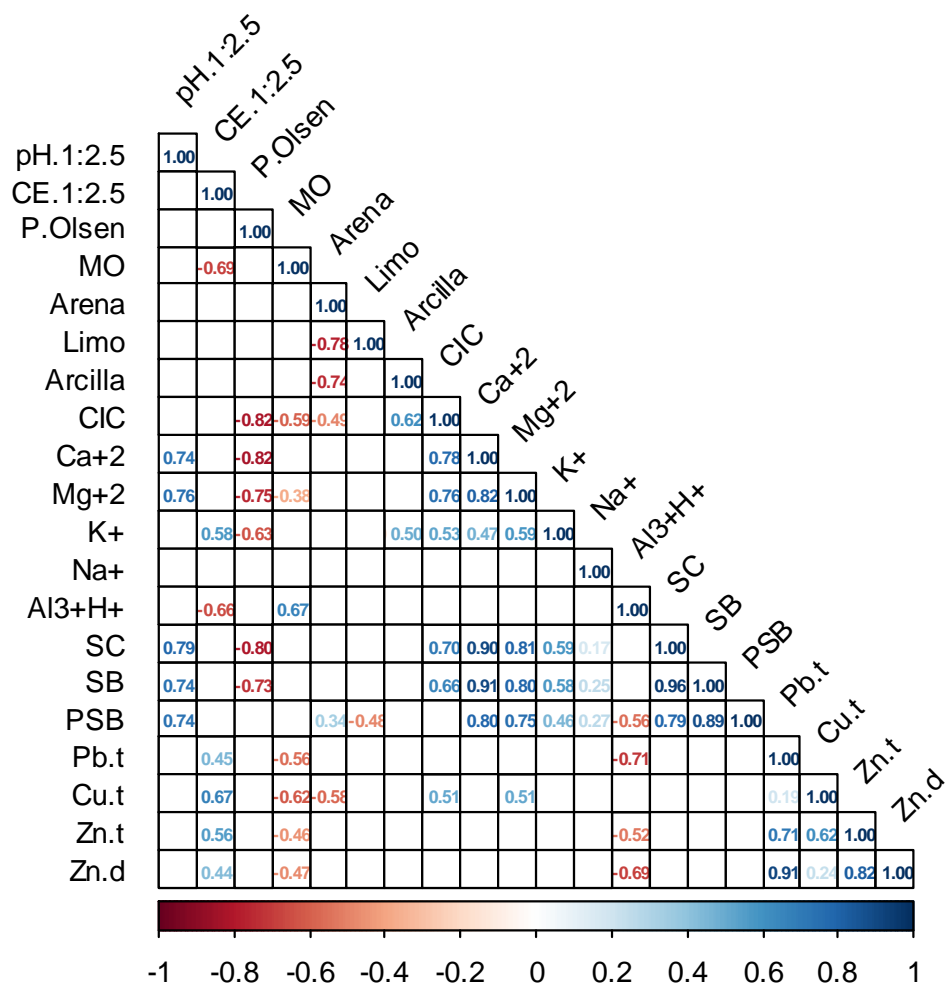


Figura 25. Matriz de correlaciones de las propiedades fisicoquímicas y concentración de ETs en suelos seleccionados para cultivo de papa.

Propiedades químicas como el pH correlacionó positivamente Ca^{2+} ($r=0,74$, $p<0,01$), Mg^{2+} ($r=0,76$, $p<0,01$), suma de cationes ($r=0,79$, $p<0,01$), suma de bases ($r=0,74$, $p<0,01$) y con el porcentaje de saturación de bases ($r=0,74$, $p<0,01$). Por su parte la conductividad eléctrica correlacionó positivamente con el K^+ ($r=0,58$, $p=0,01$), con la concentración total

Cu ($r=0,67$, $p<0,01$) y Zn ($r=0,56$, $p=0,02$) y también correlacionó negativamente con la MO ($r=-0,69$, $p<0,01$) y la $Al^{3+}H^+$ ($r=-0,66$, $p<0,01$). El contenido de P Olsen presentó correlación negativa con las variables asociadas a los cationes de intercambio, así pues, correlacionó principalmente con la CIC ($r=-0,82$, $p<0,01$), Ca^{2+} ($r=-0,82$, $p<0,01$) y Mg^{2+} ($r=-0,75$, $p<0,01$). La materia orgánica correlaciona positivamente con la $Al^{3+}H^+$ ($r=0,67$, $p<0,01$) y negativamente con la CIC ($r=-0,59$, $p=0,01$), contenido total de Pb ($r=-0,56$, $p=0,02$) y contenido total de Cu ($r=-0,62$, $p=0,01$). La mayoría de estas relaciones corroboran las obtenidas para los 40 suelos analizados previamente.

Propiedades físicas como el porcentaje de arena en el suelo correlacionan negativamente con la concentración total de Cu ($r=-0,58$, $p=0,01$). Por su parte el porcentaje de arcilla correlaciona positivamente con la CIC ($r=0,62$, $p=0,01$). Respecto a las correlaciones entre las concentraciones de ETs en el suelo, destaca la correlación positiva del Pb total con el Zn total ($r=0,71$, $p<0,01$) y el Zn disponible ($r=0,91$, $p<0,01$); el Cu total también correlaciona positivamente con el Zn total ($r=0,62$, $p=0,01$) y por último también existe una correlación positiva entre el Zn total y el Zn disponible en suelos ($r=0,82$, $p<0,01$).

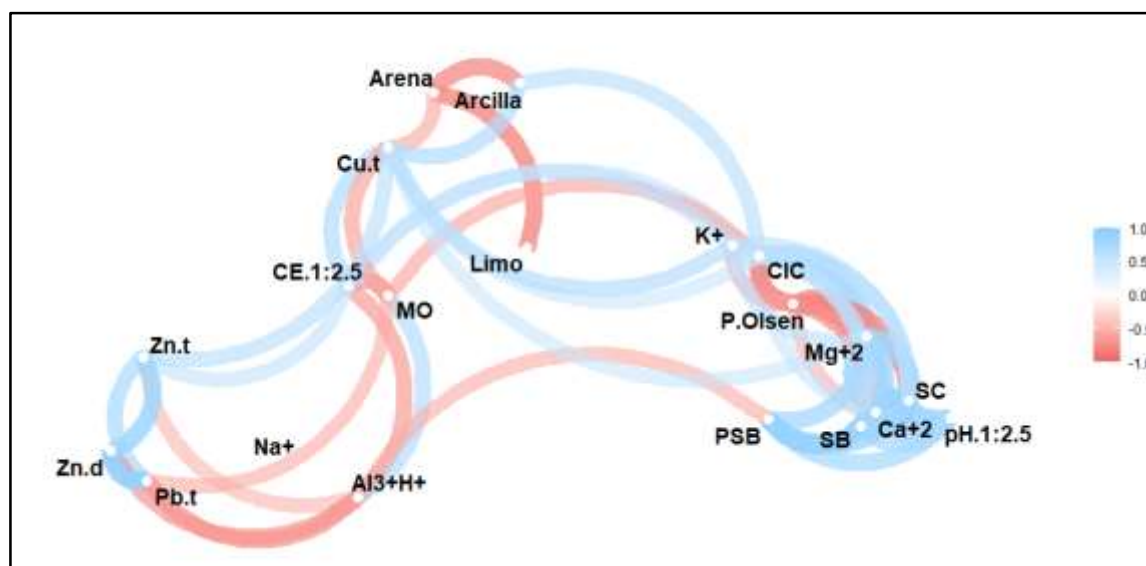


Figura 26. Red de correlaciones de las propiedades fisicoquímicas y concentración de ETs de suelos seleccionados de cultivo de papa.

3.2.1.3. Suelos sin cultivar

Se tomaron muestras de suelo en parcelas sin cultivar adyacentes a las seis parcelas de suelos seleccionados y también se determinaron las propiedades químicas más importantes, así como las concentraciones totales de ETs. Todos los análisis se realizaron por triplicado. Los resultados y la estadística descriptiva de los distintos análisis se muestran en las Tablas 23, 24 y 25.

Se observa que el pH y el porcentaje de materia orgánica, son las propiedades que presentaron menor variabilidad entre los seis suelos sin cultivar analizados, con 7,6 y 10,5 % de coeficiente de variación (CV) respectivamente. La CIC, Na⁺ y CICE presentaron variabilidad moderada de 36,5 %, 42,8 % y 55,3 % respectivamente. La conductividad eléctrica, el contenido de potasio, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ presentaron una alta variabilidad (superior al 65 %) entre los suelos sin cultivar analizados. Propiedades como el contenido de P Olsen y Al³⁺H⁺ presentaron muy alta variabilidad (superior al 100 %). Respecto del contenido de ETs en los suelos sin cultivar, el Cu presentó una variabilidad alta del 65,0 %, por su parte el Pb y Zn presentaron muy alta variabilidad con 108,1 % y 143,6 % respectivamente.

El pH (1:2.5) en los suelos de parcelas sin cultivar fue en promedio 5,52 (± 0,43), siendo también al igual que los suelos de parcelas seleccionadas de carácter ácido. La CE en promedio en estos suelos fue de 0,10 (± 0,09). Por su parte el porcentaje de MO fue en promedio 6,74 % (± 0,71) lo cual se considera alto en suelos. El contenido de P Olsen fue variable con un promedio de 20 ppm (± 22,87), en este caso las tres primeras parcelas (SA-01, SA-02 y SA-03) sin cultivar tuvieron contenidos menores a 3,5 ppm y las tres parcelas siguientes (SA-04, SA-05 y SA-06) presentaron mayores contenidos de P Olsen (18,67 ppm a 58,27 ppm). El potasio total en los dos primeros suelos analizados presentó contenidos promedio de 770 ppm y las cuatro parcelas siguientes un promedio de 146,3 ppm.

Respecto a las propiedades asociadas a los cationes de intercambio se tuvo que para la CIC los suelos presentaron un promedio de 14,53 meq/100g (± 5,30). Para la CICE el valor promedio fue de 11,17 meq/100g (± 6,17). El Ca²⁺ en promedio fue de 9,21 meq/100g (± 6,45), el Mg²⁺ tuvo un promedio de 1,27 meq/100g (± 0,84), el K⁺ en promedio fue de 0,94 meq/100g (± 0,86), el Na⁺ tuvo un promedio de 0,15 meq/100g (± 0,07) y la acidez intercambiable la cual fue muy variable fue en promedio 0,31 meq/100g (± 0,39).

Respecto de los ETs en las todos tuvieron alta variabilidad, para el Pb el promedio fue de 161,62 mg kg⁻¹(± 174,68), el Cu presentó un promedio de 19,05 mg kg⁻¹ (± 27,36) y el Zn fue en promedio de 169,14 mg kg⁻¹ (± 109,89).

Tabla 23. *Rango, media, mediana, desviación estándar y coeficiente de variación de propiedades químicas de suelos de parcelas sin cultivar (parte 1).*

Suelo	pH (1:2.5)	CE (1:2.5)	MO (%)	P Olsen (ppm)	K (ppm)	CIC (meq/100g)
SA-01	5,46	0,23	7,05	1,90	809,27	22,40
SA-02	6,35	0,17	7,36	2,32	730,73	17,87
SA-03	5,48	0,07	7,05	3,50	154,54	15,20
SA-04	5,19	0,02	6,28	18,67	149,51	8,00
SA-05	5,19	0,01	5,52	35,34	164,33	9,60
SA-06	5,47	0,08	7,20	58,27	116,95	14,13
Rango	5,19-6,35	0,01-0,23	5,52-7,36	1,90-58,27	116,95-809,27	8,00-22,40
Media	5,52	0,10	6,74	20,00	354,22	14,53
Mediana	5,46	0,08	7,05	11,09	159,43	14,67
D.E.	0,43	0,09	0,71	22,87	323,41	5,30
C.V.	7,75	88,92	10,46	114,33	91,30	36,49

Tabla 24. *Rango, media, mediana, desviación estándar y coeficiente de variación de propiedades químicas de suelos de parcelas sin cultivar (parte 2).*

Suelo	Ca ⁺² (meq/100g)	Mg ⁺² (meq/100g)	K ⁺ (meq/100g)	Na ⁺ (meq/100g)	Al ⁺³ H ⁺ (meq/100g)	CICE (meq/100g)
SA-01	19,6	2,12	2,09	0,22	0,05	19,74
SA-02	10,7	2,43	2,02	0,13	0,00	15,27
SA-03	11,0	1,06	0,43	0,08	0,13	12,75
SA-04	1,9	0,27	0,40	0,13	0,97	3,72
SA-05	2,8	0,67	0,42	0,25	0,58	4,69
SA-06	9,2	1,09	0,30	0,12	0,11	10,85
Rango	1,94-19,59	0,27-2,43	0,30-2,09	0,08-0,25	0,00-0,97	3,72-19,74
Media	9,21	1,27	0,94	0,15	0,31	11,17
Mediana	9,97	1,07	0,42	0,13	0,12	11,80
D.E.	6,45	0,84	0,86	0,07	0,39	6,17
C.V.	69,97	65,74	91,20	42,79	126,41	55,27

Tabla 25. Concentración, rango, media, mediana, desviación estándar y coeficiente de variación de ETs en parcelas sin cultivar.

Suelo	Cd (mgkg ⁻¹)	Pb (mgkg ⁻¹)	Cu (mgkg ⁻¹)	Zn (mgkg ⁻¹)
SA-01	< L.D.	46,49	9,61	36,74
SA-02	< L.D.	482,68	73,90	358,86
SA-03	< L.D.	44,05	3,90	92,43
SA-04	< L.D.	106,19	4,13	152,64
SA-05	< L.D.	48,24	17,48	192,43
SA-06	< L.D.	242,08	5,29	181,76
Rango	-	44,05-482,68	3,90-73,90	36,74-358,86
Media	-	161,62	19,05	169,14
Mediana	-	77,21	7,45	167,20
D.E.	-	174,68	27,36	109,89
C.V.	-	108,08	143,60	64,97

3.2.1.4. Comparación de propiedades fisicoquímicas y concentración de ETs entre suelos cultivados y suelos sin cultivar

Se realizó una comparación de medias entre las propiedades fisicoquímicas y concentración de ETs entre los suelos cultivados de las seis parcelas seleccionadas con las mismas propiedades y concentración de ETs de los seis suelos sin cultivar. Se realizó la prueba T student para las variables con distribución normal y la prueba de Wilcoxon para las variables que no presentaron distribución normal. La prueba de normalidad se hizo con el test de Shapiro Wilk. Los resultados de las comparaciones se muestran en la Tabla 26.

De todas las propiedades de los suelos comparadas solos dos (pH y CICE: capacidad de intercambio efectiva o suma de cationes) tuvieron una distribución normal. Las propiedades en las que estadísticamente hay una diferencia significativa entre las medias son el pH (1:2.5) el Na⁺ y Al³⁺H⁺ con un valor de p de 0,04, <0,01 y <0,01 respectivamente. Esto indica que las labores de cultivos han tendido a acidificar los suelos y a aumentar, consecuentemente, la acidez extraíble, más no se observó diferencia en el contenido total de los ETs evaluados.

Tabla 26. Normalidad y p-valor para la comparación de medias de las propiedades químicas de los suelos seleccionados cultivados y suelos sin cultivar.

Propiedad	Normalidad	Promedio cultivado	Promedio no cultivado	p-valor
pH (1:2.5)	Si	5,04	5,52	0,03894
CE (1:2.5)	No	0,20	0,10	0,18140
Materia Orgánica	No	6,20	6,74	0,08169
P Olsen	No	14,06	20,00	0,78970
CIC	No	15,16	14,53	0,68730
Ca ²⁺	No	5,74	9,21	0,40450
Mg ²⁺	No	1,19	1,27	0,97340
K ⁺	No	0,64	0,94	1,00000
Na ⁺	No	1,70	0,15	0,00059
Al ⁺³ H ⁺	No	1,16	0,31	0,00740
CICE	Si	10,43	11,17	0,79370
Pb	No	90,27	161,62	0,19940
Cu	No	12,06	19,05	0,20520
Zn	No	109,63	169,14	0,22410

Los valores de “p” que se muestran en negrita indican las variables en las que las diferencias entre medias son significativas.

3.2.2. Actividad 2: Determinación de la concentración y absorción de Cd, Pb, Cu y Zn en partes vegetales (raíz, tallos, hojas y tubérculos) de cultivos de papa seleccionados de la región Amazonas

Tres muestras de tejidos vegetales se recolectaron únicamente de las seis parcelas seleccionadas, estas muestras fueron recolectadas días antes de la cosecha para asegurar las muestras vegetales. Adicionalmente de estas parcelas seleccionadas también se tomaron tres muestras de suelos (una muestra de suelo por cada muestra de plantas) en el lugar exacto de la toma de muestra de plantas.

3.2.2.1. Planta de papa

En la Tabla 27 se muestra la producción de materia seca promedio en los diferentes órganos de la planta y la materia seca total en las plantas de papa (g planta^{-1}) muestreadas de las parcelas seleccionadas, además se muestra la desviación estándar en cada caso. Se realizó un análisis de varianza con el test de Tukey para la comparación de medias de cada sitio, el análisis de normalidad se realizó con el test de Shapiro Wilk, teniendo una distribución normal los datos de materia seca de todas las partes de la planta. En este caso, luego del análisis de comparación de medias para todas las partes de la planta y la materia seca total, se encontraron diferencias significativas entre las parcelas muestreadas ($P < 0,05$). Los datos del análisis de varianza (ANOVA), se muestran en el Anexo 15. Lo que sí es evidente es que la mayor cantidad de materia seca de la planta está en los tubérculos, según los resultados en promedio la materia seca del tubérculo está en el rango del 71,85 – 83,41 % del total de la materia seca de la planta de papa, por el contrario, la menor cantidad de materia seca está en las raíces en todas las parcelas analizadas.

También en la Tabla 28 se muestran los porcentajes promedio más la desviación estándar de materia seca en los distintos órganos de las plantas de papa. Se realizó el análisis de varianza con el test de Tukey para los datos que tenían distribución normal y la prueba de homocedasticidad con el test de Bartlett. En el caso del tallo cuyos datos no tenían una distribución normal se realizó la comparación con el test de Kruskal Wallis. Los datos del análisis de varianza (ANOVA), se muestran en el Anexo 15. En este análisis también se encontraron diferencias significativas entre parcelas para los porcentajes de materia seca en cada parte de la planta. A pesar de las diferencias entre parcelas, según los resultados en los suelos seleccionados el porcentaje de materia seca promedio de en cada una de las partes de la planta están en el siguiente orden de menor a mayor: raíz, tallo, hoja, cáscara y tubérculo con 1,28 %, 4,53 %, 7,20 %, 8,58 % y 78,41 % respectivamente. Los datos completos de cada parcela seleccionada y sus repeticiones se adjuntan en el Anexo 12.

Tabla 27. *Materia seca en los diferentes órganos de las plantas y materia seca total de las plantas seleccionadas.*

Suelo	Raíz (g/planta)	Tallo (g/planta)	Hoja (g/planta)	Cáscara (g/planta)	Tubérculo (g/planta)	Materia seca total (g/planta)
SS01	2,60 ± 0,39 ab	15,68 ± 1,71 ab	17,47 ± 1,25 ab	36,38 ± 6,12 a	307,14 ± 22,06 ab	379,27 ± 26,36 ab
SS02	1,75 ± 0,44 a	8,34 ± 3,25 a	15,56 ± 3,20 a	21,78 ± 2,60 b	153,86 ± 23,61 c	201,29 ± 31,89 c
SS03	4,68 ± 0,62 cd	16,22 ± 5,28 ab	28,92 ± 4,66 c	35,49 ± 6,41 ac	342,72 ± 50,24 a	428,04 ± 66,86 a
SS04	5,53 ± 0,95 cd	20,77 ± 6,58 b	26,26 ± 4,23 bc	24,43 ± 4,34 bc	196,55 ± 41,54 bc	273,55 ± 57,38 bc
SS05	3,85 ± 0,25 bc	12,42 ± 3,24 ab	23,17 ± 4,08 abc	19,34 ± 2,53 b	210,50 ± 69,78 bc	269,26 ± 79,14 bc
SS06	6,69 ± 1,24 d	14,28 ± 2,28 ab	25,66 ± 2,86 bc	28,66 ± 0,90 abc	378,57 ± 36,87 a	453,85 ± 43,37 a

*Los datos de cada sitio son el promedio de tres repeticiones y se muestra junto a la desviación estándar. Para cada columna, letras diferentes después de cada valor indican diferencia significativa entre sitios según el Test de Tukey ($p < 0,05$).

Tabla 28. *Porcentaje de masa seca en los diferentes órganos de una planta de papa variedad huayro.*

Suelo	Raíz (%)	Tallo (%)	Hoja (%)	Cáscara (%)	Tubérculo (%)
SS01	0,69 ± 0,13 a	4,12 ± 0,23 ab	4,64 ± 0,66 a	9,57 ± 1,18 ab	80,98 ± 0,79 ab
SS02	0,87 ± 0,14 ab	4,06 ± 0,97 ab	7,69 ± 0,52 bc	10,90 ± 1,23 a	76,48 ± 1,07 c
SS03	1,09 ± 0,05 abc	3,73 ± 0,69 a	6,76 ± 0,28 bd	8,27 ± 0,20 bc	80,15 ± 1,05 abc
SS04	2,03 ± 0,10 d	7,48 ± 0,83 b	9,66 ± 0,54 e	8,97 ± 0,42 ab	71,85 ± 0,83 d
SS05	1,52 ± 0,48 cd	4,66 ± 0,47 ab	8,80 ± 1,05 ce	7,41 ± 1,20 bc	77,60 ± 2,94 ac
SS06	1,47 ± 0,16 bcd	3,13 ± 0,22 a	5,65 ± 0,12 ad	6,35 ± 0,55 c	83,41 ± 0,16 b

*Los datos de cada sitio son el promedio de tres repeticiones y se muestra junto a la desviación estándar. Para cada columna, letras diferentes después de cada valor indican diferencia significativa entre sitios según el Test de Tukey ($p < 0,05$).

Se calculó el rendimiento fresco de tubérculos para las parcelas seleccionadas, esto en función del muestreo que consistió en el total de tubérculos de tres plantas. Se realizó un análisis de varianza con el test de Tukey del rendimiento fresco para encontrar diferencias entre los sitios seleccionados, el análisis de normalidad se realizó con el test de Shapiro Wilk y la prueba de homocedasticidad con Bartlett. Los datos del análisis de varianza (ANOVA), se muestran en el Anexo 15. Los datos se muestran en la Tabla 29, en la que también se consigna el rendimiento teórico dado por el agricultor. Luego del análisis de varianza se concluye que hay diferencias significativas entre algunos de los rendimientos promedios de las parcelas. Para el caso de las parcelas SS01 y SS03 no hay diferencia entre rendimientos, lo mismo ocurre para las parcelas SS04 y SS05.

Se puede evidenciar que los rendimientos dados por el agricultor difieren por mucho comparados con los rendimientos calculados. El rendimiento mínimo promedio calculado para una parcela fue de 22,29 toneladas/hectárea y el rendimiento máximo promedio calculado para una parcela fue de 55,55 toneladas/hectárea. Para el cálculo de los rendimientos en fresco se consideró 30 000 plantas/hectárea, ya que en promedio en la región Amazonas para el cultivo de papa se utiliza un distanciamiento de 30 cm entre planta y 90 cm entre surco.

Tabla 29. *Rendimiento en masa por hectárea de las parcelas seleccionadas de cultivo de papa variedad huayro.*

Suelo	Masa muestra* (kg)	Rendimiento fresco (ton/ha)	Rendimiento teórico del agricultor (ton/ha)
SS01	4,49 ± 0,44	44,85 ± 4,41 ab	15,00
SS02	2,23 ± 0,34	22,29 ± 3,40 c	15,00
SS03	4,61 ± 0,76	46,12 ± 7,57 ab	15,00
SS04	2,99 ± 0,63	29,85 ± 6,27 ac	15,00
SS05	3,31 ± 0,89	33,07 ± 8,85 ac	15,00
SS06	5,56 ± 0,67	55,55 ± 6,72 b	10,00

*La masa de la muestra consistía en el total de tubérculos de tres plantas. Para cada columna, letras diferentes después de cada valor indican diferencia significativa entre sitios según el Test de Tukey ($p < 0,05$).

Se realizó un análisis de correlación entre la cantidad de materia seca en cada parte de la planta y el rendimiento fresco en cada parcela, se evidencia así que el rendimiento

correlaciona positivamente con la cantidad de materia seca del tubérculo ($r=0,98$, $p<0,001$). La matriz de correlaciones se muestra en la Figura 27. En la Figura 28 se muestra un gráfico de dispersión entre la materia seca del tubérculo con el rendimiento fresco para la papa variedad huayro, lo cual indica la alta influencia de la materia seca del tubérculo en el rendimiento fresco ($R^2=0,9763$).

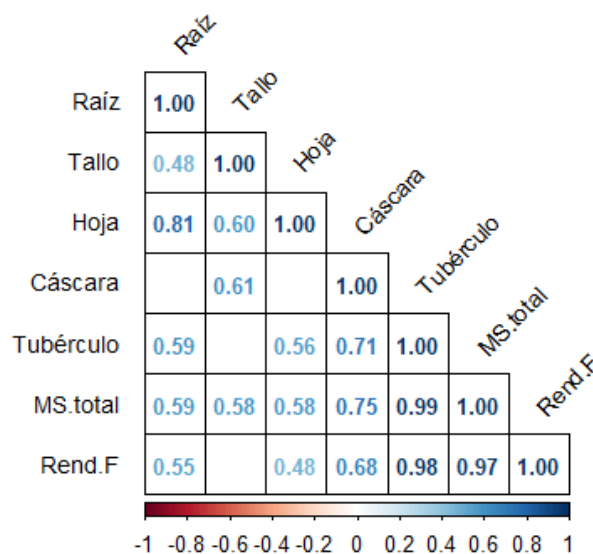


Figura 27. Matriz de correlaciones de la materia seca en diferentes partes de la planta de papa y el rendimiento fresco. Solo se muestran las correlaciones significativas ($p<0,05$)

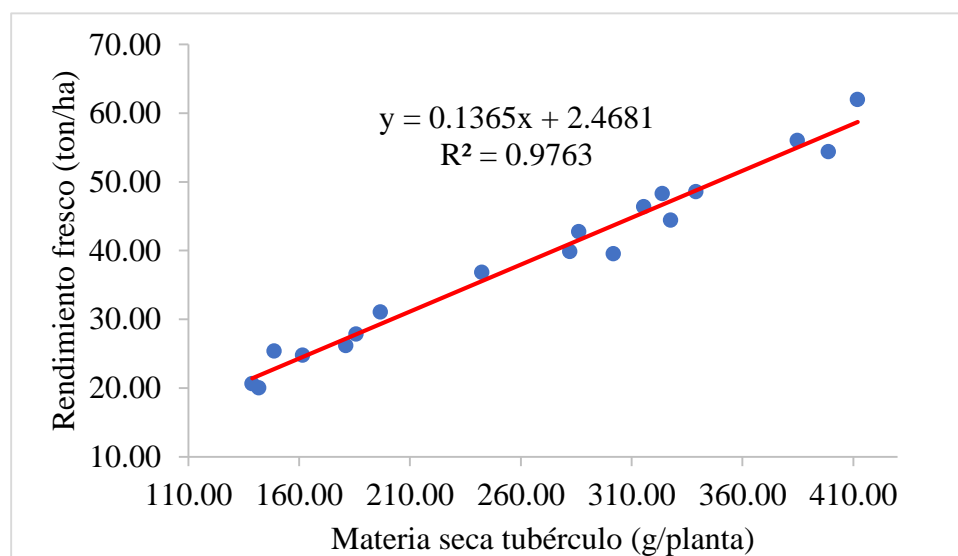


Figura 28. Influencia de la materia seca del tubérculo sobre el rendimiento fresco en la variedad huayro.

3.2.2.2. Cd, Pb, Cu y Zn en partes vegetales

Se determinó la concentración de Cd, Pb, Cu y Zn en las raíces, tallos, hojas, cáscaras de tubérculos y pulpa de tubérculos de las plantas de papa variedad huayro cultivadas en las seis parcelas seleccionadas. Las concentraciones de Cd en todas las muestras analizadas estuvieron por debajo del límite de detección ($0,39 \text{ mg kg}^{-1}$). Los límites de detección para el método utilizado para la determinación de ETs en vegetales se adjunta en el Anexo 10.

Para los tres ETs se buscaron diferencias significativas entre las concentraciones de cada parcela seleccionada. Se realizó análisis de varianza con el test de Tukey para los datos con distribución normal, la prueba de normalidad se realizó con Shapiro Wilk y la prueba de homocedasticidad con Bartlett. Para los datos que no tenían una distribución normal o no tenían homocedasticidad se realizó la comparación con Kruskal Wallis. Los datos del análisis de varianza (ANOVA) y del Test de Kruskal-Wallis, se muestran en el Anexo 15. En el caso del Pb, no tuvieron una distribución normal los datos de concentración de raíz, tallo y hoja. Respecto de las concentraciones de Cu, las concentraciones en raíz, tallo, hoja y cáscara no tuvieron una distribución normal. Para el caso del Zn las concentraciones de raíz, hoja y tubérculo no tienen una distribución normal, por el contrario, concentraciones de tallo y cáscara si tienen una distribución normal.

Los datos promedios y la desviación estándar por parcela seleccionada de Pb, Cu y Zn en las partes vegetales se muestran en las Tablas 30, 31 y 32 respectivamente. Los datos completos se muestran el Anexo 11. En la mitad de las parcelas analizadas la raíz presentó la mayor concentración de Pb, en dos parcelas fue la hoja la de mayor concentración y en una de ellas el tallo tuvo mayor concentración que todas las partes de la planta analizadas. Respecto al tubérculo y la cáscara de este, presentaron las menores concentraciones con respecto a las otras partes de la planta. El tubérculo tuvo la menor concentración de Pb en cinco de las 6 parcelas analizadas. Hubo diferencias significativas entre las parcelas para las concentraciones de Pb en las diferentes partes de la planta a excepción del tubérculo en el que no se presentaron diferencias en las medias de la concentración de Pb.

Tabla 30. Concentración de plomo en las diferentes partes de la planta de papa variedad huayro de las parcelas seleccionadas.

Suelo	Raíz (mg kg ⁻¹)	Tallo (mg kg ⁻¹)	Hoja (mg kg ⁻¹)	Tubérculo (mg kg ⁻¹)	Cáscara (mg kg ⁻¹)
SS01	20,22 ± 0,87 ab	23,13 ± 1,02 ab	25,45 ± 2,55 ab	14,26 ± 1,43 a	13,71 ± 0,58 a
SS02	41,91 ± 3,31 c	29,85 ± 3,69 a	28,22 ± 4,91 a	15,29 ± 0,67 a	15,53 ± 1,73 ab
SS03	19,80 ± 2,17 a	22,97 ± 2,46 ab	25,84 ± 2,84 ab	13,75 ± 0,18 a	14,58 ± 1,26 ab
SS04	19,90 ± 2,74 ab	23,10 ± 0,68 ab	22,60 ± 2,18 ab	14,45 ± 0,46 a	14,88 ± 0,46 ab
SS05	24,59 ± 0,49 bc	21,47 ± 0,60 b	22,32 ± 1,71 b	16,07 ± 0,47 a	17,34 ± 0,44 b
SS06	31,53 ± 0,51 c	23,71 ± 2,15 ab	24,40 ± 0,67 ab	13,93 ± 1,74 a	16,32 ± 0,90 ab

*Los datos de cada sitio son el promedio de tres repeticiones y se muestra junto a la desviación estándar. Para cada columna, letras diferentes después de cada valor indican diferencia significativa entre sitios según el Test de Tukey (p<0,05).

Por su parte el Cu presentó mayores concentraciones en la hoja para tres de las seis parcelas analizadas, por el contrario, la cáscara fue la que presentó menores concentraciones en tres de las seis parcelas estudiadas. Para este elemento se presentaron diferencias significativas entre parcelas para las medias de las concentraciones en las distintas partes de la planta. Finalmente, el Zn presentó mayores concentraciones en el tallo (tres parcelas) y la hoja (tres parcelas) y menores concentraciones en el tubérculo en cinco de las seis parcelas analizadas. Para el Zn también se presentaron diferencias significativas entre parcelas para las medias de las concentraciones en las distintas partes de la planta.

Tabla 31. Concentración de cobre en las diferentes partes de la planta de papa variedad huayro de las parcelas seleccionadas.

Suelo	Raíz (mg kg ⁻¹)	Tallo (mg kg ⁻¹)	Hoja (mg kg ⁻¹)	Tubérculo (mg kg ⁻¹)	Cáscara (mg kg ⁻¹)
SS01	7,47 ± 1,46 ab	7,62 ± 1,06 ab	8,08 ± 1,54 ab	6,75 ± 1,09 ab	4,40 ± 0,66 ab
SS02	13,96 ± 2,65 a	14,30 ± 3,06 a	12,88 ± 2,01 a	8,78 ± 0,92 a	7,16 ± 0,20 a
SS03	5,45 ± 1,03 bc	5,64 ± 0,99 bc	6,42 ± 1,39 bc	5,40 ± 1,26 b	3,37 ± 0,18 b
SS04	4,31 ± 0,69 c	3,29 ± 0,34 c	4,72 ± 0,29 c	5,85 ± 0,16 b	3,31 ± 0,15 b
SS05	6,84 ± 0,76 abc	6,22 ± 0,30 bc	7,66 ± 0,53 ab	6,54 ± 1,07 ab	6,24 ± 0,69 a
SS06	6,39 ± 1,31 abc	5,63 ± 1,42 bc	5,26 ± 0,84 bc	2,79 ± 0,67 c	3,60 ± 0,53 b

*Los datos de cada sitio son el promedio de tres repeticiones y se muestra junto a la desviación estándar. Para cada columna, letras diferentes después de cada valor indican diferencia significativa entre sitios según el Test de Tukey (p<0,05).

Tabla 32. Concentración de Zinc en las diferentes partes de la planta de papa variedad huayro de las parcelas seleccionadas.

Suelo	Raíz (mg kg ⁻¹)	Tallo (mg kg ⁻¹)	Hoja (mg kg ⁻¹)	Tubérculo (mg kg ⁻¹)	Cáscara (mg kg ⁻¹)
SS01	53,67 ± 5,94 a	49,61 ± 4,35 a	57,30 ± 14,24 a	6,34 ± 0,36 ab	11,04 ± 0,93 a
SS02	87,27 ± 6,58 ab	114,11 ± 5,91 ab	47,84 ± 3,69 a	13,06 ± 1,89 ac	19,32 ± 1,75 b
SS03	49,82 ± 0,64 a	46,67 ± 2,02 a	83,64 ± 5,01 bc	5,20 ± 0,87 b	13,82 ± 1,65 a
SS04	150,46 ± 36,26 b	169,68 ± 39,78 bc	247,32 ± 16,84 d	15,10 ± 1,16 cd	22,36 ± 1,61 b
SS05	159,17 ± 24,17 b	205,93 ± 32,69 c	82,25 ± 5,54 b	17,24 ± 1,11 d	14,23 ± 1,60 a
SS06	140,19 ± 52,47 b	190,84 ± 60,31 bc	162,81 ± 11,55 cd	13,78 ± 1,90 cd	14,23 ± 1,35 a

*Los datos de cada sitio son el promedio de tres repeticiones y se muestra junto a la desviación estándar. Para cada columna, letras diferentes después de cada valor indican diferencia significativa entre sitios según el Test de Tukey (p<0,05).

Con las concentraciones de ETs en los diferentes órganos de la planta y la masa seca de la planta se calculó la absorción de ETs por los tubérculos (A_{tub}) y la absorción de ETs total (AT) en gramos por hectárea, aquí se tuvo en consideración líneas arriba, la cantidad de 30 000 plantas/ha. Es importante resaltar que la absorción de los tubérculos se consideró también la cáscara de estos. En las Tablas 33, 34 y 35 se muestran los datos de absorción para Pb, Cu y Zn respectivamente. La absorción de Cd no se consideró debido a que las concentraciones en la planta estuvieron por debajo del límite de detección.

Tabla 33. Absorción de Pb del tubérculo y absorción total en gramos por hectárea.

Suelo	A_{tub} (g/ha)	AT (g/ha)	% A_{tub}/AT
SS01	146,22 ± 17,14	172,04 ± 16,11	84,87 ± 2,17
SS02	80,93 ± 14,76	103,29 ± 18,18	78,30 ± 0,98
SS03	156,91 ± 23,10	193,31 ± 29,64	81,26 ± 2,50
SS04	96,03 ± 19,42	131,32 ± 25,58	73,07 ± 1,13
SS05	111,66 ± 35,84	138,11 ± 41,07	80,50 ± 1,83
SS06	172,19 ± 25,86	207,53 ± 29,20	82,91 ± 2,06

Tabla 34. *Absorción de Cu del tubérculo y absorción total en gramos por hectárea.*

Suelo	A_{tub} (g/ha)	AT (g/ha)	% A_{tub}/AT
SS01	67,17 ± 13,81	75,59 ± 12,57	88,52 ± 3,49
SS02	45,58 ± 11,00	55,57 ± 11,61	81,68 ± 2,69
SS03	58,55 ± 11,74	67,59 ± 13,99	86,73 ± 0,99
SS04	36,79 ± 6,66	43,33 ± 8,35	85,04 ± 1,22
SS05	46,39 ± 21,23	54,87 ± 23,10	83,64 ± 3,20
SS06	35,21 ± 10,93	43,09 ± 13,26	81,73 ± 1,49

Tabla 35. *Absorción de Zn del tubérculo y absorción total en gramos por hectárea.*

Suelo	A_{tub} (g/ha)	AT (g/ha)	% A_{tub}/AT
SS01	70,33 ± 3,55	127,80 ± 10,40	55,16 ± 3,13
SS02	72,88 ± 12,00	127,70 ± 22,81	57,19 ± 3,33
SS03	67,83 ± 11,44	170,07 ± 28,74	39,98 ± 3,58
SS04	105,81 ± 24,59	424,03 ± 49,26	24,73 ± 3,01
SS05	115,51 ± 28,64	265,69 ± 41,16	43,09 ± 4,27
SS06	168,17 ± 22,39	405,91 ± 77,69	42,00 ± 5,77

La absorción por el tubérculo para el Pb representa en promedio el 80,15 % del total, para el caso del Cu este mismo parámetro representa el 84,56 % de total y para el Zn la absorción por el tubérculo representa en promedio el 43,69 % del total.

Se calculó también el factor de transferencia entre los distintas partes de la planta de papa analizados. Las relaciones para Pb, Cu y Zn calculadas fueron de tallo/raíz, hoja/tallo, hoja/cáscara y tubérculo/cáscara. En las Tablas 36, 37 y 38 se muestran los resultados promedio para cada parcela seleccionada. Para los tres ETs se buscaron diferencias significativas entre los factores de transferencia para cada parcela seleccionada. Se realizó análisis de varianza con el test de Tukey para los datos con distribución normal, la prueba de normalidad se realizó con Shapiro Wilk y la prueba de homocedasticidad con Bartlett. Para los datos que no tenían una distribución normal o no tenían homocedasticidad se realizó la comparación con Kruskal Wallis. En el caso del Pb, todos los datos tuvieron distribución normal. Respecto de las concentraciones de Cu también todos los datos tuvieron una distribución normal. Para el caso del Zn solo el factor de transferencia tubérculo/cáscara tuvo

una distribución normal. Los datos del análisis de varianza (ANOVA) y del Test de Kruskal-Wallis, se muestran en el Anexo 15

Tabla 36. *Factor de transferencia de Pb entre las distintas partes de la planta de papa variedad huayro de las parcelas seleccionadas.*

Suelo	tallo/raíz	hoja/tallo	cáscara/hoja	tubérculo/cáscara
SS01	1,15 ± 0,10 a	1,10 ± 0,14 a	0,54 ± 0,04 a	1,04 ± 0,14 a
SS02	0,71 ± 0,04 b	0,94 ± 0,07 a	0,56 ± 0,10 a	0,99 ± 0,07 a
SS03	1,17 ± 0,20 a	1,13 ± 0,02 a	0,57 ± 0,04 a	0,95 ± 0,10 a
SS04	1,17 ± 0,15 a	0,98 ± 0,09 a	0,66 ± 0,08 ab	0,97 ± 0,05 a
SS05	0,87 ± 0,04 ab	1,04 ± 0,11 a	0,78 ± 0,08 b	0,93 ± 0,04 a
SS06	0,75 ± 0,06 b	1,03 ± 0,07 a	0,67 ± 0,03 ab	0,86 ± 0,14 a

Para cada columna, letras diferentes después de cada valor indican diferencia significativa entre sitios según el Test de Tukey (p<0,05).

Tabla 37. *Factor de transferencia de Cu entre las distintas partes de la planta de papa variedad huayro de las parcelas seleccionadas.*

Suelo	tallo/raíz	hoja/tallo	cáscara/hoja	tubérculo/cáscara
SS01	1,03 ± 0,08 a	1,06 ± 0,08 a	0,55 ± 0,07 a	1,56 ± 0,38 a
SS02	1,03 ± 0,16 a	0,91 ± 0,06 a	0,57 ± 0,10 a	1,23 ± 0,11 ab
SS03	1,04 ± 0,02 a	1,15 ± 0,22 ab	0,54 ± 0,13 a	1,62 ± 0,47 a
SS04	0,77 ± 0,12 a	1,44 ± 0,15 b	0,70 ± 0,07 ab	1,77 ± 0,08 a
SS05	0,91 ± 0,06 a	1,23 ± 0,03 ab	0,81 ± 0,05 b	1,05 ± 0,13 ab
SS06	0,88 ± 0,07 a	0,95 ± 0,11 a	0,69 ± 0,01 ab	0,77 ± 0,12 b

Para cada columna, letras diferentes después de cada valor indican diferencia significativa entre sitios según el Test de Tukey (p<0,05)

Tabla 38. *Factor de transferencia de Zn entre las distintas partes de la planta de papa variedad huayro de las parcelas seleccionadas.*

Suelo	tallo/raíz	hoja/tallo	cáscara/hoja	tubérculo/cáscara
SS01	0,93 ± 0,02 a	1,17 ± 0,37 ab	0,20 ± 0,04 ab	0,58 ± 0,02 a
SS02	1,31 ± 0,03 bc	0,42 ± 0,01 c	0,40 ± 0,02 a	0,68 ± 0,09 a
SS03	0,94 ± 0,03 a	1,80 ± 0,18 a	0,17 ± 0,03 bc	0,37 ± 0,02 b
SS04	1,13 ± 0,04 ab	1,50 ± 0,27 ab	0,09 ± 0,00 c	0,68 ± 0,07 a
SS05	1,29 ± 0,01 bc	0,40 ± 0,05 c	0,17 ± 0,02 ab	1,22 ± 0,07 c
SS06	1,38 ± 0,10 c	0,91 ± 0,25 bc	0,09 ± 0,01 c	0,97 ± 0,08 d

Para cada columna, letras diferentes después de cada valor indican diferencia significativa entre sitios según el Test de Tukey ($p < 0,05$)

3.2.2.3. Factor de bioconcentración

Se calculó el factor de bioconcentración total (BCF) de Pb, Cu y Zn, este parámetro está definido por la relación entre la concentración total de ET en el tubérculo con la concentración de ET en el suelo. También se calculó el BCF disponible para el Zn, esto debido a que solo se tuvo concentraciones disponibles de Zn en suelos. El BCF disponible es la relación entre la concentración total del ET en el tubérculo con la concentración disponible del ET en el suelo. Se realizó análisis de varianza con el test de Tukey para los datos con distribución normal (BCF_{Pb}), la prueba de normalidad se realizó con Shapiro Wilk y la prueba de homocedasticidad con Bartlett. Para los datos que no tenían una distribución normal o no tenían homocedasticidad se realizó la comparación con Kruskal Wallis. Con los datos de BCF total de Zn y BCF disponible de Zn se calculó el coeficiente de partición para este elemento (K_d). Los datos promedios de estos parámetros se muestran en la Tabla 39 y los datos completos se adjuntan en el Anexo 13. Los datos del análisis de varianza (ANOVA) y del Test de Kruskal-Wallis, se muestran en el Anexo 15.

Tabla 39. *BCF total de ETs, BCF disponible de zinc y Kd de zinc para cultivo de papa en parcelas seleccionadas.*

Suelo	BCF _{total}			BCF _{disponible} Zn	Kd Zn
	Pb	Cu	Zn		
SS01	0,38 ± 0,05 ab	1,16 ± 0,25 a	0,14 ± 0,03 a	6,45 ± 0,58 ab	0,02 ± 0,00 a
SS02	0,08 ± 0,03 cd	0,16 ± 0,01 b	0,07 ± 0,00 b	1,28 ± 0,18 c	0,05 ± 0,01 b
SS03	0,55 ± 0,08 e	---	0,15 ± 0,04 a	7,81 ± 2,75 a	0,02 ± 0,01 a
SS04	0,14 ± 0,02 ac	---	0,12 ± 0,02 ab	2,22 ± 0,42 c	0,05 ± 0,00 b
SS05	0,43 ± 0,02 be	0,64 ± 0,11 c	0,12 ± 0,02 ab	3,79 ± 0,68 bc	0,03 ± 0,00 a
SS06	0,09 ± 0,00 d	---	0,12 ± 0,02 ab	1,91 ± 0,29 c	0,07 ± 0,00 b

Para cada columna, letras diferentes después de cada valor indican diferencia significativa entre sitios según el Test de Tukey ($p < 0,05$)

3.2.3. Actividad 3: Determinación de relaciones entre las propiedades del suelo y los factores de manejo con la concentración y absorción de elementos traza en cultivos de papa

Análisis de correlación de las propiedades del suelo y las propiedades de la planta

Para determinar las posibles relaciones entre las propiedades del suelo con la concentración y absorción de ETs y las variables de planta, primero se hizo un análisis de correlación entre todas las variables tanto de suelo como de planta. Como no todas las variables tenían una distribución normal, se hizo una correlación Spearman. La matriz de correlación y los valores de p, se muestran en las Tablas 40, 41 y 42.

También se realizó un análisis de regresión simple entre las variables que tenían mayor correlación, en las Figuras 29 - 33 se muestran los gráficos de dispersión de este análisis.

Tabla 40. Matriz de correlación entre propiedades del suelo y propiedades de la planta de papa de parcelas seleccionadas (parte 1).

	pH	CE	P	MO	Arena	Limo	Arcilla	CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ H ⁺	CICE	Pb _{soil}	Cu _{soil}	Zn _{soil}	Zn _{EDTA}
BCF _{Pb}	0,03	-0,43	-0,03	0,56	-0,12	0,06	0,00	-0,17	-0,20	-0,09	0,03	0,13	0,72	-0,04	-0,95	-0,12	-0,60	-0,88
P valor	0,90	0,07	0,90	0,02	0,63	0,82	0,99	0,49	0,42	0,72	0,91	0,74	<0,01	0,88	<0,01	0,63	0,01	<0,01
BCF _{Cu}	-0,23	-0,86	0,08	0,70	0,40	-0,68	0,19	-0,38	-0,03	-0,32	-0,06	0,03	0,88	0,07	-0,73	-0,95	-0,90	-0,90
P valor	0,55	<0,01	0,84	0,04	0,29	0,05	0,62	0,32	0,95	0,41	0,88	0,95	<0,01	0,88	0,03	<0,01	<0,01	<0,01
BCF _{Zn}	-0,12	-0,38	0,02	0,37	0,29	-0,33	-0,26	-0,29	-0,11	-0,34	0,01	0,00	0,34	-0,08	-0,62	-0,48	-0,79	-0,62
P valor	0,63	0,13	0,92	0,13	0,24	0,18	0,31	0,25	0,66	0,16	0,98	1,00	0,16	0,76	0,01	0,04	<0,01	0,01
BCF _{ZnEDTA}	0,03	-0,44	-0,18	0,50	0,11	-0,31	-0,01	-0,14	0,01	-0,03	0,14	-0,13	0,66	0,13	-0,92	-0,29	-0,86	-0,98
P valor	0,90	0,07	0,46	0,03	0,65	0,21	0,96	0,59	0,96	0,90	0,58	0,74	<0,01	0,60	<0,01	0,25	<0,01	<0,01
Kd _{Zn}	-0,05	0,31	0,32	-0,37	0,20	0,00	-0,26	-0,05	0,01	-0,17	-0,23	-0,17	-0,70	-0,15	0,83	-0,13	0,53	0,87
P valor	0,84	0,22	0,19	0,13	0,42	0,99	0,29	0,84	0,98	0,49	0,35	0,67	<0,01	0,55	<0,01	0,61	0,02	<0,01
Pb _{raíz}	-0,03	0,69	-0,08	-0,70	-0,13	0,20	0,15	0,31	0,18	0,24	0,24	-0,07	-0,75	0,00	0,74	0,51	0,69	0,67
P valor	0,91	<0,01	0,77	<0,01	0,59	0,43	0,56	0,22	0,47	0,34	0,33	0,88	<0,01	1,00	<0,01	0,03	<0,01	<0,01
Pb _{tallo}	-0,09	0,24	-0,35	-0,52	-0,39	0,41	0,35	0,36	0,19	0,01	0,03	-0,17	-0,23	0,04	0,46	0,23	0,26	0,49
P valor	0,74	0,33	0,16	0,03	0,11	0,09	0,16	0,14	0,44	0,98	0,92	0,68	0,36	0,89	0,05	0,36	0,29	0,04
Pb _{hoja}	0,45	0,22	-0,61	-0,42	-0,10	-0,04	0,23	0,60	0,65	0,52	0,20	-0,38	-0,40	0,41	0,19	0,15	-0,02	0,20
P valor	0,06	0,39	0,01	0,08	0,69	0,89	0,35	0,01	<0,01	0,03	0,43	0,31	0,10	0,10	0,44	0,56	0,95	0,44
Pb _{tubérculo}	-0,05	0,44	0,16	-0,30	-0,27	0,25	0,22	0,06	-0,20	0,08	0,33	0,40	-0,14	-0,07	0,28	0,63	0,57	0,23
P valor	0,84	0,07	0,52	0,22	0,27	0,31	0,38	0,81	0,43	0,74	0,18	0,29	0,59	0,80	0,25	0,01	0,02	0,36
Pb _{cáscara}	-0,21	0,55	0,34	-0,21	0,01	0,14	-0,09	-0,14	-0,26	-0,25	0,27	0,23	-0,36	-0,25	0,23	0,23	0,47	0,39
P valor	0,41	0,02	0,17	0,41	0,96	0,57	0,72	0,58	0,29	0,32	0,27	0,55	0,14	0,31	0,35	0,35	0,05	0,11
Cu _{raíz}	0,11	0,74	-0,57	-0,71	-0,28	0,01	0,61	0,61	0,48	0,60	0,64	-0,23	-0,44	0,31	0,32	0,75	0,39	0,23
P valor	0,67	<0,01	0,01	<0,01	0,26	0,98	0,01	0,01	0,04	0,01	<0,01	0,55	0,07	0,21	0,19	<0,01	0,11	0,37
Cu _{tallo}	0,18	0,59	-0,73	-0,71	-0,36	0,04	0,65	0,70	0,57	0,63	0,61	-0,33	-0,27	0,43	0,20	0,69	0,21	0,09
P valor	0,48	0,01	<0,01	<0,01	0,14	0,88	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,01	0,39	0,28	0,07	0,44	<0,01	0,39	0,72
Cu _{hoja}	0,14	0,54	-0,58	-0,56	-0,56	0,28	0,70	0,58	0,32	0,54	0,62	-0,42	-0,11	0,23	-0,02	0,81	0,33	0,02
P valor	0,58	0,02	0,01	0,02	0,02	0,26	<0,01	0,01	0,20	0,02	0,01	0,27	0,66	0,35	0,94	<0,01	0,18	0,93
Cu _{tubérculo}	0,16	0,20	-0,33	-0,33	-0,55	0,39	0,56	0,34	0,07	0,39	0,37	0,13	0,11	0,15	0,08	0,75	0,48	0,17
P valor	0,53	0,43	0,18	0,19	0,02	0,11	0,01	0,16	0,80	0,11	0,13	0,74	0,66	0,56	0,75	<0,01	0,05	0,5
Cu _{cáscara}	-0,07	0,68	-0,35	-0,68	-0,40	0,25	0,51	0,33	0,09	0,36	0,65	-0,03	-0,35	0,05	0,22	0,91	0,53	0,22
P valor	0,79	<0,01	0,16	<0,01	0,10	0,31	0,03	0,18	0,71	0,14	<0,01	0,95	0,15	0,83	0,38	<0,01	0,02	0,37

Tabla 41. Matriz de correlación entre propiedades del suelo y propiedades de la planta de papa de parcelas seleccionadas (parte 2).

	pH	CE	P	MO	Arena	Limo	Arcilla	CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ H ⁺	CICE	Pb _{soil}	Cu _{soil}	Zn _{soil}	Zn _{EDTA}
Zn raíz	-0,63	0,22	0,76	0,04	0,21	0,05	-0,17	-0,54	-0,65	-0,59	-0,25	0,08	-0,24	-0,66	0,47	-0,02	0,55	0,53
P valor	<0,01	0,38	<0,01	0,87	0,4	0,85	0,51	0,02	<0,01	0,01	0,31	0,84	0,34	<0,01	0,05	0,93	0,02	0,03
Zn tallo	-0,63	0,34	0,71	-0,03	0,18	0,03	-0,11	-0,45	-0,58	-0,54	-0,18	0,08	-0,32	-0,61	0,49	0,00	0,54	0,53
P valor	0,01	0,17	<0,01	0,92	0,47	0,90	0,66	0,06	0,01	0,02	0,48	0,84	0,20	0,01	0,04	0,99	0,02	0,03
Zn hoja	-0,34	-0,39	0,78	0,55	0,54	-0,19	-0,68	-0,75	-0,49	-0,64	-0,66	-0,13	-0,01	-0,51	0,07	-0,75	-0,14	0,08
P valor	0,17	0,11	<0,01	0,02	0,02	0,44	<0,01	<0,01	0,04	<0,01	<0,01	0,74	0,97	0,03	0,77	<0,01	0,58	0,75
Zn tubérculo	-0,34	0,38	0,63	-0,08	0,10	0,04	-0,06	-0,34	-0,52	-0,32	0,03	0,07	-0,35	-0,50	0,40	0,24	0,64	0,53
P valor	0,17	0,12	0,01	0,74	0,70	0,88	0,80	0,17	0,03	0,19	0,91	0,88	0,15	0,03	0,10	0,33	<0,01	0,02
Zn cáscara	-0,16	0,04	0,45	-0,01	-0,10	0,53	-0,23	-0,25	-0,39	-0,33	-0,47	-0,08	-0,31	-0,50	0,53	-0,02	0,57	0,71
P valor	0,53	0,87	0,06	0,98	0,68	0,02	0,36	0,33	0,11	0,18	0,05	0,84	0,21	0,04	0,03	0,95	0,01	<0,01
A Pb raíz	-0,29	-0,06	0,65	0,19	0,48	-0,14	-0,65	-0,52	-0,33	-0,52	-0,43	0,12	-0,31	-0,41	0,25	-0,53	0,03	0,27
P valor	0,24	0,82	<0,01	0,45	0,04	0,57	<0,01	0,03	0,19	0,03	0,07	0,78	0,21	0,09	0,31	0,02	0,91	0,27
A Pb tallo	0,06	-0,65	0,13	0,36	0,36	-0,28	-0,44	-0,40	-0,08	-0,35	-0,19	0,10	0,40	0,02	-0,25	-0,60	-0,52	-0,20
P valor	0,82	<0,01	0,60	0,15	0,14	0,26	0,07	0,10	0,76	0,15	0,44	0,81	0,10	0,95	0,31	0,01	0,03	0,42
A Pb hoja	0,15	-0,42	0,29	0,42	0,63	-0,38	-0,71	-0,44	0,01	-0,22	-0,33	0,08	0,04	-0,07	-0,19	-0,69	-0,40	-0,16
P valor	0,56	0,08	0,24	0,08	0,01	0,12	<0,01	0,07	0,97	0,39	0,18	0,84	0,86	0,79	0,46	<0,01	0,10	0,52
A Pb	0,15	-0,26	-0,10	0,16	0,48	-0,58	-0,35	-0,07	0,30	-0,02	0,08	0,23	0,17	0,36	-0,24	-0,51	-0,58	-0,40
P valor	0,55	0,30	0,70	0,54	0,04	0,01	0,15	0,79	0,22	0,95	0,75	0,55	0,50	0,14	0,34	0,03	0,01	0,10
A Pb cáscara	0,15	-0,33	-0,35	0,15	0,32	-0,44	-0,21	0,06	0,37	0,02	0,12	0,18	0,29	0,40	-0,38	-0,47	-0,73	-0,43
P valor	0,56	0,18	0,15	0,55	0,20	0,06	0,41	0,80	0,13	0,95	0,64	0,64	0,24	0,11	0,12	0,05	<0,01	0,07
A total Pb	0,17	-0,36	-0,07	0,22	0,48	-0,55	-0,41	-0,1	0,29	-0,07	-0,04	0,23	0,19	0,33	-0,26	-0,63	-0,66	-0,41
P valor	0,51	0,15	0,78	0,37	0,04	0,02	0,10	0,70	0,24	0,78	0,89	0,55	0,44	0,18	0,29	0,01	<0,01	0,09
A Cu raíz	-0,20	0,24	0,36	-0,03	0,41	-0,33	-0,26	-0,16	-0,04	-0,13	-0,15	-0,17	-0,43	-0,23	0,22	-0,22	0,10	0,25
P valor	0,44	0,33	0,14	0,90	0,09	0,19	0,29	0,52	0,88	0,60	0,56	0,68	0,07	0,37	0,38	0,38	0,68	0,31
A Cu tallo	0,34	0,30	-0,68	-0,50	-0,11	-0,22	0,40	0,50	0,60	0,55	0,66	0,02	-0,05	0,57	0,07	0,43	-0,03	-0,03
P valor	0,17	0,23	<0,01	0,04	0,66	0,39	0,10	0,04	0,01	0,02	<0,01	0,98	0,84	0,01	0,79	0,07	0,90	0,90
A Cu hoja	0,13	0,27	-0,28	-0,24	-0,2	0,14	0,24	0,22	0,17	0,35	0,31	-0,30	-0,03	0,05	-0,14	0,44	0,18	-0,04
P valor	0,62	0,29	0,27	0,33	0,43	0,58	0,33	0,38	0,50	0,15	0,21	0,44	0,91	0,84	0,57	0,07	0,47	0,87

Tabla 42: Matriz de correlación entre propiedades del suelo y propiedades de la planta de papa de parcelas seleccionadas (parte3).

	pH	CE	P	MO	Arena	Limo	Arcilla	CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ H ⁺	CICE	Pb _{soil}	Cu _{soil}	Zn _{soil}	Zn _{EDTA}
A Cu tubérculo	0,31	-0,24	-0,50	0,06	0,00	-0,28	0,19	0,17	0,35	0,35	0,42	0,08	0,51	0,47	-0,55	0,10	-0,46	-0,60
P valor	0,21	0,34	0,04	0,81	1,00	0,26	0,46	0,49	0,16	0,16	0,08	0,84	0,03	0,05	0,02	0,69	0,05	0,01
A Cu cáscara	0,17	0,27	-0,69	-0,52	-0,32	0,01	0,47	0,46	0,40	0,52	0,67	-0,08	0,00	0,43	-0,16	0,64	0,00	-0,18
P valor	0,51	0,28	<0,01	0,03	0,20	0,98	0,05	0,05	0,10	0,03	<0,01	0,84	1,00	0,08	0,52	<0,01	0,99	0,46
A total Cu	0,27	-0,18	-0,50	-0,02	-0,03	-0,24	0,19	0,19	0,35	0,33	0,42	0,07	0,44	0,45	-0,50	0,13	-0,41	-0,53
P valor	0,28	0,48	0,04	0,92	0,91	0,34	0,44	0,45	0,15	0,18	0,08	0,88	0,07	0,06	0,04	0,60	0,09	0,03
A Zn raíz	-0,53	-0,09	0,81	0,35	0,51	-0,13	-0,59	-0,72	-0,57	-0,69	-0,52	0,12	-0,15	-0,63	0,21	-0,53	0,08	0,24
P valor	0,02	0,71	<0,01	0,16	0,03	0,62	0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,03	0,78	0,55	0,01	0,41	0,02	0,74	0,34
A Zn tallo	-0,40	-0,05	0,73	0,13	0,45	-0,14	-0,53	-0,67	-0,52	-0,63	-0,25	0,33	-0,17	-0,47	0,36	-0,32	0,26	0,43
P valor	0,10	0,86	<0,01	0,59	0,06	0,58	0,02	<0,01	0,03	0,01	0,33	0,39	0,51	0,05	0,14	0,20	0,30	0,08
A Zn hoja	-0,22	-0,49	0,71	0,57	0,61	-0,25	-0,76	-0,72	-0,40	-0,60	-0,67	0,13	0,05	-0,41	0,02	-0,83	-0,23	0,06
P valor	0,38	0,04	<0,01	0,01	0,01	0,31	<0,01	<0,01	0,1	0,01	<0,01	0,74	0,84	0,09	0,93	<0,01	0,35	0,82
A Zn tubérculo	-0,23	0,25	0,54	-0,12	0,44	-0,34	-0,35	-0,34	-0,21	-0,34	-0,01	0,23	-0,43	-0,21	0,46	-0,18	0,32	0,48
P valor	0,37	0,32	0,02	0,63	0,07	0,17	0,16	0,17	0,41	0,17	0,95	0,55	0,07	0,40	0,06	0,46	0,20	0,05
A Zn cáscara	-0,05	-0,59	0,12	0,34	0,15	0,19	-0,41	-0,31	-0,20	-0,34	-0,52	-0,05	0,28	-0,21	0,01	-0,46	-0,20	0,14
P valor	0,85	0,01	0,62	0,17	0,56	0,45	0,09	0,21	0,44	0,16	0,03	0,91	0,26	0,39	0,99	0,05	0,44	0,57
A total Zn	-0,30	-0,18	0,74	0,33	0,61	-0,30	-0,65	-0,68	-0,43	-0,60	-0,40	0,30	-0,14	-0,42	0,21	-0,58	0,04	0,28
P valor	0,22	0,48	<0,01	0,18	0,01	0,23	<0,01	<0,01	0,08	0,01	0,10	0,44	0,59	0,08	0,39	0,01	0,88	0,27
P raíz	-0,39	-0,26	0,69	0,39	0,46	-0,22	-0,44	-0,70	-0,66	-0,58	-0,25	0,30	0,23	-0,48	-0,08	-0,23	0,07	0,04
P valor	0,11	0,30	<0,01	0,11	0,06	0,39	0,07	<0,01	<0,01	0,01	0,32	0,43	0,37	0,04	0,75	0,36	0,78	0,86
P tallo	-0,17	-0,44	0,61	0,69	0,39	-0,07	-0,63	-0,68	-0,55	-0,40	-0,36	0,48	0,21	-0,35	-0,27	-0,38	-0,12	-0,16
P valor	0,51	0,07	0,01	<0,01	0,11	0,77	<0,01	<0,01	0,02	0,10	0,14	0,19	0,40	0,15	0,27	0,12	0,64	0,54
P hoja	-0,19	-0,33	0,71	0,44	0,64	-0,23	-0,83	-0,70	-0,41	-0,56	-0,53	0,51	-0,12	-0,36	0,18	-0,66	-0,05	0,23
P valor	0,45	0,18	<0,01	0,07	<0,01	0,36	<0,01	<0,01	0,09	0,01	0,02	0,16	0,63	0,14	0,48	<0,01	0,84	0,36
P tubérculo	0,12	-0,72	0,31	0,71	0,16	-0,02	-0,45	-0,37	-0,16	-0,35	-0,53	0,20	0,48	-0,06	-0,35	-0,79	-0,55	-0,37
P valor	0,65	<0,01	0,20	<0,01	0,53	0,94	0,06	0,14	0,53	0,15	0,02	0,61	0,04	0,82	0,16	<0,01	0,02	0,14
P cáscara	-0,24	-0,34	0,47	0,46	0,30	-0,18	-0,38	-0,51	-0,33	-0,51	-0,25	0,06	0,07	-0,29	-0,20	-0,58	-0,29	-0,14
P valor	0,34	0,16	0,05	0,05	0,22	0,47	0,12	0,03	0,19	0,03	0,32	0,88	0,79	0,25	0,43	0,01	0,25	0,59
Rend Fresco	0,07	-0,21	-0,13	0,11	0,50	-0,64	-0,31	-0,05	0,33	-0,06	0,11	0,13	0,08	0,34	-0,23	-0,55	-0,64	-0,37
P valor	0,77	0,41	0,6	0,67	0,03	<0,01	0,21	0,83	0,18	0,81	0,66	0,74	0,75	0,17	0,36	0,02	0,01	0,13

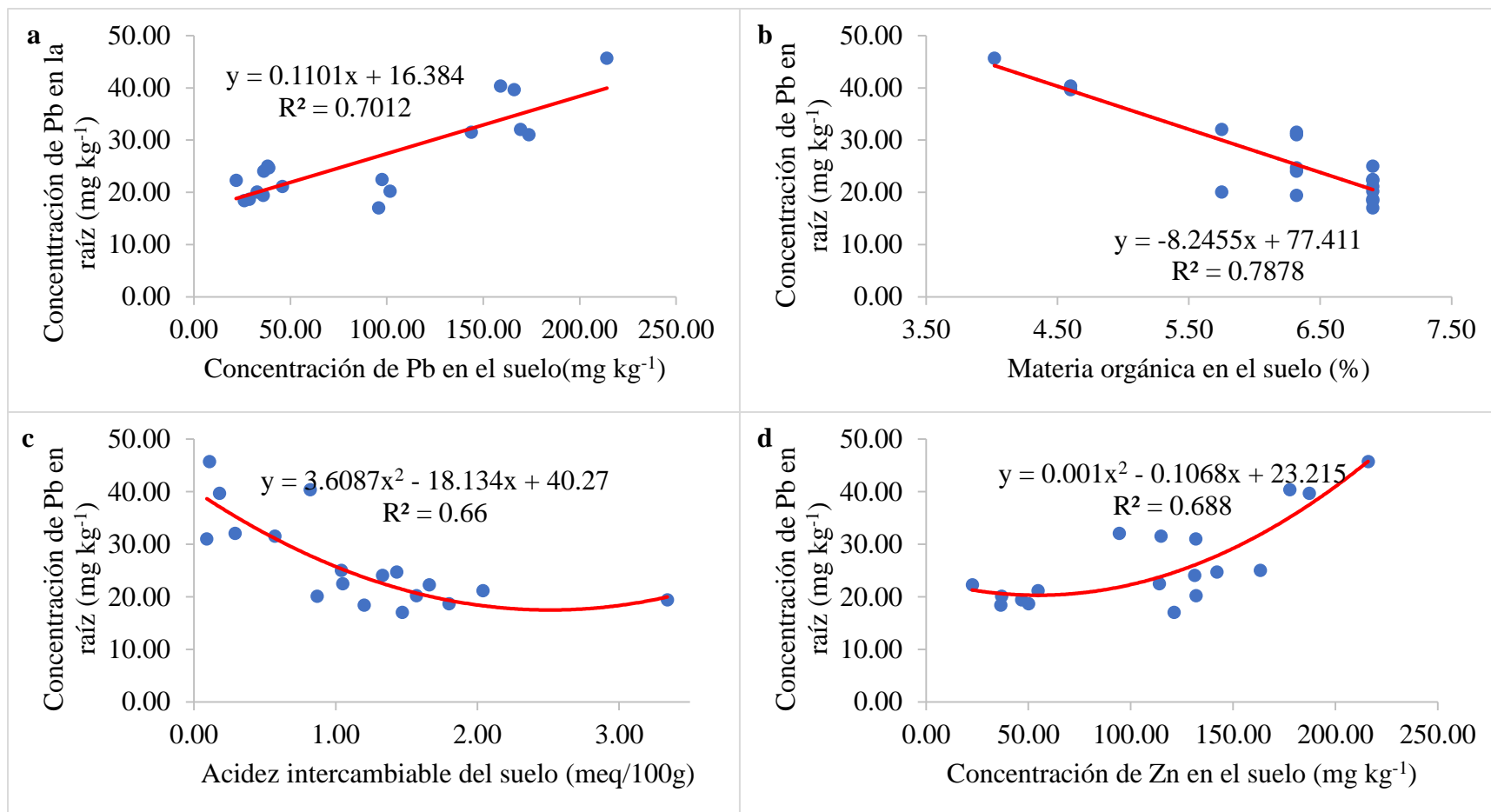


Figura 29. a) Influencia de la concentración de Pb en el suelo sobre la concentración de Pb en la raíz; b) Influencia de la materia orgánica en el suelo sobre la concentración de Pb en la raíz; c) Influencia de la acidez intercambiable del suelo sobre la concentración de Pb en la raíz y d) Influencia de la concentración de Zn en el suelo sobre la concentración de Pb en la raíz.

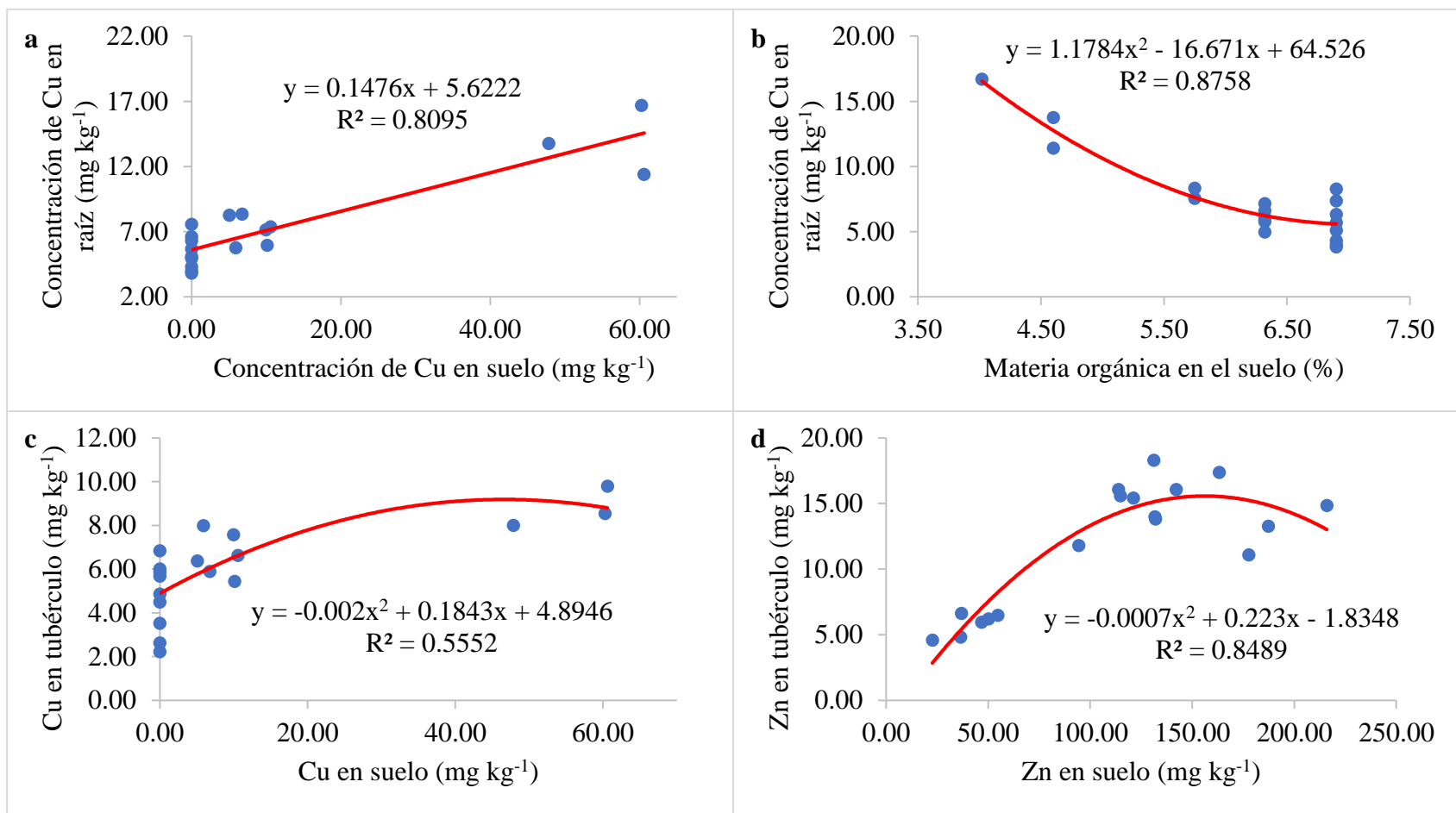


Figura 30. a) Influencia de la concentración de Cu en el suelo sobre la concentración de Cu en la raíz; b) Influencia de la materia orgánica en el suelo sobre la concentración de Cu en la raíz; c) Influencia de la concentración de Cu en el suelo sobre la concentración de Cu en el tubérculo y d) Influencia de la concentración de Zn en el suelo sobre la concentración de Zn en el tubérculo.

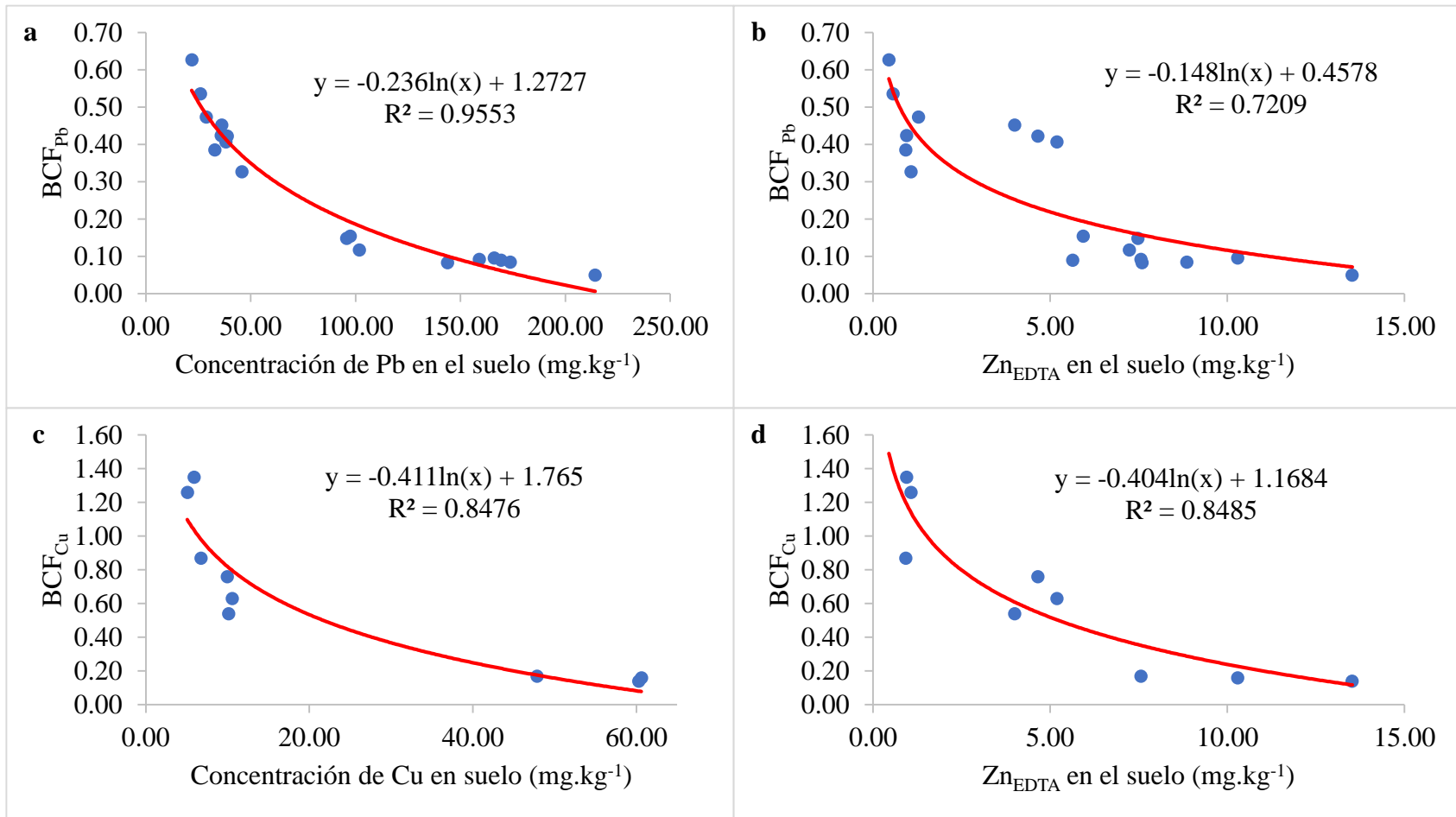


Figura 31. a) Influencia de la concentración de Pb en el suelo sobre el BCF_{Pb} ; b) Influencia de la concentración de Zn_{EDTA} en el suelo sobre el BCF_{Pb} ; c) Influencia de la concentración de Cu en el suelo sobre el BCF_{Cu} y d) Influencia de la concentración de Zn_{EDTA} en el suelo sobre el BCF_{Cu} .

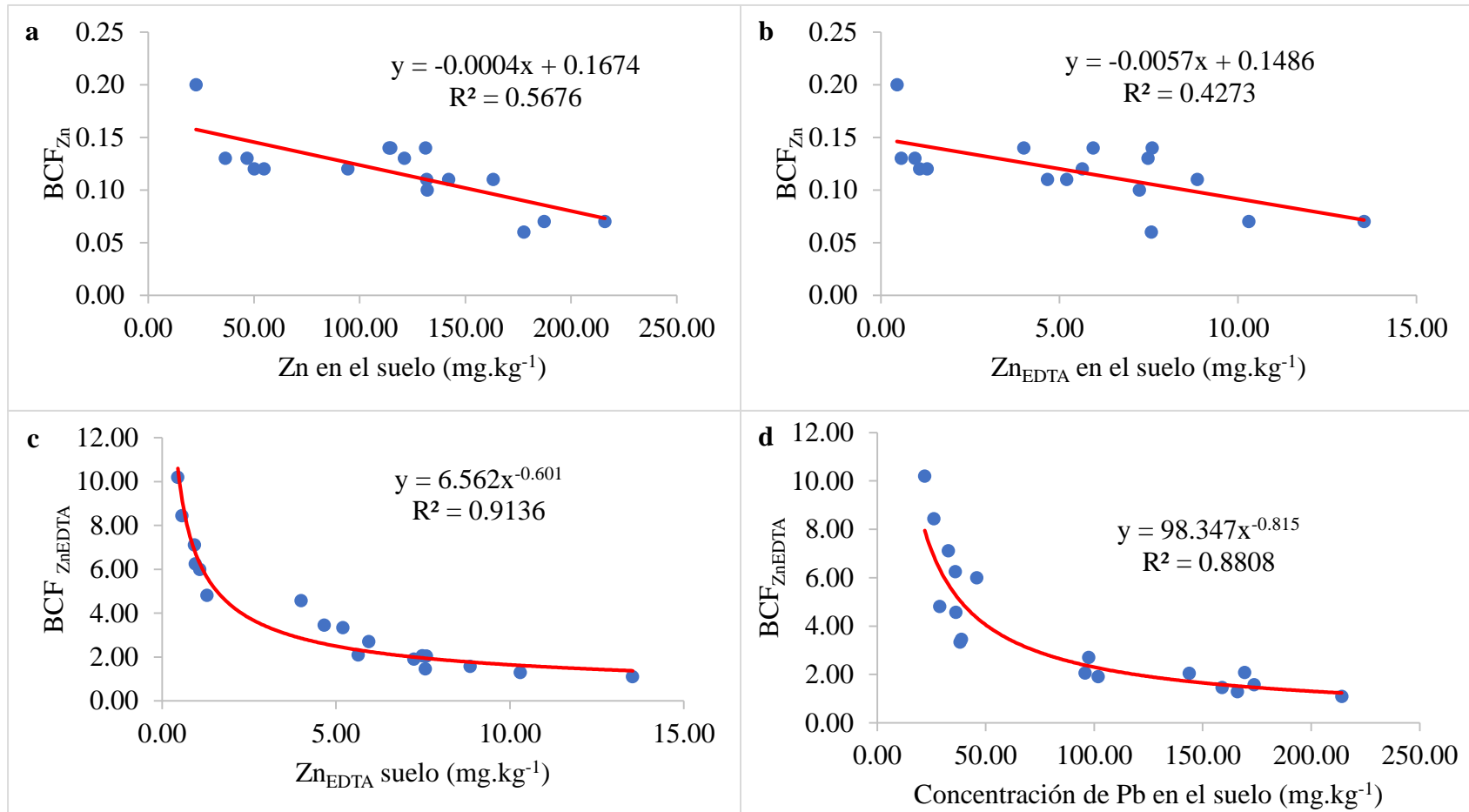


Figura 32. a) Influencia de la concentración de Zn en el suelo sobre el BCF_{Zn} ; b) Influencia de la concentración de Zn_{EDTA} en el suelo sobre el BCF_{Zn} ; c) Influencia de la concentración de Zn_{EDTA} en el suelo sobre el BCF_{ZnEDTA} y d) Influencia de la concentración de Pb en el suelo sobre el BCF_{ZnEDTA} .

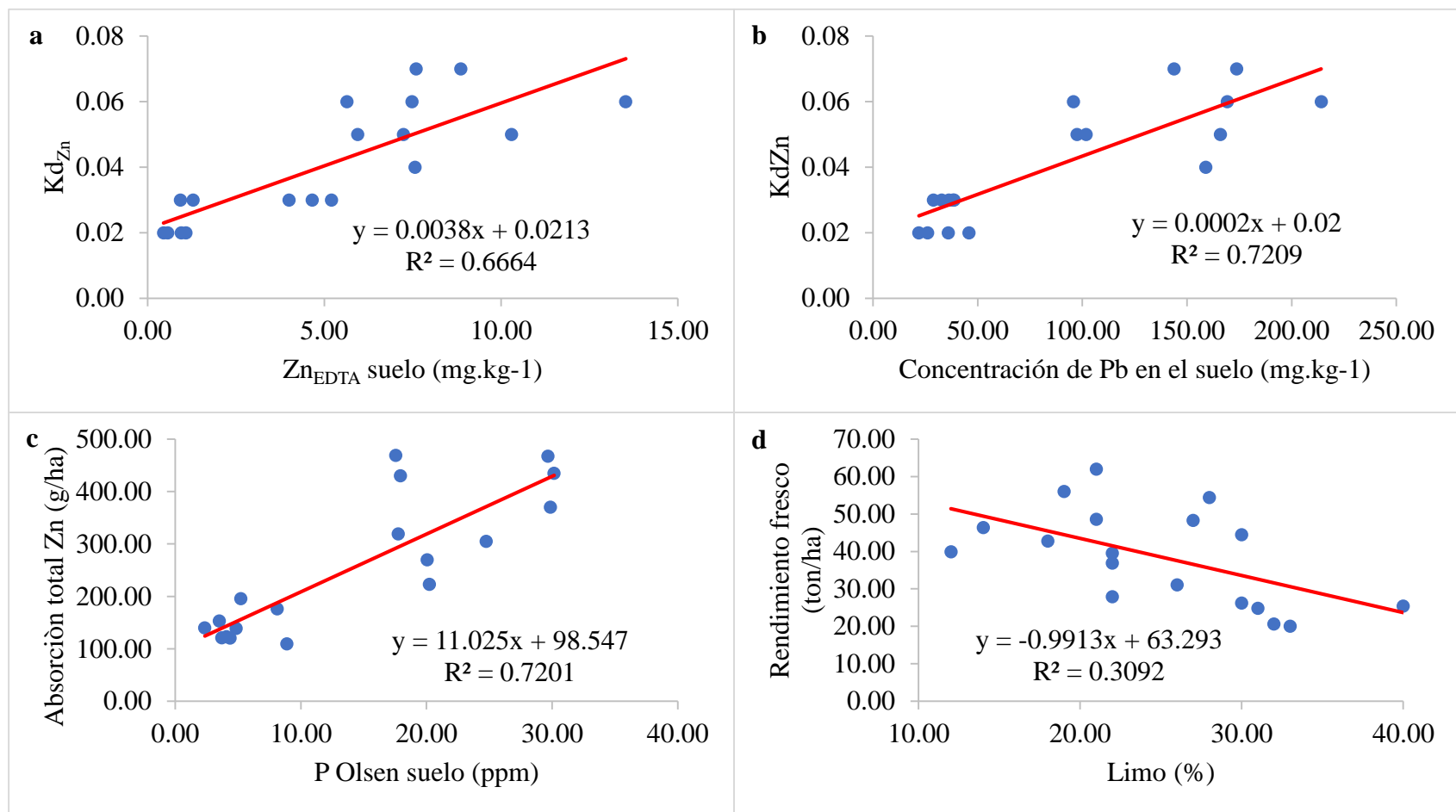


Figura 33. a) Influencia de la concentración de Zn_{EDTA} en el suelo sobre el Kd_{Zn} ; b) Influencia de la concentración de Pb en el suelo sobre el Kd_{Zn} ; c) Influencia del contenido de P Olsen en el suelo sobre la absorción total de Zn y d) Influencia del porcentaje de limo en el suelo sobre el rendimiento fresco.

Modelos de predicción con regresión lineal múltiple

Se realizó la selección de variables con regresión lineal múltiple backward, forward y stepwise para crear modelos con las variables más significativas, a los valores residuales se le hizo el test de Shapiro Wilk para determinar la normalidad. En la Tabla 43 se muestran los modelos de regresión para predecir ETs en partes vegetales basada en la concentración de ETs y las propiedades fisicoquímicas de los suelos. Los modelos mostrados en la tabla son producto de RLM stepwise.

Tabla 43. Modelos de regresión para predecir ETs en tejidos vegetales basado en la concentración de ETs y otras propiedades fisicoquímicas de los suelos.

n	Modelo de regresión	R ² / p-valor	p-valor Test SW*
18	$Pb_{raíz} = 62,2 - 5,98MO + 13,52CE + 0,032Pb_{suelo} - 0,248Arcilla$	0,9029 / <0,001	0,9317
18	$Pb_{tub} = 12,2 - 0,015Zn_{suelo} + 0,652Al^{3+}H^+$	0,2902 / 0,03	0,3440
18	$Cu_{raíz} = 7,40 + 0,122Cu_{suelo} - 1,42Na^+ - 0,12Limo + 4,44CE + 0,149CIC + 0,171Zn_{EDTA}$	0,9439 / <0,001	0,7173
18	$Cu_{tub} = -2,09 + 0,122Cu_{suelo} + 1,34 Al^{3+}H^+ + 0,820MO$	0,7993 / <0,001	0,6531
18	$Zn_{raíz} = 177,9 + 3,89P_{Olsen} + 170,0CE - 31,6pH$	0,8453 / <0,001	0,9699
18	$Zn_{tub} = 0,511 + 0,343P_{Olsen} + 0,030Zn_{suelo} + 10,44CE + 1,81K^+$	0,9446 / <0,001	0,6516
18	$Ab_{total Pb} = 74,6 - 0,538Zn_{suelo} + 2,16Arena + 92,4CE$	0,5910 / <0,01	0,1947
18	$Ab_{total Cu} = 27,9 + 15,3Al^{3+}H^+ + 17,8Mg^{2+} - 6,03Na^+$	0,5536 / <0,01	0,2111
18	$Ab_{total Zn} = 303,7 + 12,5P_{Olsen} - 1,23Zn_{suelo} + 0,813Pb_{suelo} + 266,9CE + 3,05Arena$	0,9267 / <0,001	0,9344
18	$Rend_{fresco} = 94,9 - 0,130Zn_{suelo} + 0,507Arena - 0,551Cu_{suelo} - 11,2MO + 26,7CE$	0,7918 / <0,01	0,4770

*Test de Shapiro Wilk para los residuales del modelo.

Se obtuvieron modelos de regresión para predecir la concentración de Pb, Cu y Zn en la raíz y también en el tubérculo de papa. Además, también se presentan modelos de predicción para la absorción total por la planta de papa de Pb, Cu y Zn. Finalmente se presenta también un modelo de predicción para el rendimiento fresco de la papa.

La variable explicativa más importante para el modelo de regresión de la concentración de Pb en la raíz fue el contenido de MO en el suelo, sin embargo, también hay influencia de otras variables tales como la CE, la concentración de Pb en el suelo e incluso el porcentaje de arcilla. La concentración de Zn en el suelo fue la variable explicativa más importante para el modelo de regresión de Pb en el tubérculo y también tuvo influencia de la acidez intercambiable. El Cu en el suelo fue la variable explicativa más importante para los modelos de regresión para la predicción de Cu en tejidos vegetales, tanto para la raíz como para el tubérculo; en ambos casos también tuvieron influencia otras propiedades del suelo. Para el modelo de predicción de Zn en las partes vegetales (raíz y tubérculo) el contenido de P Olsen en el suelo fue la variable explicativa más importante; además, hubo influencia de la CE y el pH para la predicción de Cu en la raíz y Zn en el suelo, CE y K de intercambio para la predicción de Cu en el tubérculo.

Los modelos de regresión para la predicción de la absorción total de Pb, Cu y Zn tuvieron a como variables explicativas más importantes a la concentración de Zn en el suelo, acidez intercambiable y contenido de P Olsen respectivamente. El porcentaje de arena y la CE también tuvieron influencia en los modelos de predicción de Pb y Zn. Finalmente, el modelo de regresión para la predicción del rendimiento fresco de papa tuvo como variables explicativas más importante a la concentración de Zn en el suelo y al porcentaje de arena en el suelo.

Path Analysis de las variables de planta con variables del suelo

Se realizó PA para las variables suelo y planta que presentaban correlación significativa, además se agregó variables de suelo que según la literatura tienen influencia sobre las variables analizadas en planta. Así, se realizó el PA para el BCF_{Pb} en función de de pH del suelo, contenido de materia orgánica, concentración de Pb en el suelo y concentración de Zn_{EDTA} en el suelo (Figura 34), en este análisis el mayor efecto directo es de la concentración de Pb en el suelo ($-0,92$, $p<0,01$).

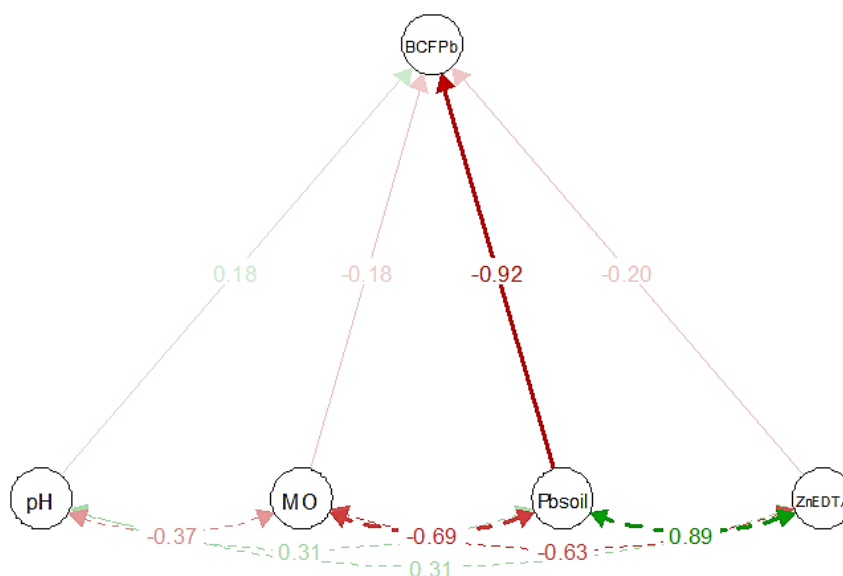


Figura 34. Análisis de ruta que muestra el efecto directo e indirecto que algunas variables del suelo tienen en el BCF_{Pb} .

Para el BCF_{Cu} se realizó el PA en función del pH, contenido de materia orgánica, concentración de Cu en el suelo, conductividad eléctrica y acidez intercambiable ($AcInt$) (Figura 35). En este caso hubo efecto directo significativo con la acidez intercambiable ($0,47$, $p<0,01$), con la concentración de Cu en el suelo ($-0,40$, $p=0,04$), con el pH ($0,33$, $p<0,01$) y con la CE ($-0,21$, $p=0,047$). En la Figura 36 se muestra el PA del BCF_{Zn} en función del contenido de materia orgánica, concentración de Pb en el suelo, concentración de Zn_{EDTA} , CIC y pH. El efecto directo significativo fue el del Zn_{EDTA} ($-0,84$, $p=0,02$).

Se realizó también el PA para la concentración de Pb en la raíz de la papa (Figura 37) en función del contenido de materia orgánica, concentración de Pb en el suelo, concentración de Zn en el suelo, concentración de Zn_{EDTA} en el suelo y conductividad eléctrica. En este caso los efectos directos significativos fueron de la MO (-0,41, p<0,01) y el contenido del Pb en el suelo (0,64, p<0,01). En la Figura 38 se muestra el PA de la concentración de Cu en la raíz de la papa en función del pH, contenido de materia orgánica, Concentración de Cu en el suelo, contenido de P Olsen y CIC. Los efectos directos significativos para esta variable de planta fueron el Cu en el suelo (0,46, p=0,02) y el contenido de MO (-0,45, p=0,02). El PA de la concentración de Zn en la raíz se realizó en función del contenido de P Olsen, la concentración de ZnEDTA en el suelo, pH y CIC (Figura 39). Para este caso los efectos directos significativos fueron del Zn_{EDTA} (0,48, p<0,01) y el pH (-0,45, p<0,01).

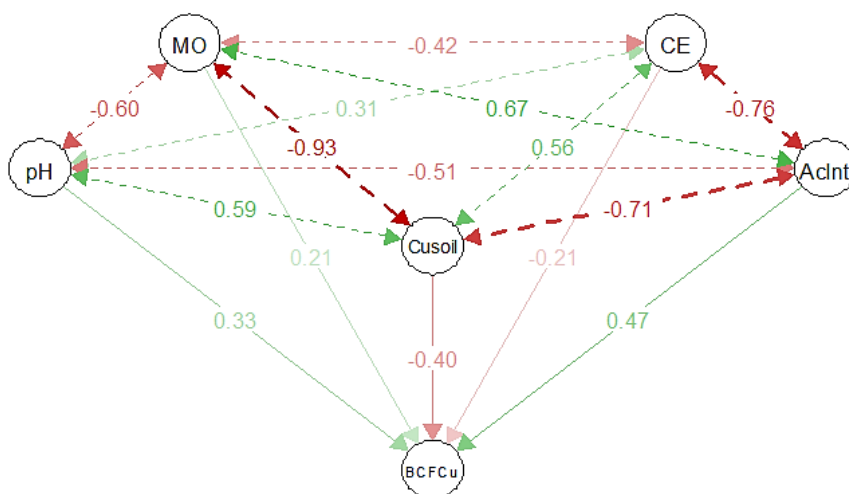


Figura 35. Análisis de ruta que muestra el efecto directo e indirecto que algunas variables del suelo tienen en el BCF_{Cu}.

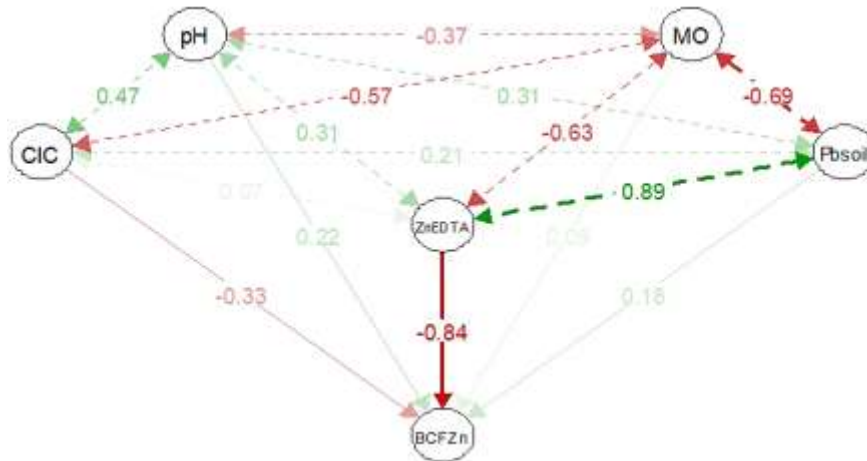


Figura 36. Análisis de ruta que muestra el efecto directo e indirecto que algunas variables del suelo tienen en el BCF_{Zn} .

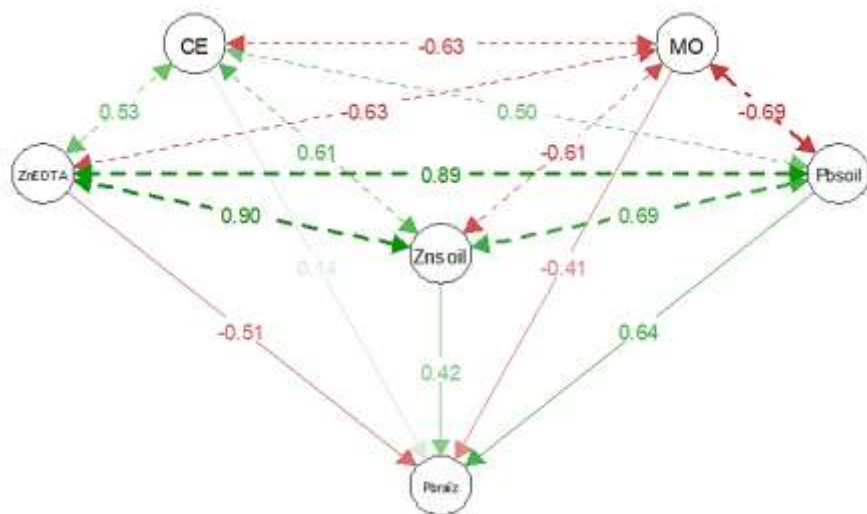


Figura 37. Análisis de ruta que muestra el efecto directo e indirecto que algunas variables del suelo tienen en el $Pb_{raíz}$.

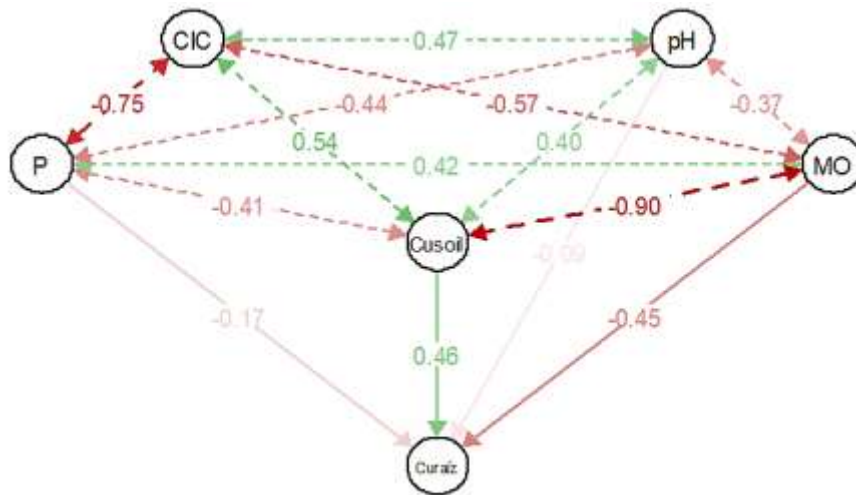


Figura 38. Análisis de ruta que muestra el efecto directo e indirecto que algunas variables del suelo tienen en el Cu_{raíz}.

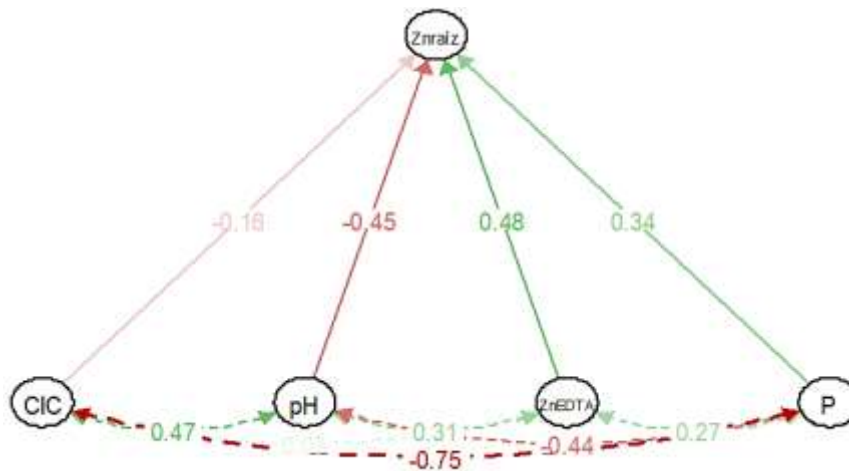


Figura 39. Análisis de ruta que muestra el efecto directo e indirecto que algunas variables del suelo tienen en el Zn_{raíz}.

Se realizó también el PA para la concentración de Zn en el tubérculo (Figura 40), en este caso estuvo en función de la concentración de Zn en el suelo, pH, contenido de P Olsen, y CICE. Los efectos directos significativos fueron del Zn en el suelo (0,64, $p<0,01$) y del P Olsen (0,57, $p>0,01$).

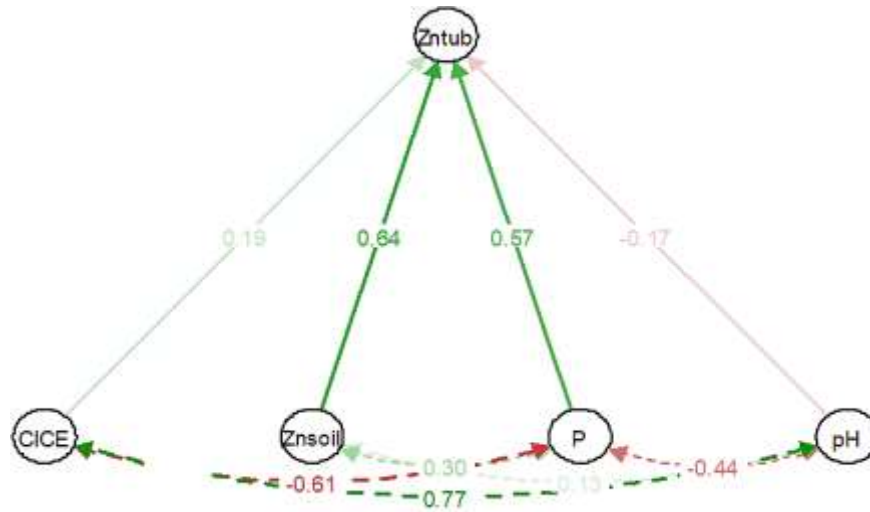


Figura 40. Análisis de ruta que muestra el efecto directo e indirecto que algunas variables del suelo tienen en el Zn_{tub} .

En las Figuras 41, 42 y 43 se muestran los PA de la absorción total de los ETs. El PA para la absorción total para Pb en la planta se realizó en función del contenido de arena, Pb en el suelo, Zn en el suelo y contenido de MO; resultando con efectos directos significativos la arena (0,43, $p=0,02$) y el Zn suelo (-0,76, $p<0,01$). Por su parte el PA para la absorción total de Cu en la planta de papa se realizó en función del Pb en el suelo, Cu en el suelo, acidez intercambiable, contenido de arena y P Olsen; en este caso los efectos directos significativos fueron de la acidez de intercambio (0,53, $p=0,01$), contenido de arena (0,41, $p=0,03$) y P Olsen (-0,37, $p=0,03$). Finalmente, el PA de la absorción total de Zn por la planta de papa se hizo en función del contenido de P Olsen, contenido de arena, Zn_{EDTA} y pH. Los efectos directos significativos para esta variable fueron el P Olsen (0,57, $p<0,01$), arena (0,44, $p<0,01$) y Zn_{EDTA} (0,23, $p=0,03$).

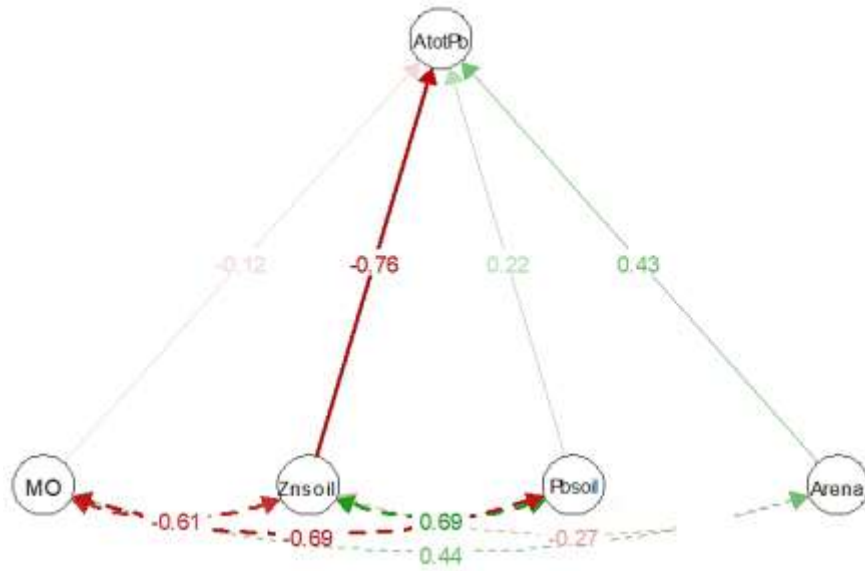


Figura 41. Análisis de ruta que muestra el efecto directo e indirecto que algunas variables del suelo tienen en la Absorción total de Pb por la planta de papa.

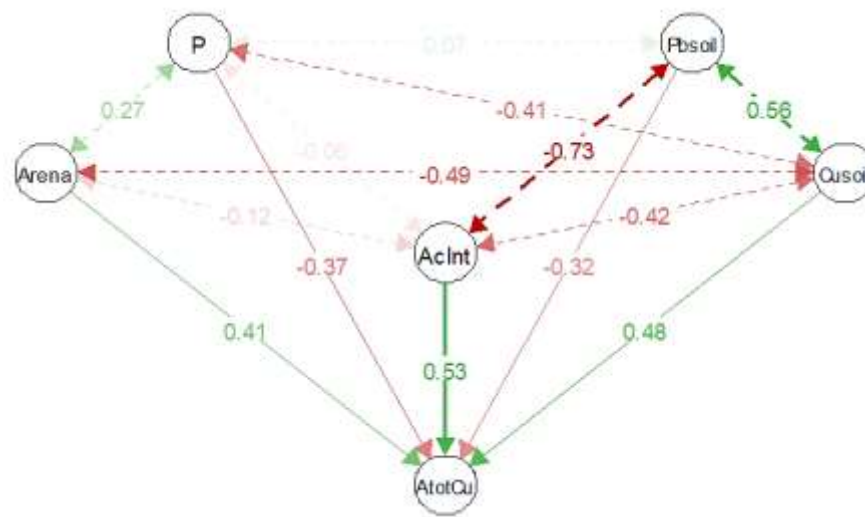


Figura 42. Análisis de ruta que muestra el efecto directo e indirecto que algunas variables del suelo tienen en la Absorción total de Cu por la planta de papa.

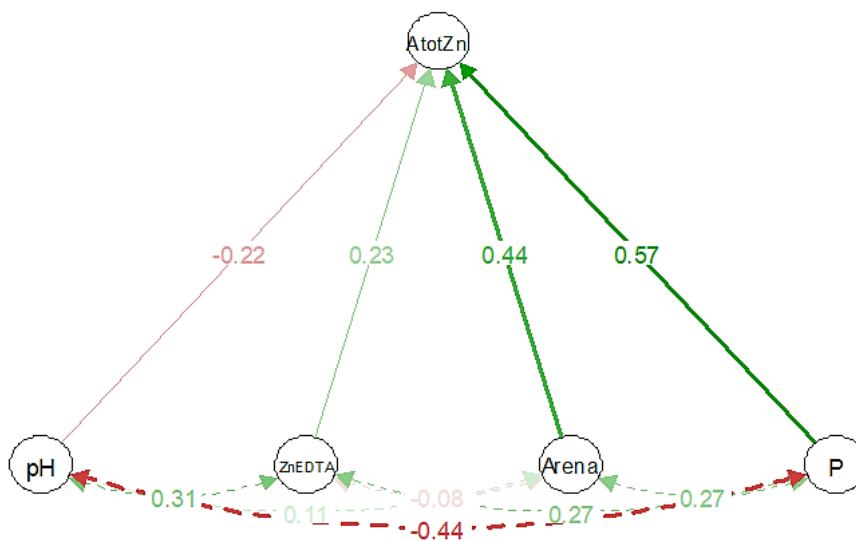


Figura 43. Análisis de ruta que muestra el efecto directo e indirecto que algunas variables del suelo tienen en la Absorción total de Zn por la planta de papa.

También se realizó PA para el rendimiento fresco de la papa (Figura 44) en función del contenido de MO, pH, contenido de arena y calcio de intercambio. Los efectos directos siendo significativo únicamente el contenido de arena (0,44, $p=0,04$).

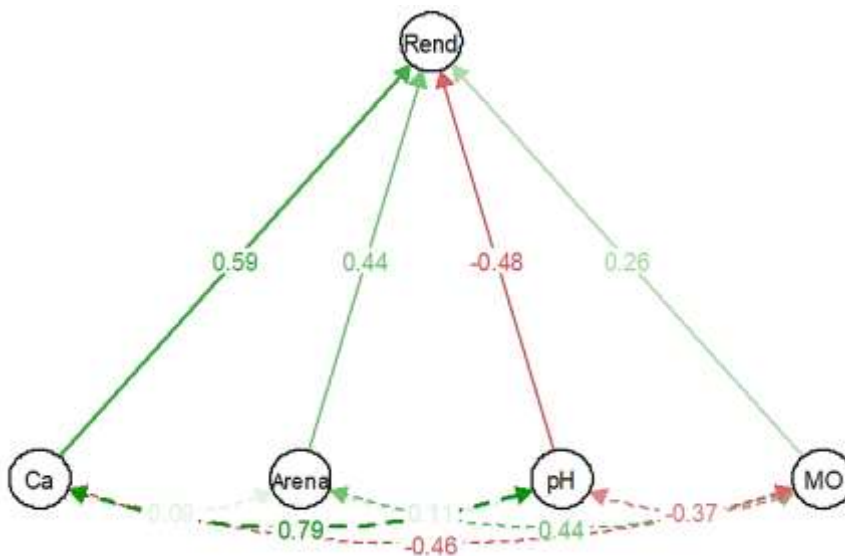


Figura 44. Análisis de ruta que muestra el efecto directo e indirecto que algunas variables del suelo tienen en el rendimiento fresco de papa.

3.3. Fase III: Objetivo específico 3

Propuesta de desarrollo sustentable para el cultivo de papa en la región Amazonas

Se analizó la situación inicial del cultivo de papa en la región Amazonas desde la perspectiva de la investigación, para luego dar alternativas como una propuesta de desarrollo sustentable para el cultivo de papa. La propuesta está enfocada en el mejoramiento y conservación de la fertilidad y productividad del suelo. De esta manera se realizó la aplicación de un instrumento de recolección de datos a 40 agricultores de papa de la región Amazonas de las provincias de Luya y Chachapoyas. Los resultados resumidos se muestran en la Tabla 44.

3.3.1. Resultados de la aplicación del instrumento de recolección de datos

Áreas de cultivo

Las áreas de sistemas de cultivo de papa en la región Amazonas son generalmente menores a una hectárea, según nuestros resultados éstas representan el 85 %. Áreas entre una a tres hectáreas representan el 5 %, también áreas entre tres a 5 hectáreas y mayores a 5 hectáreas representan el 5 % cada una (Figura 45).

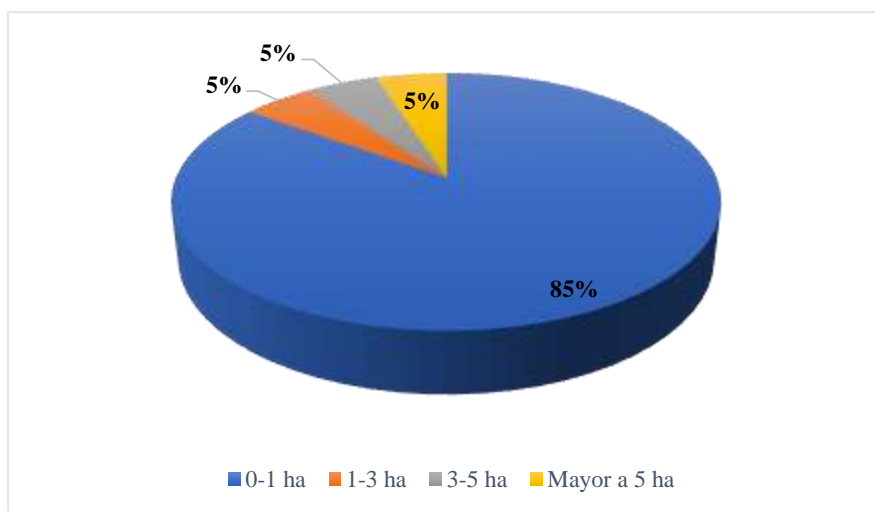


Figura 45. Porcentaje de áreas de cultivo de papa en la región Amazonas, 2020.

Variedades de papa cultivadas en la región Amazonas

Entre las variedades de papa que se cultivan en la región Amazonas destacan: “huayro, blanca, amarilla, yungay, única, huamantanga, amarilis, lima, canchán y suela”. Predominando sobre todas ellas la variedad huayro (papa INIA 323 - huayro amazonense), pues es la que se siembra en mayores áreas, esto debido a que, según los agricultores, es la más comercial. Sin embargo, es importante aclarar que según las localidades las variedades cultivadas como máximo son dos, predominando siempre una de ellas para el tema comercial y la variedad restante se cultiva con fines de alimentación para los agricultores.

Fertilizantes utilizados en el cultivo de papa

Los fertilizantes utilizados ya se describieron en la fase I de la investigación. Así, se determinó el uso de una mezcla física comercial de cuatro fertilizantes inorgánicos la cual ya vienen previamente acondicionada para el cultivo de papa. Los agricultores a esta mezcla de fertilizantes le denominan “fertilizante químico”. Y se usa de cierta manera de forma obligatoria, ya que, según su experiencia, si no se utilizan se obtienen rendimientos muy bajos, lo cual ya no sería económicamente beneficioso. La mezcla de fertilizantes está constituida por urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), fosfato di amónico ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$), cloruro de potasio (KCl) y sulfato doble de potasio y magnesio ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4$). Además, del total de agricultores, el 23 % respondió que además del fertilizante inorgánico, en algunas ocasiones también están utilizando fertilizantes orgánicos, como la gallinaza. Este fertilizante de naturaleza orgánica a diferencia del fertilizante inorgánico, una aplicación se realiza para varias temporadas.

Dosis de fertilización

Tal como se especificó en la fase I de la investigación, las dosis de fertilización inorgánica utilizadas varían según el uso del suelo o según la experiencia del agricultor. Por ejemplo, es determinante si el suelo se va a cultivar por primera vez o el suelo no ha sido cultivado por un largo periodo; en este caso el uso de fertilizantes es menor. Por el contrario, si el suelo ya se viene utilizando para cultivos, la dosis será mayor. Basado en la experiencia del agricultor

las dosis son muy relativas y difiere para cada agricultor. En resumen, según la información recabada de los agricultores encuestados, la dosis mínima que se utiliza es de 500 kg de fertilizante/hectárea y como máximo la dosis de 1500 kg/hectárea.

Rendimiento de la papa

Esta investigación ha tomado como variedad de estudio la variedad “huayro”, por lo que a los agricultores encuestados se les consultó sobre el rendimiento de esta variedad. Es importante destacar que los rendimientos se ven influenciados por muchos factores tales como la calidad del suelo, la cantidad de fertilizante utilizado, la calidad de la semilla, uso de plaguicidas, además de los factores climáticos. Según nuestros resultados en la región Amazonas el rendimiento teórico según los agricultores de la variedad “huayro” es en promedio 18,8 toneladas/hectárea. Teniendo la provincia de Luya un rendimiento promedio de 19,85 toneladas/hectárea (rango: 12-30 toneladas/hectárea); en el caso de la provincia de Chachapoyas el rendimiento promedio fue de 17,75 toneladas/hectárea (rango: 10-20 toneladas/hectárea).

Análisis de fertilidad de suelos

Consultados sobre si antes de realizar la siembra de cultivo de papa, realizan un análisis de fertilidad de suelos. El 92,5 % de los encuestados respondió que nunca ha realizado este tipo de análisis. Un 7,5 % de encuestados respondió haber realizado al menos una vez un análisis de fertilidad de suelo previo a la siembra del cultivo de papa, pero no por iniciativa propia sino porque había algún programa del Estado para realizar dicho análisis (Figura 46). Los agricultores encuestados comentaron que la fertilización se realiza de manera empírica en base a la experiencia de cada uno de ellos, sin ningún apoyo técnico. Sin embargo, el 100 % de los agricultores encuestados mostró predisposición por realizar este tipo de análisis y formar parte de la investigación.

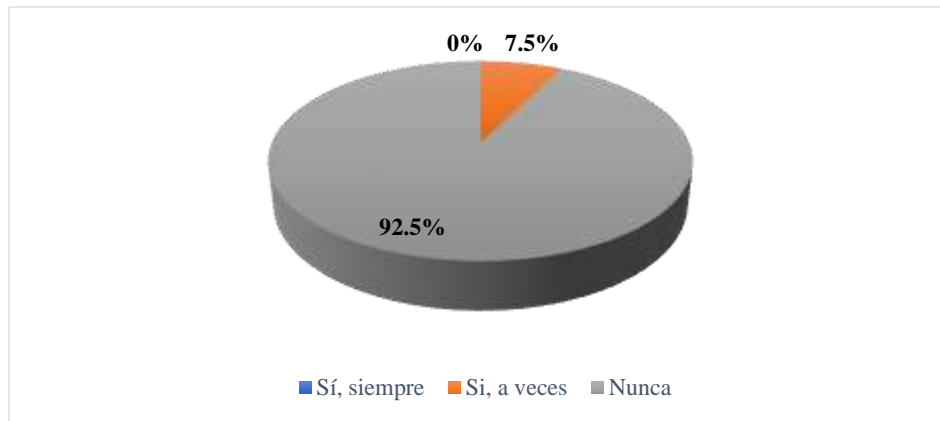


Figura 46. Porcentaje de agricultores consultados si realizan un análisis de suelo previo a la siembra.

Conocimiento sobre elementos traza de los agricultores

El conocimiento respecto de los ETs y su ingreso a los suelos de cultivo a través de la fertilización, por parte de los agricultores es muy bajo. Si bien entienden que la aplicación excesiva de estos insumos podría causar algún daño al suelo, el 77,5 % de los encuestados no comprende que la presencia de ETs podrían originar muchos otros problemas. El 90 % de agricultores no tenía conocimiento que los fertilizantes inorgánicos tienen generalmente concentraciones de ETs, lo cual no se advierte en las fichas técnicas de ninguno de los fertilizantes utilizados.

Tabla 44. *Resumen de la aplicación de instrumento de recolección de datos a agricultores de papa en la región Amazonas.*

Ítem	Indicador	Situación encontrada
1	Áreas de cultivo	Áreas menores a 1 ha (85 % de encuestados), monocultivo.
2	Variedades de papa	Hasta 10 variedades. Predomina la variedad Huayro por ser más comercial.
3	Naturaleza de los fertilizantes utilizados	El 100 % de los encuestados utilizan una mezcla comercial de fertilizantes inorgánicos. El 23 % del total alguna vez ha utilizado gallinaza (naturaleza orgánica) adicionalmente.
4	Dosis de fertilización	Dosis variables generalmente en función a la experiencia del agricultor.
5	Rendimiento del cultivo	18.8 toneladas/ha (variedad huayro)
6	Análisis de suelos	Generalmente no se realiza (92,5 % de encuestados).
7	Conocimiento sobre ETs	Desconocimiento en el 90 % de los encuestados.

3.3.2. Alternativas para la sustentabilidad del cultivo de papa en la región Amazonas

Las alternativas para la sustentabilidad del cultivo de papa en la región Amazonas están en función a los hallazgos de esta investigación y orientados al mejoramiento y conservación de la fertilidad y productividad del suelo.

Análisis de fertilización previo al cultivo

Como se determinó en esta investigación, los agricultores de papa en la región Amazonas no realizan un análisis de fertilidad de suelos previo a la siembra del cultivo. El análisis de fertilidad de suelos es determinante para la toma de decisiones en el manejo racional y eficiente de la fertilidad, con mayor razón si se trata del cultivo de papa que tienen alta exigencia de nutrientes (Gómez, 2005).

Un objetivo prioritario de la agricultura debe ser preservar la fertilidad de los suelos, no solo en el presente sino también de cara al futuro. En ese sentido el análisis de los suelos agrícolas y la interpretación de los mismos, se convierten en una herramienta de vital importancia para la aplicación de nutrientes a través de fertilizantes(Johnston y Fellow, 2005).

El agricultor tiene que cambiar la concepción respecto de análisis de fertilidad de suelo, teniendo en cuenta que a la larga esto no representa un gasto más, sino por el contrario representa una inversión. Por lo que es necesario realizar un análisis de fertilidad de suelos siempre antes de la siembra, teniendo en cuenta que la toma de muestras tiene que ser acorde al área de siembra y siguiendo los protocolos de muestreo recomendados por los laboratorios. Los análisis de suelo también permiten conocer otras propiedades además de los requerimientos nutricionales de los suelos, como por ejemplo el pH y la CIC, que son determinantes también en el rendimiento del cultivo. Si el pH no es el óptimo para el cultivo de papa, será necesaria una corrección. Si la CIC tiene niveles bajos, la fertilización que se realice no estará disponible para las plantas y se perderá por lixiviación.

Esta alternativa favorece económicamente al agricultor ya que al agregar la dosis correcta de fertilización se reducirán los costos en los casos que se hubiese fertilizado en exceso, por otro lado, si la dosis de fertilización sería insuficiente, esto se traducirá en un mejor rendimiento del cultivo y por lo tanto mayores ingresos. También esta alternativa tiene enfoque ambiental, pues contribuye a la conservación del recurso suelo.

Uso de fertilizantes con bajas concentraciones de ETs y uso de fertilizantes orgánicos

Se hace necesario el uso de fertilizantes con concentraciones mínimas de ETs, estas fuentes de nutrientes tienen que ser más amigables con el sistema suelo, pues no deberían contribuir a la degradación de este. En ese sentido, el uso de fertilizantes de naturaleza orgánica como la gallinaza se convierte en una necesidad de cara a la sustentabilidad. Si bien es cierto, ya se viene utilizando esta fuente de nutrientes en la región Amazonas, su uso aún no es una real alternativa y además es poco llamativo a pesar de la cantidad de nutrientes que aporta. Está

demostrado que el cultivo de papa responde de manera favorable al uso de los fertilizantes orgánicos, recomendándose su aplicación tres meses antes de la siembra (INIA, 2013).

Esta alternativa tiene un enfoque ambiental ya que reducirá el impacto de los fertilizantes inorgánicos en el suelo. Además, también tiene un enfoque económico, pues representará una disminución en el costo de total del cultivo de papa, esto debido a que los precios de los fertilizantes inorgánicos son elevados comparados con los fertilizantes de naturaleza orgánica. A esta problemática se suma la escasez de los fertilizantes inorgánicos debido al contexto mundial, que ha obligado a países productores a reducir su producción (Gestión, 2022; Wayka, 2022).

Rotación de cultivos

Generalmente en los suelos de cultivo de papa de la región Amazonas, se utiliza el sistema de monocultivo. La rotación de cultivos tiene múltiples beneficios comparada con los sistemas de monocultivo. Por lo que esta alternativa se hace necesaria de cara a la sustentabilidad de la agricultura en la región Amazonas. Las ventajas de las rotaciones de cultivo son: diversificación de riesgos productivos y económicos; control facilitado de malezas, insectos y enfermedades; incremento de los rendimientos y mejoramiento de las propiedades del suelo (Ferrari, 2010). Es necesario evaluar con la ayuda de personal capacitado las alternativas para la rotación de cultivos en las provincias de Luya y Chachapoyas, de tal manera que contribuyan a la sustentabilidad de la agricultura.

IV. DISCUSIONES

4.1. Elementos traza en fertilizantes

La concentración de ETs en fertilizantes para el cultivo de papa en la región Amazonas se comparó con estándares internacionales de fertilizantes, toda vez que en Perú no existe normativa aplicable. La inexistencia de normativa aplicable a la concentración de ETs potencialmente contaminantes en fertilizantes, representa de cierta forma una debilidad de cara a la fiscalización de estos productos, los cuáles se podrían comercializar sin conocer el contenido de ETs, ello podría representar un problema a largo plazo para la agricultura, el ambiente y por ende la salud de las personas.

Los fertilizantes utilizados para cultivo de papa en la región Amazonas fueron cuatro de naturaleza inorgánica, los cuales ya vienen listos en una mezcla comercial. Al analizar estos fertilizantes las concentraciones de Cd y Plomo estuvieron por debajo de los límites establecidos en la normativa de diferentes países (Tabla 45). De los cuatro fertilizantes inorgánicos analizados, el fertilizante fosforado (fosfato diamónico) es el que presentó concentraciones de Cd ($3,02 \text{ mg kg}^{-1}$), los demás fertilizantes estuvieron por debajo del límite de detección para este ET. Si bien, solo se analizó un fertilizante de naturaleza fosforada, por ser el único utilizado en la región Amazonas para el cultivo de papa, los resultados concuerdan con otras investigaciones en las que este tipo de fertilizante tienen mayores concentraciones de Cd (Latifi y Jalali, 2018; Molina et al., 2009; Nziguheba y Smolders, 2008). Esto puede deberse a que este tipo de fertilizantes tienen como materia prima a la roca fosfórica, mineral que generalmente las concentraciones de ET son mayores a las encontradas en la corteza terrestre (Kratz et al., 2016; McBride y Spiers, 2001). Los fertilizantes fosforados son considerados una de las principales fuentes difusas de contaminación por ETs en suelos de cultivo (McLaughlin et al., 1996).

En el caso de fertilizantes orgánicos el Ministerio de Agricultura y Áreas Rurales de la República Popular de China establece en el Estándar Nacional Chino de Fertilizantes Orgánicos (MOA, 2012), el cual especifica un límite máximo de Cd de 3 mg kg^{-1} y un límite máximo de Pb de 50 mg kg^{-1} . El fertilizante orgánico denominado gallinaza, el cual es

utilizado de manera esporádica por los agricultores en la región Amazonas para el cultivo de papa, cumple esta normativa, ya que según los resultados no se evidenciaron concentraciones ni de Cd ni de Pb (concentraciones por debajo del límite de detección).

Las concentraciones de Cu y Zn en el fertilizante orgánico gallinaza superan ampliamente a las concentraciones encontradas en los cuatro fertilizantes inorgánicos analizados. Sin embargo, estos elementos no tienen la misma connotación que el Cd y Pb, ya que son considerados micronutrientes. Sin embargo, la normativa del Parlamento Europeo (2016), considera límites para el Cu y el Zn, 200 mg kg⁻¹ y 600 mg kg⁻¹ respectivamente. De esta manera si comparamos los resultados de la gallinaza, las concentraciones estarían dentro de los límites establecidos. Es importante aclarar que este fertilizante orgánico no tiene un uso común entre los agricultores de la región Amazonas, y los que lo utilizan lo hacen de manera complementaria a la fertilización inorgánica, además que se agrega una vez para varias temporadas.

Tabla 45. *Normativa aplicable a fertilizantes para la concentración de Cd y Pb.*

País	Límite establecido	Normativa	Referencia
Australia	131 mg Cd.kgP ₂ O ₅ ⁻¹ 100 mg Pb.kg ⁻¹	Código Nacional de Fertilizer Prácticas para la Descripción y Etiquetado de Fertilizantes.	Australia (2018)
China	10 mg Cd.kgP ₂ O ₅ ⁻¹	Normativa para fertilizantes fosforados de la Agencia de Protección Ambiental de China.	Li et al. (2020)
Alemania	50 mg Cd.kgP ₂ O ₅ ⁻¹ 150 mg Pb.kg ⁻¹	Ordenanza sobre fertilizantes.	DüMV (2012)
Europa	60 mg Cd.kgP ₂ O ₅ ⁻¹ 150 mg Pb.kg ⁻¹	Normas sobre la comercialización de fertilizantes con el mercado CE.	European Parliament (2016)
Brasil	4.0 mg Cd.kg ⁻¹ %P ₂ O ₅ ⁻¹ 20.0 mg Pb.kg ⁻¹ %P ₂ O ₅ ⁻¹	Instrucción Normativa SDA n° 27 de 05/06/2006/ SDA	MAPA (2006)

4.2. Propiedades fisicoquímicas de los suelos para cultivo de papa en la región Amazonas

El pH de los suelos de cultivo de papa en la región Amazonas fue moderadamente ácido ($5,9 \pm 0,9$ en promedio) según la Norma Oficial Mexicana: fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis (SEMARNAT, 2002). La papa se cultiva en rangos de pH de 5,0-7,0 (INTAGRI, 2017), 5,5-6,0 (Chila et al., 2017), en ese sentido, los suelos analizados son adecuados para este cultivo. En los casos que los valores de pH estén fuera del rango, se tendría que realizar una corrección de pH según corresponda. Respecto a la CE el promedio en los suelos analizados fue de 0,12 dS/m ($\pm 0,1$), y según la Norma Oficial Mexicana esto corresponde a un suelo con efectos despreciables de salinidad. Los suelos analizados de acuerdo a la CE son aptos también para el cultivo de papa, ya que este cultivo se desarrolla en suelos con una conductividad menor a 4,0 dS/m (INTAGRI, 2017).

Tomando como referencia la Norma Oficial Mexicana los suelos analizados tendrían un nivel bajo de contenido de materia orgánica ($5,9 \% \pm 1,2$ en promedio). Sin embargo, ello sería suficiente para el cultivo de papa; ya que la materia orgánica en los suelos para este cultivo se recomienda que debe ser mayor a 3,5 % (INTAGRI, 2017). Sin embargo, es importante tener en cuenta que la mejorar la calidad y cantidad de la materia orgánica en el suelo podría ser determinante para mejorar el rendimiento de este cultivo (Cambouris et al., 2006; Zebarth et al., 2022). Respecto al contenido de P-Olsen (en promedio $29,3 \text{ ppm} \pm 24,1$), según la Norma Oficial Mexicana los suelos analizados se clasificarían como suelos con alto contenido de este nutriente. Niveles altos de P disponible en el suelo son ideales para el crecimiento de microorganismos que favorecen la solubilización y movilización del fósforo, mejorando su disponibilidad para las plantas (Rodríguez, 2005). En Chile y en suelos volcánicos se ha reportado que los niveles de P-Olsen y de K intercambiable considerados como suficientes en el suelo para alcanzar rendimiento potencial son 33 mg kg^{-1} y 224 mg kg^{-1} , respectivamente (Sandaña et al., 2018; Sandaña et al., 2020)

La CIC en los suelos analizados (en promedio $16,8 \pm 9,1$ meq/100g) fue media según la Norma Oficial Mexicana (SEMARNAT, 2002), esto podría ser una desventaja para el cultivo de papa, ya que la CIC está directamente relacionada con la capacidad de los suelos para retener nutrientes y con la disponibilidad de los mismos. La CIC se relaciona con propiedades como el pH, materia orgánica y arcilla, ya que si el suelo tiene más cargas negativas tendrá entonces mayor capacidad de almacenar e intercambiar cationes (Bueno y Fernández, 2019; Estrada et al., 2017) y por lo tanto también influye en el rendimiento del cultivo de papa (De Haan et al., 1999). Como podemos ver esta propiedad es determinante, ya que como sabemos en el cultivo de papa se hace uso de fertilizantes inorgánicos, lo cual podría ser ineficiente si la CIC no es la adecuada como en este caso.

La papa es un cultivo que crece en la mayoría de los suelos, pero es recomendable suelos con poca resistencia al crecimiento de los tubérculos, por lo que los mejores suelos serían francos, franco arenosos, franco limosos y franco arcillosos (INTAGRI, 2017). Los suelos analizados estarían acorde a este parámetro, ya que en su mayoría (60 %) se clasificaron como francos arenosos. Investigaciones han demostrado que la textura del suelo también puede influir en el rendimiento del cultivo de papa (Po et al., 2010; Redulla et al., 2002).

4.3. Elementos traza en suelos de cultivo de papa

Según los resultados de esta investigación en los 40 suelos analizados los ETs siguen la secuencia $Zn > Pb > Cu > Cd$ con respecto a la concentración. Por su parte Khan et al. (2017) reporta la secuencia de concentraciones $Pb > Cu > Zn$. Peng et al. (2018) en suelos de China reportó la siguiente secuencia de concentraciones $Zn > Cu > Pb > Cd$. Los niveles de concentración para los ETs dependerán de las características propias de cada lugar y además de las diversas fuentes antropogénicas.

El valor promedio de Cd en suelos en el mundo es de $0,41 \text{ mg kg}^{-1}$ (Kabata-Pendias, 2010), en promedio la concentración de Cd ($0,2 \text{ mg kg}^{-1}$) de los 40 suelos analizados estuvieron por debajo de este valor. Siete de los 40 suelos analizados tuvieron concentraciones de Cd, de los cuales tres superaron los estándares de calidad ambiental para suelo (ECA-suelo) del

Ministerio de Ambiente de Perú (MINAM, 2017), cuyo límite para suelo de uso agrícola es de $1,4 \text{ mg kg}^{-1}$. Este valor límite también es considerado por la Guía Canadiense de calidad ambiental para suelos (CCME, 2019).

El valor promedio de la concentración de Pb en los suelos de cultivo de papa analizados fue de $110,2 \text{ mg kg}^{-1}$, valor que supera el promedio mundial en suelos que según Kabata-Pendias (2010) es de $27,0 \text{ mg kg}^{-1}$ y según Ure y Berrow (1982) $29,2 \text{ mg kg}^{-1}$. El rango de concentración de este elemento en los suelos analizados fue de $< \text{L.D.} - 623,5 \text{ mg kg}^{-1}$, que está dentro del rango promedio para suelos a nivel mundial, que según Ure y Berrow (1982) es de $< 1 - 888,0 \text{ mg kg}^{-1}$. Los resultados de esta investigación para Pb en el suelo están en un rango mayor a los encontrados por Orellana et al. (2020) en la región Junín de Perú, por Khan et al. (2017) en Pakistán y por Musilova et al. (2017) en Eslovaquia. Para este elemento la concentración promedio supera el valor establecido en el ECA suelo que establece una concentración de $70,0 \text{ mg kg}^{-1}$ para suelos de uso agrícola. Los suelos analizados que superan esta normativa representaron el 42,5 %. Del mismo modo que en el caso del Cd, para el Pb la Guía Canadiense de calidad ambiental para suelos (CCME, 2019), también tiene establecido como límite el valor de $70,0 \text{ mg kg}^{-1}$ para suelos de uso agrícola. Concentraciones elevadas de este elemento en suelos puede suponer un riesgo de ingreso a la cadena alimentaria. El consumo de vegetales provenientes de suelos con concentraciones elevadas de Pb, pueden ser la causa de problemas en la salud, sin embargo pocas investigaciones respaldan esto (Attanayake et al., 2014).

El Cu y Zn a diferencia del Pb, son parte de los denominados micronutrientes, estos son elementos que las plantas absorben en cantidades relativamente grandes en las diferentes etapas del cultivo. Estos elementos cumplen importantes funciones estructurales y fisiológicas. Por ejemplo, el Cu es un activador de enzimas, tiene función en la fotosíntesis, tiene función en la etapa reproductiva, función en las enzimas respiratorias, influye en el contenido de azúcar, entre otros. Por su parte el Zn es parte de la formación de hormonas de crecimiento, influye en la formación de semillas y granos, promueve la madurez, influye en la altura de la planta, y también es parte de la síntesis de proteínas (Ronen, 2016).

Las concentraciones de Cu en los suelos de cultivo de papa de la región Amazonas, están en el rango de 4,1 – 74,1 mg kg⁻¹. Resultados similares a las concentraciones de Cu que generalmente hay en suelos de cultivo según Stevenson y Cole (1999) (5 a 60 mg kg⁻¹). En el caso del promedio en los suelos analizados que fue 19,7 mg kg⁻¹ estuvo por debajo del promedio de suelos en el mundo que según Kabata-Pendias (2010) es de 38,9 mg kg⁻¹. Las concentraciones de Cu en los suelos fue mayor a lo reportando por Khan et al. (2017) en Pakistán.

Para el caso del Zn los suelos de cultivo de papa estuvieron en un rango de 7,3 - a 819,5 mg kg⁻¹. Resultados que en algunos casos están muy por encima del rango promedio en suelos (10-300 mg kg⁻¹) según Swaine (1955) y Barak y Helmke (1993). Por su parte el promedio de la concentración de Zn los suelos analizados fue de 180,4 mg kg⁻¹, valor muy por encima del promedio mundial que según Kabata-Pendias (2010) es de 70 mg kg⁻¹. Las concentraciones de Zn en los suelos fue mayor a lo reportando por Orellana et al. (2020) en la región Junín de Perú, por Khan et al. (2017) en Pakistán y por (Sanderson et al., 2019) en Jamaica.

El ECA suelo del MINAM no establece valores para el contenido de Cu y Zn, por lo que se compararon las concentraciones de estos elementos con la Guía Canadiense de Calidad Ambiental para suelos (CCME, 2019), la cual establece el límite de 63 mg kg⁻¹ y 250 mg kg⁻¹ para Cu y Zn respectivamente. Según los resultados de los 40 suelos analizados, únicamente un suelo supera el límite establecido por esta normativa para Cu. Para el caso del Zn, 10 suelos (25,0 %) superan el límite de esta normativa. En la Tabla 46 se muestran límites normativos de otros países, destacando que la normativa más exigente para suelos agrícolas es la del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica de Ecuador (MAATE, 2015).

Tabla 46. Normativa para ETs en suelos agrícolas de diferentes países.

País	Límites (mg kg ⁻¹)	Referencia
Perú	Cd: 1,4 Pb: 70	MINAM (2017)
Ecuador	Cd: 0,5 Pb: 19 Cu: 25 Zn: 60	MAATE (2015)
Chile	Zona norte pH > 6,5 Cd: 2 Pb: 75 Cu: 150 Zn: 175 pH ≤ 6,5 Cd: 1,5 Pb: 50 Cu: 100 Zn: 120 Zona sur pH < 5 Cd: 2 Pb: 50 Cu: 75 Zn: 175	MSGP - SEGPRES (2009)
Canadá	Cd: 1,4 Pb: 70 Cu: 63 Zn: 250	CCME (2019)
México	Normal Cd: 0,35 Pb: 35 Peligroso Cd: 3-5 Pb: 100-300	SEMARNAT (2002)

*Las concentraciones para cada ET están en base seca.

4.4. Concentración y absorción de ETs en la planta de papa

La concentración de ETs en la planta de papa ha sido también investigado, ya que la papa es un producto que tiene significancia en la dieta de nuestra sociedad. La concentración de ETs varía en las diferentes partes de la planta (Nedjimi y Daoud, 2009; Singh et al., 2006). Generalmente es la concentración de ETs es mayor en raíz y tallo y menor en las partes comestibles (Liu et al., 2018). En esta investigación se obtuvieron resultados similares, puesto que, en la mayoría de los casos, la cáscara y tubérculo de papa tuvieron concentraciones menores que otras partes de la planta de papa. Si bien los tubérculos crecen en los suelos como la raíz, no absorbe los ETs de los suelos, pero si recibe los ETs transferidos desde otras partes de la planta como el tallo. Concentraciones elevadas de ETs podrían suponer mayores tasas de absorción y por ende representar un riesgo en la cadena alimentaria. No todos los ETs tienen el mismo potencial para la absorción por las plantas, en el caso de los ETs estudiados está en el siguiente orden $Pb < Cu < Zn$ y Cd (McBride, 2003). En el tubérculo de papa, que cobra importancia por ser la parte comestible, los resultados de las concentraciones de ETs tuvieron el siguiente orden decreciente $Pb > Zn > Cu$. Estos resultados son diferentes a los reportados por Orellana et al. (2020) y Musilova et al. (2017) en las que las concentraciones de Pb en tubérculo son menores que las concentraciones de Zn . Por su parte en las investigaciones en papa de Khan et al. (2017) y Peng et al. (2018) el orden de concentraciones es $Zn > Cu > Pb$. También Jalali y Meyari (2016) determinaron ETs en tubérculos de papa teniendo el siguiente orden de concentración $Zn > Pb > Cu$.

Plomo

Las concentraciones de Pb en partes vegetales en este estudio son elevadas, inclusive en los tubérculos, en los que en todos los casos se supera ampliamente el límite recomendado el Codex Alimentarius de $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$ para el tubérculo pelado (ver Anexo 16). Los resultados evidencian que, para la variedad estudiada la concentración de Pb en tubérculo pelado y la cáscara fue muy similar. En otros estudios se ha reportado que la concentración de Pb fue mayor en la cáscara que en el tubérculo pelado (Dudka et al., 1996; Queirolo et al., 2000).

Según los resultados de concentraciones de Pb en las partes de la planta de la papa, en la mitad de las parcelas analizadas fue la raíz la que presentó mayores concentraciones, esto concuerda con lo descrito por Koeppe (1981). Sin embargo, considerando el Pb como un ET de cuidado desde el punto de vista de su ingreso a la cadena alimentaria y la ecotoxicidad (McLaughlin et al., 1999), según los resultados de la absorción de Pb por la planta podemos ver que un gran porcentaje sale con destino al consumo humano. Por el contrario, menos del 20 % del plomo regresa al suelo, puesto que la planta se descompone en las parcelas posterior a la cosecha.

El rango de Pb en los tubérculos de papa en esta investigación fue de 11,94 – 16,35 mg kg⁻¹ y un promedio de 14,15 mg kg⁻¹. Valores elevados comparados con otras investigaciones: 0,30 – 0,40 mg kg⁻¹ (Privot et al., 2006), 0,49 – 1,37 mg kg⁻¹ (Šrek et al., 2010), 0,5 – 4,5 mg kg⁻¹ (Dudka et al., 1995) y 0,12-1,52 mg kg⁻¹ (Vitali et al., 2007). Sin embargo, también se ha reportado valores elevados de Pb en tubérculos, incluso mayores a los resultados de esta investigación, es el caso de la investigación de Jalali y Meyari (2016) cuyo rango de concentraciones fue de 2,50 – 41,90 mg kg⁻¹ y un promedio de 19,50 mg kg⁻¹.

Los valores obtenidos para el BCF presentaron diferencias estadísticas ($p < 0,05$) y estuvieron en el rango de 0,08 y 0,55, siendo mayores en aquellos sitios con mayor concentración de Pb en el suelo. Los resultados obtenidos para el BCF indicarían que para hacer evaluación de riesgo de transferencias de este ET y tubérculos y posteriormente al ser humado no es adecuado considerar un único de valor de BCF, el cual debe ajustarse según el nivel de Pb en el suelo.

Es interesante notar que la parte de la planta que mejores correlaciones mostró entre la concentración de Pb y las propiedades del suelo fue la raíz, correlacionando significativa y positivamente con la concentración de Pb en el suelo ($r = 0,74$, $p < 0,01$) y negativamente con el contenido de materia orgánica del suelo ($r = -0,70$, $p < 0,01$) entre otras relaciones observadas. La concentración de Pb en el suelo tuvo una menor correlación con el Pb en tallo y no mostró correlación con Pb en hojas, cáscara ni en tubérculos. Esto indicaría que la raíz es el órgano más sensible a las variaciones de Pb en el suelo y, por lo tanto, un mejor indicador de contaminación. A su vez, el BCF estuvo significativa y negativamente correlacionado con el contenido de Pb y de Zn disponible (Zn-EDTA) en el suelo ($r = -0,95$ y

-0,88 respectivamente; $p < 0,01$ en ambos casos) los cuales serían buenas variables predictoras del BCF. Esto último indicaría una competencia entre la carga de Zn y Pb desde el floema a los tubérculos. En otros ET, como Cd, se ha observado una relación inversa entre el BCF y la disponibilidad de Zn (Sanderson et al., 2019). Sin embargo, la concentración de Zn en la raíz se vio incrementada por el Zn en el suelo, como indica la correlación significativa y positiva entre ambas variables ($r=0,55$, $p=0,02$), lo que mostraría que no existe competencia Zn^{2+} y Pb^{2+} (formas absorbibles) a nivel de su absorción por la raíz de las plantas de papa.

Cobre y zinc

Si bien es cierto, tanto el Cu como el Zn son parte de los denominados micronutrientes, pues influyen en muchos procesos de las plantas, pero el exceso de estos elementos en el suelo podría también tener efectos en las plantas y no necesariamente beneficiosos. Concentraciones elevadas de Cu en el suelo pueden tener efecto negativo sobre el crecimiento de las plantas, podrían también producir especies reactivas de oxígeno y alteraciones en los procesos bioquímicos y fisiológicos (Mourato et al., 2009). Alteraciones que pueden incluso provocar daño celular, incluida la peroxidación de los lípidos de la membrana (Oliva et al., 2010), a todo ello se le puede adicionar una mayor acumulación de Cu en los tejidos vegetales. La acumulación y la susceptibilidad a la toxicidad de Cu en los tejidos vegetales no es la misma para todas las plantas, además puede variar según las características de los suelos (Guo et al., 2010; Rooney et al., 2006).

Al igual que el Cu, en el Zn la acumulación y el umbral de toxicidad varía entre plantas y variedades de las mismas. Sin embargo, excesos de Zn en los sistemas de cultivo podrían provocar interferencias negativas sobre la absorción de otros nutrientes (Kaya et al., 2000) y sobre actividades enzimáticas (Khudsar et al., 2004; Ouariti et al., 1997), provocar también marchitez, necrosis de hojas antiguas (Di Baccio et al., 2005; Soares et al., 2001), reducción de la biomasa y limitar la extensión y división celular (Cakmak, 2000; Khudsar et al., 2004; Wallnofer y Engelhardt, 1984).

En las plantas de papa analizadas, en la mitad de ellas las hojas fueron las que presentaron mayores concentraciones de Cu. Por su parte Farias et al. (2013) encontraron mayores

concentraciones en raíces y estolones de plantas de papa. Además, evidenciaron que el aumento de las concentraciones de Cu en los tejidos vegetales fue dependiente de las concentraciones externas de Cu. Las concentraciones de Cu en los tubérculos en esta investigación estuvieron en el rango de 2,22 a 9,79 mg kg⁻¹ y un promedio de 6,02 mg kg⁻¹. Otros autores reportaron concentraciones de 5,30 a 26,10 mg kg⁻¹ (Jalali y Meyari, 2016) y un promedio de 0,88 mg kg⁻¹ (Mohamed et al., 2003).

La absorción de Cu tiene influencia de las condiciones climáticas en etapa de madurez (Baranowska et al., 2017). También este elemento depende de las variedades de papa, los métodos de control de malezas y las condiciones climáticas en la fase de crecimiento (Zarzecka et al., 2016). Es importante anotar estas influencias sobre la absorción de Cu por las plantas de papa, más allá que esta investigación está centrada en la influencia de otros factores.

Las concentraciones de Zn en el tubérculo estuvieron en el rango de 4,59 a 18,29 mg kg⁻¹ y el promedio fue de 11,79 mg kg⁻¹. Jalali y Meyari (2016) para este mismo elemento reportaron un rango 10,90 a 32,30 mg kg⁻¹ y Mohamed et al. (2003) reportó un promedio de 4,5 mg kg⁻¹.

Si bien las correlaciones entre las concentraciones de Zn, Cu y Pb en partes vegetales no fueron significativas, en todos los casos fue negativa. Esto concuerda con la literatura, ya que existe una interacción negativa estos elementos debido al antagonismo del efecto y la misma proteína transportadora de membrana (Mousavi et al., 2011; Moustakas et al., 2011; Rengel y Graham, 1995).

También se ha evidenciado efectos inversos del contenido de fósforo en el suelo con la absorción de Zn en la papa (Christensen y Jackson, 1981; Soltanpour, 1969). Sin embargo, el análisis de correlación de esta investigación nos da como resultados correlaciones positivas para el contenido de P Olsen y la absorción de Zn por la planta de papa, lo mismo ocurre con las concentraciones de Zn en las distintas partes de la planta.

4.5. Relaciones entre concentraciones de ETs y concentraciones de ETs en planta

La absorción de ETs por las plantas tales como la papa tienen influencia de un sinnúmero de factores. Por ejemplo, las propiedades del suelo que influyen en la absorción de ETs incluyen el pH, el contenido de arcilla y materia orgánica y la salinidad (Tack, 2015).

Los modelos de regresión desarrollados para predecir las concentraciones de ETs en planta en función de la concentración de ETs y otras propiedades de suelos, se realizaron con RLM, ya que según McBride (2002), éstas son suficientes para este tipo de predicciones; además agrega que la inclusión de muchas variables no mejoran significativamente el modelo. Los modelos de regresión tienen la principal ventaja de ser muy rentables tanto en costo como en tiempo, pues reducen el tamaño de los conjuntos de datos en la búsqueda de propiedades del suelo significativas (Bešter et al., 2013).

El modelo de predicción para el Pb en la raíz tuvo como principal variable explicativa al contenido de materia orgánica, además del contenido total de Pb en el suelo. Liu et al. (2018) en un análisis de regresión de cresta determinaron que el Pb en la raíz tenían también como variables explicativas al contenido de materia orgánica y la concentración disponible de Pb en el suelo; sin embargo, la relación con el contenido de materia orgánica fue antagónica. Para el caso del modelo de regresión de Cu en la raíz, la concentración de Cu en el suelo fue la variable explicativa principal, en este aspecto es similar a los resultados de Liu et al. (2018). Por su parte, el modelo de regresión para el Zn en la raíz, tuvo entre las variables explicativas al pH, resultado similar también al análisis de Liu et al. (2018) para este elemento en la raíz de la papa.

Los modelos de predicción para Pb y Cu en la raíz de la planta de papa tienen entre las variables explicativas al contenido de el mismo elemento en el suelo, dicha influencia es positiva, lo que indica que, a mayores concentraciones de estos elementos en el suelo, se traducirá a mayores concentraciones en la raíz de la planta de papa. Esto también se evidencia en el PA para la concentración de Pb y Cu en la raíz, que tienen efectos directos positivos de la concentración de los respectivos elementos en el suelo. Para el modelo de predicción de Pb en la raíz, la MO también es una variable explicativa con una influencia antagónica, esto

también se ve en el PA en el que el efecto de la MO es negativo; esto supone que, si hay mayor contenido de MO en los suelos, la absorción de Pb por la raíz disminuye.

El modelo de predicción para Zn en la raíz tiene entre las variables explicativas al contenido de P Olsen y al pH, con una influencia positiva y negativa respectivamente, de forma similar el PA para Zn en la raíz tiene un efecto directo positivo para el P Olsen y un efecto directo negativo para el pH. Por otro lado, el modelo de predicción para Zn en el tubérculo tiene como variables explicativas con influencia positiva al P Olsen y el contenido de Zn en el suelo y el PA para este elemento en el tubérculo también tienen efectos directos positivos de parte del P Olsen y el contenido de Zn en el suelo.

El modelo de predicción para la absorción total de Pb en la planta de papa tiene entre sus variables explicativas significativas a la concentración de Zn en el suelo y al contenido de arena con una influencia negativa y positiva respectivamente. Esta influencia también se evidencia en el PA, ya que hay un efecto directo negativo del contenido de Zn en el suelo y un efecto directo positivo del contenido de arena. Esto supone que, si hay mayor concentración de Zn en el suelo, la absorción total del Pb por parte de la planta de papa tendría una tendencia a disminuir. Por su parte la absorción total de Cu por la planta de papa en ambos análisis (RLM y PA) tiene una influencia positiva de la acidez intercambiable. En el caso de la absorción total de Zn por parte de la planta, se evidencia en ambos análisis que hay una influencia positiva de las variables P Olsen y contenido de arena.

Según el modelo para la predicción del rendimiento fresco en el cultivo de papa tienen como variables explicativas a la concentración de Zn en el suelo, el contenido de arena, el Cu en el suelo, el contenido de materia orgánica y la conductividad eléctrica. El rendimiento está influenciado por la MO según Abrougui et al. (2019), también desarrollaron un modelo con RLM, en el que el contenido de materia orgánica era la principal variable explicativa, sin embargo, la influencia es positiva, esto es antagónico a la influencia del modelo propuesto en esta investigación. Es importante resaltar que en el PA el efecto del contenido de materia orgánica sobre el rendimiento si es positivo. Tanto con el análisis de RLM y el PA, el contenido de arena tiene una influencia positiva sobre el rendimiento fresco de la papa.

4.6. Sustentabilidad para el cultivo de papa en la región Amazonas

El desarrollo sustentable tiene como objetivo satisfacer las necesidades básicas de alimentación, salud, educación y vivienda de la sociedad; para lo cual se hace uso de las tecnologías adecuadas de tal manera que se garantice también la satisfacción de las necesidades de las futuras generaciones (Raidán, 2007). La consecución del desarrollo sustentable va más allá de las buenas intenciones de los involucrados, en la práctica hay muchas dificultades que se tienen que superar, las cuáles requerirán el mayor esfuerzo de la sociedad en su conjunto.

La agricultura es vital para la sociedad, pero es importante recalcar que de la forma convencional es insostenible, pues solo ha traído consigo la explotación de recursos dejando degradación y contaminación (Salmeron y Valverde, 2016). Por ello, la agricultura sustentable tiene sus pilares en la preservación de la calidad de los recursos agua, aire, biodiversidad, suelo, etcétera (García, 2003). En ese sentido, las alternativas de sustentabilidad propuestas están en función a la conservación del recurso suelo, teniendo en cuenta dos los elementos estratégicos fundamentales: el mejoramiento y conservación de la fertilidad y productividad del suelo. De esta manera, es determinante la transición de una agricultura que solo está orientada a los resultados económicos, a una agricultura que promueva y haga uso eficiente de los recursos, una agricultura sustentable evitando el deterioro de los agroecosistemas y que ello contribuya también a la mejora de la calidad de vida de los agricultores y su entorno (Martin-Guay et al., 2018; Méndez-Argüello y Lira Saldivar, 2019).

Es necesario conocer las características de los suelos dedicados a la agricultura. Ya que un instrumento fundamental para determinar la sustentabilidad en el tiempo de un sistema de manejo es la evaluación de la calidad del suelo (Doran y Parkin, 1994). De forma análoga, la evaluación de la calidad de los suelos es tan importante como lo es como un examen médico para las personas (Larson y Pierce, 1991). La evaluación de la calidad del suelo también permitirá tomar acciones eficaces para la conservación del suelo, mejorar la calidad del mismo revirtiendo aquellos procesos que contribuyen a su degradación (Segueda et al.,

2011). En este sentido, es indispensable que los productores comiencen a realizar análisis de fertilidad de suelos para determinar nivel de nutrientes disponibles en el suelo, al mismo tiempo a realizar estudios de contenido de nutrientes en cultivo de alto potencial productivo. Estas herramientas permitan establecer dosis de fertilización técnicamente adecuadas, ajustadas a los requerimientos la variedad para cada tipo de suelo, y amigables con el medio ambiente. Debe haber por tanto laboratorios que sean capaces de entregar resultados confiables y profesionales preparados para establecer las recomendaciones.

La agricultura tradicional generalmente está asociada al uso de cantidades excesivas de fertilizantes inorgánicos que impactan de manera negativa en el suelo. Los fertilizantes inorgánicos aportan escasa o nula cantidad de materia orgánica, ello hace que los microorganismos benéficos se perjudiquen afectando así la capacidad del suelo para retener agua y nutrientes (Solgi et al., 2018). Por ejemplo, hay evidencia que los tubérculos de papa en los sistemas tradicionales tienen mayor contenido de Pb que los tubérculos en sistemas de cultivo orgánicos (Wierzbowska et al., 2018).

La rotación de cultivos es una alternativa fundamental para la sustentabilidad. Esta alternativa presenta muchos beneficios si lo comparamos con los sistemas de monocultivo, tales como mayores aportes de carbono para el suelo, mayor intensidad del uso del suelo; además de mayor eficiencia del uso del agua. Westfall et al. (2012) reportó que el uso del suelo con dos cultivos en tres años o tres cultivos en cuatro años incrementó la materia orgánica del suelo, el rendimiento del cultivo y la eficiencia del uso del agua. En investigaciones se han evaluado los efectos de la rotación de cultivos (papa con cebada, raigrás y trébol) con las enfermedades transmitidas en papa, reportando un efecto significativo favorable, haciendo necesaria la rotación de cultivos (Larkin, 2008). Todas las rotaciones de cultivo (con alfalfa, arveja, lupino blanco y avena) mejoraron la producción de papa al reducir una infección del tallo (Honeycutt et al., 1996). El rendimiento de la papa con rotación de cultivos (con camote y frijoles utilizados antes o después de cereales) mejoró comparado con un sistema de monocultivo (Lemaga et al., 2001).

V. CONCLUSIONES

- En la región Amazonas para el cultivo de papa se utiliza para la fertilización una mezcla de cuatro fertilizantes inorgánicos, los cuales aportan principalmente N, P, K y en menor proporción S y Mg. Se encontraron concentraciones variables de ETs en los fertilizantes. Concentraciones de Cd se encontró en el fertilizante de naturaleza fosforada y concentraciones de Pb en los fertilizantes fosforado, nitrogenado y potásico. Las concentraciones encontradas de Cd y Pb estuvieron por debajo de los límites normativos para fertilizantes de distintos países. De manera adicional también algunos agricultores utilizan “gallinaza” como una fuente de nutrientes, en este fertilizante de naturaleza orgánica no se encontraron concentraciones de Cd y Pb, pero sí de Cu y Zn.
- Los suelos para cultivo de papa en la región Amazonas tuvieron propiedades fisicoquímicas variables; sin embargo, destacaron los suelos con pH moderadamente ácidos, con un nivel bajo de contenido de materia orgánica y con alto contenido de fósforo, también fueron predominantes los suelos franco arenosos. Las características mencionadas en general son acordes a los requerimientos para el cultivo de papa. Los suelos analizados tuvieron concentraciones variables de ETs y siguieron la secuencia de $Zn > Pb > Cu > Cd$ respecto de las concentraciones. Destacan las concentraciones del 42,5 % de los suelos analizados, en las que el Pb supera los límites normativos consultados para suelos agrícolas.
- Las concentraciones de ETs en los tejidos vegetales de papa fueron variables para cada parte de la planta de papa analizada. Las concentraciones encontradas fueron elevadas especialmente para el Pb, inclusive en el tubérculo, en el que se superan los límites normativos de la FAO y OMS. En general las concentraciones para todos los ETs fueron mayores en la raíces y tallos y por ende fueron menores en la parte comestible (cáscara y tubérculo). En los tubérculos las concentraciones de ETs siguieron el orden decreciente $Pb > Zn > Cu$.
- Los análisis de correlación, modelos de regresión y el análisis de ruta evidenciaron relaciones entre las concentraciones de ETs en los tejidos vegetales de papa y las propiedades fisicoquímicas de los suelos. Así se encontró relación entre el contenido de Pb en la raíz con la concentración de Pb en el suelo y con el contenido de materia orgánica en el suelo. También hubo relación entre el contenido de Cu en la raíz con el contenido de Cu en el suelo. Se encontró relación también entre el contenido de Zn en la raíz con el contenido de P Olsen

en el suelo y el pH del suelo. La concentración de Zn en el tubérculo también se relacionó con el P Olsen y la concentración de Zn en el suelo. La absorción total de Pb por la planta de papa se relacionó con el P Olsen y la concentración de Zn en el suelo. La absorción total de Zn por la planta se relacionó también para todos los análisis realizados con el contenido de arena y el P Olsen del suelo. Finalmente, también para los análisis realizados, se encontró relación entre el rendimiento fresco y el contenido de arena en el suelo.

- La sustentabilidad en el cultivo de papa en la región Amazonas se hace necesaria para la conservación del recurso suelo. Para el cultivo de papa y de acuerdo a los resultados de esta investigación se brindan y recomiendan alternativas como los análisis de fertilidad y calidad de suelos previos a la siembra de la papa y de forma periódica, uso de fertilizantes con concentraciones bajas de ETs y de naturaleza orgánica y la rotación de cultivos.

VI. RECOMENDACIONES

- En futuras investigaciones se debería determinar el requerimiento de P, N y K para la variedad huayro amazonense INIA 323, lo cual ayudaría, usando la base de datos con la fertilidad de suelos, a calcular de manera adecuada las dosis de fertilización de la variedad.
- Se debe tomar con cautela los resultados del contenido Pb en tubérculos de esta investigación, ya que para determinar el riesgo potencial en los consumidores se debería estimar el consumo de papa por persona en la región Amazonas en un determinado periodo, con esa información se podría tener una idea del ingreso de Pb por consumo de este alimento. De esta manera se podría tener las herramientas necesarias para evaluar alternativas en el cultivo y consumo de este alimento.
- De acuerdo a los resultados obtenidos la recomendación para los agricultores sería realizar un análisis previo de fertilidad del suelo y, en general, mejorar el contenido de materia orgánica de los suelos, ya que el aumento de este parámetro en el suelo se traduce en una disminución del contenido de Pb en los tejidos vegetales. El Zn es un micronutriente que previene también la entrada de Pb a la planta, por tanto, el cultivo en suelos con altos niveles de Zn, podría minimizar el riesgo de entrada de Pb en la cadena alimentaria.
- Futuras investigaciones deberían abordar la capacidad de absorción y el contenido de Pb en otras variedades de papa cultivadas en la región Amazonas, de tal manera de encontrar las más seguras desde el punto de vista alimentario.
- La determinación de Cd en suelos y tejidos vegetales requiere la aplicación de métodos y equipos confiables, puesto que este metal tiende a estar en concentraciones muy bajas. Por lo que es necesario evaluar y mejorar las metodologías para la determinación de este elemento, la adquisición de patrones internacionales también es necesario para un adecuado control de calidad del método aplicado, así como también del equipo de determinación.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrougui, K., Gabsi, K., Mercatoris, B., Khemis, C., Amami, R., & Chehaibi, S. (2019). Prediction of organic potato yield using tillage systems and soil properties by artificial neural network (ANN) and multiple linear regressions (MLR). *Soil and Tillage Research*, 190, 202-208.
- Ai, S., Liu, B., Yang, Y., Ding, J., Yang, W., Bai, X., Naeem, S., & Zhang, Y. (2018). Temporal variations and spatial distributions of heavy metals in a wastewater-irrigated soil-eggplant system and associated influencing factors. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 153, 204-214.
- Alarcón-Corredor, O. M. (2009). Los elementos traza. *Revista Médica de la extensión Portuguesa*, 4(3), 107-124.
- Antoniadis, V., Shaheen, S. M., Levizou, E., Shahid, M., Niazi, N. K., Vithanage, M., Ok, Y. S., Bolan, N., & Rinklebe, J. (2019). A critical prospective analysis of the potential toxicity of trace element regulation limits in soils worldwide: Are they protective concerning health risk assessment? - A review. *Environment International*, 127(April), 819-847.
- Aron, E., & Aron, A. (2001). *Estadística para psicología*. Prentice Hall.
- Ascurra, V. (2019). Aplicación de un modelo dinámico para determinar la contaminación y remoción de metales pesados del río Moche – Valle Santa Catalina. *Revista Ciencia y Tecnología*, 15(1), 123-133.
- Ashrafzadeh, S., Gaw, S., Genet, R., Glover, C. N., & Leung, D. W. M. (2017). Natural variation in correlations between cadmium and micronutrients in potato tubers. *Journal of Food Composition and Analysis*, 59, 55-60.
- Attanayake, C. P., Hettiarachchi, G. M., Harms, A., Presley, D., Martin, S., & Pierzynski, G. M. (2014). Field Evaluations on Soil Plant Transfer of Lead from an Urban Garden Soil. *Journal of Environmental Quality*, 43(2), 475-487.
- Banco Mundial. (2017). Tomando Impulso en la Agricultura Peruana: Oportunidades para aumentar la productividad y mejorar la competitividad del sector.
- Bao, S. (2000). *Soil and agricultural chemistry analysis* (C. A. Press, Ed.).
- Barak, P., & Helmke, P. A. (1993). *The Chemistry of Zinc*. En A. D. Robson (Ed.), *Zinc in Soils and Plants: Proceedings of the International Symposium on 'Zinc in Soils and*

- Plants' held at The University of Western Australia, 27–28 September, 1993 (pp. 1-13). Springer Netherlands.
- Baranowska, A., Zarzecka, K., Gugala, M., & Mystkowska, I. (2017). Contents of zinc, copper and manganese in potato tubers depending on the ways of application of the soil fertilizer ugmax. *Journal of Ecological Engineering*, 18(1), 99-106.
- Bešter, P. K., Lobnik, F., Eržen, I., Kastelec, D., & Zupan, M. (2013). Prediction of cadmium concentration in selected home-produced vegetables. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 96, 182-190.
- Bojanowska, M., & Jackowska, I. (2015). Predicting of Cadmium and Lead Concentration. *Logistyka*, 5(CD1), 77-84.
- Bošković-Rakočević, L., Pavlović, R., & Đurić, M. (2017). Effect of phosphorus fertilizers on yield and cadmium content of potato tubers. *Acta agriculturae Serbica*, 22(44), 37-46.
- Bremner, J. M. (1996). *Nitrogen-Total* (pp. 1085-1121). John Wiley & Sons, Ltd.
- Bueno Buelvas, R., & Fernández Lizarazo, J. C. (2019). La capacidad de intercambio catiónico del suelo: Una bóveda de nutrición clave en la producción de alimentos. *Ámbito investigativo*, 4(1), 7-12.
- Cakmak, I. (2000). Possible Roles of Zinc in Protecting Plant Cells from Damage by Reactive Oxygen Species. *New Phytology*, 146, 185-205.
- Cambouris, A. N., Nolin, M. C., Zebarth, B. J., & Laverdière, M. R. (2006). Soil management zones delineated by electrical conductivity to characterize spatial and temporal variations in potato yield and in soil properties. *American Journal of Potato Research*, 83(5), 381-395.
- CCME - Canadian Council Minister Environmental. (2019). Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health. Disponible en: https://esdat.net/Environmental%20Standards/Canada/SOIL/rev_soil_summary_tbl_7.0_e.pdf
- Chen, W., Chang, A. C., Wu, L., & Page, A. L. (2006). Modeling dynamic sorption of cadmium in cropland soils. *Vadose Zone Journal*, 5(4), 1216-1221.
- Chen, W., Li, L., Chang, A. C., Wu, L., Chaney, R. L., Smith, R., & Ajwa, H. (2009). Characterizing the solid-solution partitioning coefficient and plant uptake factor of

- As, Cd, and Pb in California croplands. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 129(1-3), 212-220.
- Chila, S. J. Z., Espinoza, C. M., & Martínez, M. E. E. (2017). Cultivo de la papa y sus condiciones climáticas. *Gestión Ingenio y Sociedad*, 2(2), 140-152.
- Christensen, N. W., & Jackson, T. L. (1981). Potential for phosphorus toxicity in zinc-stressed corn and potato. *Soil Science Society of America Journal*, 45(5).
- De Vries, W., McLaughlin, M. J., & Groenenberg, J. E. (2011). Transfer functions for solid-solution partitioning of cadmium for Australian soils. *Environmental Pollution*, 159(12), 3583-3594.
- Degryse, F., Smolders, E., & Parker, D. R. (2009). Partitioning of metals (Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Zn) in soils: Concepts, methodologies, prediction and applications—A review. *European Journal of Soil Science*, 60(4), 590-612.
- DeHaan, K. R., Vessey, G. T., Holmstrom, D. A., MacLeod, J. A., Sanderson, J. B., & Carter, M. R. (1999). Relating potato yield to the level of soil degradation using a bulk yield monitor and differential global positioning systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 23(2), 133-143.
- Di Baccio, D., Kopriva, S., Sebastiani, L., & Rennenberg, H. (2005). Does glutathione metabolism have a role in the defence of poplar against zinc excess? *New Phytologist*, 167(1), 73-80.
- Ding, C., Zhang, T., Wang, X., Zhou, F., Yang, Y., & Huang, G. (2013). Prediction model for cadmium transfer from soil to carrot (*Daucus carota* L.) and its application to derive soil thresholds for food safety. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(43), 10273-10282.
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). *Defining and Assessing Soil Quality*. En J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, & B. A. Stewart (Eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment* (pp. 1-21). Soil Science Society of America and American Society of Agronomy.
- Dudka, S., Piotrowska, M., Chlopecka, A., & Witek, T. (1995). Trace metal contamination of soils and crop plants by the mining and smelting industry in Upper Silesia, South Poland. *Journal of Geochemical Exploration*, 52(1-2), 237-250.

- Dudka, S., Piotrowska, M., & Terelak, H. (1996). Transfer of cadmium, lead, and zinc from industrially contaminated soil to crop plants: A field study. *Environmental Pollution*, 94(2), 181-188.
- Düngemittelverordnung (DüMV). (2012). Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln. Disponible en: https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/BJNR248200012.html
- Eissa, M. A., & Negim, O. E. (2018). Heavy metals uptake and translocation by lettuce and spinach grown on a metal-contaminated soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 18(4), 1097-1107.
- Estrada-Herrera, I. R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz Suárez, J. J., Navarro-Garza, H., & Etchevers-Barra, J. D. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51(8), 813-831.
- European Parliament. (2016). Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council laying down rules on the making available on the market of CE marked fertilizing products and amending Regulations. Disponible en: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5aa49d31-ec29-11e5-8a81-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_3&format=PDF
- FAO. (2006). Enfoques: Tesoro enterrado—La papa. Disponible en: <http://www.fao.org/ag/esp/revista/0611sp1.htm>
- FAO. (2014). Programa conjunto FAO/OMS sobre normas alimentarias comisión del Codex Alimentarius 37.
- FAO. (2020). FAOSTAT. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- Ferrari, M. (2010). ¿Nuestros actuales sistemas de producción agrícola son ambientalmente sustentables? *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 48, 6-10.
- Fertilizer Australia. (2018). National Code of Practice for Fertilizer Description and Labelling. Disponible en: <https://fertilizer.org.au/Portals/0/Documents/COPs/National%20Code%20of%20Practice%20for%20Fertilizer%20Description%20and%20Labelling.pdf?ver=2017-06-23-114549-300>

- Figueroa, J. A. L., Wrobel, K., Afton, S., Caruso, J. A., Felix Gutierrez Corona, J., & Wrobel, K. (2008). Effect of some heavy metals and soil humic substances on the phytochelatin production in wild plants from silver mine areas of Guanajuato, Mexico. *Chemosphere*, 70(11), 2084-2091.
- Filipović, V., Cambier, P., Filipović, L., Coquet, Y., Pot, V., Bodineau, G., Jaulin, A., Mercier, V., Houot, S., & Benoit, P. (2016). Modeling Copper and Cadmium Mobility in an Albeluvisol Amended with Urban Waste Composts. *Vadose Zone Journal*, 15(12), 1-15.
- García, F. O. (2003). Agricultura sustentable y materia orgánica del suelo: Siembra directa, rotaciones y fertilidad. *Congreso nacional de la ciencia del suelo*. INPOFOS. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.
- García, Z. (2006). *Agricultura, expansión del comercio y equidad de género*. FAO.
- Garibaldi, L. A., Gemmill-Herren, B., D'Annolfo, R., Graeub, B. E., Cunningham, S. A., & Breeze, T. D. (2017). Farming Approaches for Greater Biodiversity, Livelihoods, and Food Security. *Trends in Ecology and Evolution*, 32(1), 68-80.
- Gee, G., & Bauder, J. (1986). Methods of soil analysis, part 1, physical and mineralogical methods. En Soil Science Society of America, *American Society of Agronomy*.
- Gestión. (2022, mayo 12). Conveagro: Importación de fertilizantes tomará entre 3 a 5 meses y no 15 días como dice Gobierno. Gestión; NOTICIAS GESTIÓN. Disponible en: <https://gestion.pe/economia/conveagro-importacion-de-fertilizantes-tomara-entre-3-a-5-meses-y-no-15-dias-como-dice-gobierno-rmmn-noticia/>
- Gómez, M. (2005). *Análisis de suelos como herramienta de diagnóstico en la evaluación química de la fertilidad en el cultivo de papa*. Fisiología y nutrición vegetal en el cultivo de papa. Presente y futuro de la investigación en la cadena agroalimentaria de la papa en Colombia. CEVIPAPA. Bogotá, Colombia. 99p.
- Gong, Q., Chen, P., Shi, R., Gao, Y., Zheng, S. A., Xu, Y., Shao, C., & Zheng, X. (2019). Health assessment of trace metal concentrations in organic fertilizer in Northern China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(6), 1031.

- Gray, C. W., Yi, Z., Lehto, N. J., Robinson, B. H., Munir, K., & Cavanagh, J. A. E. (2019). Effect of cultivar type and soil properties on cadmium concentrations in potatoes. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 47(3), 182-197.
- Gregorich, E. G., & Carter, M. R. (2007). *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Second Edition. CRC Press.
- Guo, X. Y., Zuo, Y. B., Wang, B. R., Li, J. M., & Ma, Y. B. (2010). Toxicity and accumulation of copper and nickel in maize plants cropped on calcareous and acidic field soils. *Plant and Soil*, 333(1-2), 365-373.
- Gupta, N., Yadav, K. K., Kumar, V., Kumar, S., Chadd, R. P., & Kumar, A. (2019). Trace elements in soil-vegetables interface: Translocation, bioaccumulation, toxicity and amelioration—A review. *Science of the Total Environment*, 651, 2927-2942.
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., & Nelson, W. L. (2005). *Soil fertility and fertilizers: An Introduction to Nutrient Management* (Pearson, Ed.; 7.a ed.).
- Honeycutt, C. W., Clapham, W. M., & Leach, S. S. (1996). Crop rotation and N fertilization effects on growth, yield, and disease incidence in potato. *American Potato Journal*, 73(2), 45-61.
- Ingwersen, J., & Streck, T. (2005). A Regional-Scale Study on the Crop Uptake of Cadmium from Sandy Soils. *Journal of Environmental Quality*, 34(3), 1026-1035.
- Instituto Nacional de Innovación Agraria del Perú - INIA. (2014). PAPA INIA 323—HUAYRO AMAZONENSE : Variedad de papa con mediana resistencia a ranchar, alta calidad culinaria y oportunidad de mercado. Instituto Nacional de Innovación Agraria.
- Instituto Nacional de Innovación Agraria del Perú - INIA. (2013). Plan Estratégico de Mejoramiento Genético del Programa Nacional de Innovación Agraria en Raíces y Tuberosas-Papa. DIA. Sub-dirección de Cultivos. 37.
- INTAGRI. (2017). Requerimientos de Clima y Suelo para el Cultivo de la Papa. Serie hortalizas. Artículos técnicos de INTAGRI, 10. Disponible en: <https://www.intagri.com/articulos/hortalizas/requerimientos-de-clima-y-suelo-para-el-cultivo-de-la-papa>
- International Potato Center. (2019). Datos y cifras de la papa—International Potato Center. Disponible en: <https://cipotato.org/es/potato/potato-facts-and-figures/>

- Jalali, M., & Meyari, A. (2016). Accumulation of Heavy Metals in Potatoes Grown on Calcareous Soils of the Hamedan, Western Iran. *Soil and Sediment Contamination*, 25(4), 365-377.
- Johnston, J., & Fellow, L. T. S. (2005). *Assessing soil fertility: The importance of soil analysis and its interpretation*. Potash Development Association.
- Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace elements in soils and plants* (4th ed.). Taylor & Francis Group, CRC Press.
- Kaya, C., Higgs, D., & Burton, A. (2000). Plant growth, phosphorus nutrition, and acid phosphatase enzyme activity in three tomato cultivars grown hydroponically at different zinc concentrations. *Journal of Plant Nutrition*, 23(5), 569-579.
- Khan, Z. I., Ahmad, K., Yasmeen, S., Akram, N. A., Ashraf, M., & Mehmood, N. (2017). Potential health risk assessment of potato (*Solanum tuberosum* L.) grown on metal contaminated soils in the central zone of Punjab, Pakistan. *Chemosphere*, 166, 157-162.
- Khudsar, T., Iqbal, M., & Sairam, R. (2004). Zinc-induced changes in morpho-physiological and biochemical parameters in *Artemisia annua*. *Biologia plantarum*, 48(2), 255-260.
- Koeppel, D. E. (1981). *Lead: Understanding the Minimal Toxicity of Lead in Plants*. En N. W. Lepp (Ed.), *Effect of Heavy Metal Pollution on Plants: Effects of Trace Metals on Plant Function* (pp. 55-76). Springer Netherlands.
- Kratz, S., Schick, J., & Schnug, E. (2016). Trace elements in rock phosphates and P containing mineral and organo-mineral fertilizers sold in Germany. *Science of the Total Environment*, 542, 1013-1019.
- Kumar, V., Sharma, A., Kaur, P., Singh Sidhu, G. P., Bali, A. S., Bhardwaj, R., Thukral, A. K., & Cerda, A. (2019). Pollution assessment of heavy metals in soils of India and ecological risk assessment: A state-of-the-art. *Chemosphere*, 216, 449-462.
- Larkin, R. P. (2008). Relative effects of biological amendments and crop rotations on soil microbial communities and soilborne diseases of potato. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(6), 1341-1351.
- Larson, W. E., & Pierce, F. J. (1991). *Conservation and enhancement of soil quality*. En Evaluation for sustainable land management in the developing world: Proceedings of the International Workshop on Evaluation for Sustainable Land Management in the

- Developing World, Chiang Rai. Bangkok, Thailand: International Board for Soil Research and Management.
- Latifi, Z., & Jalali, M. (2018). Trace element contaminants in mineral fertilizers used in Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(32), 31917-31928.
- Legind, C. N., Rein, A., Serre, J., Brochier, V., Haudin, C.-S., Cambier, P., Houot, S., & Trapp, S. (2012). Simultaneous Simulations of Uptake in Plants and Leaching to Groundwater of Cadmium and Lead for Arable Land Amended with Compost or Farmyard Manure. *PLoS ONE*, 7(10), e47002.
- Lemaga, B., Kanzikwera, R., Kakuhenzire, R., Hakiza, J. J., & Manzi, G. (2001). The effect of crop rotation on bacterial wilt incidence and potato tuber yield. *African Crop Science Journal*, 9(1), 257-266.
- Li, H., Yang, Z., Dai, M., Diao, X., Dai, S., Fang, T., & Dong, X. (2020). Input of Cd from agriculture phosphate fertilizer application in China during 2006–2016. *Science of The Total Environment*, 698, 134149.
- Liu, Z., Nan, Z., Zhao, C., & Yang, Y. (2018). Potato absorption and phytoavailability of Cd, Ni, Cu, Zn and Pb in sierozem soils amended with municipal sludge compost. *Journal of Arid Land*, 10(4), 638-652.
- MAATE - Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2015). Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de remediación para Suelos Contaminados. Disponible en: <https://www.informea.org/es/node/331379>
- Martin-Guay, M.-O., Paquette, A., Dupras, J., & Rivest, D. (2018). The new Green Revolution: Sustainable intensification of agriculture by intercropping. *Science of The Total Environment*, 615, 767-772.
- McBride, M. B. (2002). Cadmium uptake by crops estimated from soil total Cd and pH. *Soil Science*, 167(1), 62-67.
- McBride, M. B. (2003). Toxic metals in sewage sludge-amended soils: Has promotion of beneficial use discounted the risks? *Advances in Environmental Research*, 8(1), 5-19.
- McBride, M. B., & Spiers, G. (2001). Trace element content of selected fertilizers and dairy manures as determined by ICP–MS. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32(1-2), 139-156.

- McLaughlin, M. J., Parker, D. R., & Clarke, J. M. (1999). Metals and micronutrients – food safety issues. *Field Crops Research*, 60(1-2), 143-163.
- McLaughlin, M. J., Tiller, K. G., Naidu, R., & Stevens, D. P. (1996). Review: The behaviour and environmental impact of contaminants in fertilizers. *AustJSoilRes*, 34, 1-54.
- Méndez-Argüello, B., & Lira Saldivar, R. H. (2019). Uso potencial de la zeolita en la agricultura sustentable de la nueva revolución verde. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 6(17), 191-193.
- Mengist, M. F., Milbourne, D., Griffin, D., McLaughlin, M. J., Creedon, J., Jones, P. W., & Alves, S. (2017). Cadmium uptake and partitioning in potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars with different tuber-Cd concentration. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(35), 27384-27391.
- MIDAGRI. (2017). Papa: Características de La Producción Nacional y de La Comercialización en Lima Metropolitana.
- MINAM - Ministerio del Ambiente Perú. (2017). Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM: Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. Disponible en: <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-011-2017-minam/>
- Ministério da Agricultura, Pecuária e & Abastecimento. (2006). Instrução Normativa SDA no 27 de 05/06/2006/ SDA - Secretaria de Defesa Agropecuária. Disponible en: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=76854>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego - Perú. (2020). Perfil productivo y competitivo de los principales cultivos del sector. Disponible en: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNzdjZTg2NzctMDUyYi00N2FILWExM2MtNjM4NzE1NzE0ZGE5IiwidCI6IjdmMDg0NjI3LTdmNDAtNDg3OS04OTE3LTk0Yjg2ZmQzNWYzZiJ9>
- Ministry of Agriculture and Rural Areas of People's Republic of China (MOA). (2012). Chinese National Agricultural Organic Fertilizer Standard (NY525-2012). Disponible en: <https://www.chinesestandard.net/PDF.aspx/NY525-2012>
- Mohamed, A. E., Rashed, M. N., & Mofty, A. (2003). Assessment of essential and toxic elements in some kinds of vegetables. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 55(3), 251-260.

- Molina, M., Aburto, F., Calderón, R., Cazanga, M., & Escudey, M. (2009). Trace element composition of selected fertilizers used in Chile: Phosphorus fertilizers as a source of long-term soil contamination. *Soil and Sediment Contamination*, 18(4), 497-511.
- Mourato, M. P., Martins, L. L., & Campos-Andrada, M. P. (2009). Physiological responses of *Lupinus luteus* to different copper concentrations. *Biologia plantarum*, 53(1), 105-111.
- Mousavi, S. R., Shahsavari, M., & Rezaei, M. (2011). A general overview on manganese (Mn) importance for crops production. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(9), 1799-1803.
- Moustakas, N. K., Akoumianaki-Ioannidou, A., & Barouchas, P. E. (2011). The Effects of Cadmium and Zinc Interactions on the Concentration of Cadmium and Zinc in Pot Marigold («*Calendula officinalis*» L.). *Australian Journal of Crop Science*, 5(3), 277-282.
- MSGP - SEGPRES : Ministerio Secretaría General De La Presidencia; Subsecretaría General De La Presidencia. (2009). Decreto 4 (2009): Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile>
- Musilova, J., Bystricka, J., Vollmannova, A., Janotova, B., Orsak, M., Harangozo, L., & Hegedusova, A. (2017, enero 12). Safety of Potato Consumption in Slovak Region Contaminated by Heavy Metals due to Previous Mining Activity [Research Article]. *Journal of Food Quality*; Hindawi.
- Nakamura, K., Yasutaka, T., Kuwatani, T., & Komai, T. (2017). Development of a predictive model for lead, cadmium and fluorine soil–water partition coefficients using sparse multiple linear regression analysis. *Chemosphere*, 186, 501-509.
- Nedjimi, B., & Daoud, Y. (2009). Cadmium accumulation in *Atriplex halimus* subsp. *Schweinfurthii* and its influence on growth, proline, root hydraulic conductivity and nutrient uptake. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 204(4), 316-324.
- Nookabkaew, S., Rangkadilok, N., Prachoom, N., & Satayavivad, J. (2016). Concentrations of Trace Elements in Organic Fertilizers and Animal Manures and Feeds and

- Cadmium Contamination in Herbal Tea (*Gynostemma pentaphyllum* Makino). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(16), 3119-3126.
- Nziguheba, G., & Smolders, E. (2008). Inputs of trace elements in agricultural soils via phosphate fertilizers in European countries. *Science of The Total Environment*, 390(1), 53-57.
- Oliva, M., Camas, D. E., Valqui, X. J., Meléndez, J. B., & Leiva, S. (2019). Quantitative Determination of Cadmium (Cd) in Soil-Plant System in Potato Cropping (*Solanum tuberosum* var. Huayro). *Advances in Agriculture*, 2019, 1-4.
- Oliva, R. S., Mingorance, M. D., Valdés, B., & Leidi, E. O. (2010). Uptake, localisation and physiological changes in response to copper excess in *Erica andevalensis*. *Plant and Soil*, 328(1-2), 411-420.
- Orellana, E., Bastos, M. C., Cuadrado, W., Zárate, R., Sarapura, V., Yallico, L., Tabra, F., & Bao, D. (2020). Heavy Metals in Native Potato and Health Risk Assessment in Highland Andean Zones of Junín, Peru. *Journal of Environmental Protection*, 11(11), 921.
- Ouariti, O., Gouia, H., & Ghorbal, M. H. (1997). Responses of bean and tomato plants to cadmium: Growth, mineral nutrition, and nitrate reduction. *Plant Physiology and Biochemistry (France)*, 35, 347-354.
- Özkan, A., & Uygur, V. (2019). Determination of heavy metal concentrations in agricultural lands of amik plain with MP-AES. *Fresenius Environmental Bulletin*, 28(1), 416-425.
- Peng, Y., Yang, R., Jin, T., Chen, J., & Zhang, J. (2018). Risk assessment for potentially toxic metal(loid)s in potatoes in the indigenous zinc smelting area of northwestern Guizhou Province, China. *Food and Chemical Toxicology*, 120(July), 328-339.
- Pierzynski, G., Vance, G., & Sims, J. (2005). *Soils and environmental quality* (3rd ed.). CRC press.
- Po, E. A., Snapp, S. S., & Kravchenko, A. (2010). Potato Yield Variability across the Landscape. *Agronomy Journal*, 102(3), 885-894.
- Pruvot, C., Douay, F., Hervé, F., & Waterlot, C. (2006). Heavy Metals in Soil, Crops and Grass as a Source of Human Exposure in the Former Mining Areas (6 pp). *Journal of Soils and Sediments*, 6(4), 215-220.

- Queirolo, F., Stegen, S., Restovic, M., Paz, M., Ostapczuk, P., Schwuger, M. J., & Muñoz, L. (2000). Total arsenic, lead, and cadmium levels in vegetables cultivated at the Andean villages of northern Chile. *Science of The Total Environment*, 255(1), 75-84.
- Raidán, G. (2007). El desarrollo sustentable. *Población y Desarrollo*, 34, 90-99.
- Redulla, C. A., Davenport, J. R., Evans, R. G., Hattendorf, M. J., Alva, A. K., & Boydston, R. A. (2002). Relating potato yield and quality to field scale variability in soil characteristics. *American Journal of Potato Research*, 79(5), 317-323. <https://doi.org/10.1007/BF02870168>
- Rengel, Z., & Graham, R. D. (1995). Importance of seed Zn content for wheat grown on Zn deficient soil vegetable growth. *Plant and Soil*, 176, 217-224.
- Rodríguez, M. S. (2017). Evaluación del contenido de metales pesados (Cd y Pb) en diferentes edades y etapas fenológicas del cultivo de cacao en dos zonas del Alto Huallaga.
- Rodríguez Suppo, F. (2005). *Fertilizantes: Nutrición vegetal*. AGT Editor.
- Ronen, E. (2016). Micro-elements in agriculture. *Practical Hydroponics and Greenhouses*, 164, 35-44.
- Rooney, C. P., Zhao, F.-J., & McGrath, S. P. (2006). Soil factors controlling the expression of copper toxicity to plants in a wide range of european soils. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 25(3), 726.
- Sadzawka, A., Carrasco, M., Demanet, R., Flores, H., Grez, R., Mora, M. de la L., & Neaman, A. (2007). Métodos de análisis de tejidos vegetales. *Serie actas INIA*, 40, 140.
- Salmeron, F., & Valverde, L. (2016). Agricultura sostenible para enfrentar los efectos del cambio climático en Nicaragua. *Friedrich-Ebert-Stiftun*, 9-24.
- Sandaña, P., Orena, S., Rojas, J. S., Kalazich, J., & Uribe, M. (2018). Critical value of soil Olsen-P for potato production systems in volcanic soils of Chile. *Journal of soil science and plant nutrition*, 18(4), 965-976.
- Sandaña, P., Orena, S., Rojas, J. S., Kalazich, J., & Uribe, M. (2020). Critical value of soil potassium for potato crops in volcanic soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(3), 1171-1177.

- Sanderson, D. V., Voutchkov, M., & Benkeblia, N. (2019). Bioaccumulation of cadmium in potato tuber grown on naturally high levels cadmium soils in Jamaica. *Science of the Total Environment*, 649, 909-915.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). NOM-021-RECNAT-2000 (Norma Oficial Mexicana). Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Disponible en: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/rn/rn021-02.pdf>
- Segueda, A. N., Correa, G. V., Blanco, J. L., & Gamino, M. de L. R. (2011). Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *ContactoS*, 80, 29-37.
- Silva, F.B.V., Williams Araújo do Nascimento, C., & Renata Muniz Araújo, P. (2017). Environmental risk of trace elements in P-containing fertilizers marketed in Brazil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(3), 635-647.
- Silva, N. R. N., Weerasinghe, P., Kodikara, K. M. S., & Wakwella, P. (2018). Toxic trace elements in soils and edible parts of root and tuber crops in up country wet and intermediate zones of Sri Lanka. *Tropical Agriculturist*, 166(3), 1-21.
- Singh, B. R., Dependra, K., & Asgeir, R. (2017). Long-Term Effect of Phosphate Fertilization on Cadmium Uptake by Oat and its Accumulation in Soil. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 07(06), 2161-0525.
- Singh, S., Eapen, S., & D'Souza, S. F. (2006). Cadmium accumulation and its influence on lipid peroxidation and antioxidative system in an aquatic plant, *Bacopa monnieri* L. *Chemosphere*, 62(2), 233-246.
- Soares, C. R. F. S., Graziotti, P. H., Siqueira, J. O., Carvalho, J. G. de, & Moreira, F. M. S. (2001). Toxidez de zinco no crescimento e nutrição de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* em solução nutritiva. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 36(2), 339-348.
- Solgi, E., Sheikhzadeh, H., & Solgi, M. (2018). Role of irrigation water, inorganic and organic fertilizers in soil and crop contamination by potentially hazardous elements in intensive farming systems: Case study from Moghan agro-industry, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 185, 74-80.
- Soltanpour, P. N. (1969). Effect of Nitrogen, Phosphorus and Zinc Placement on Yield and Composition of Potatoes 1. *Agronomy Journal*, 61(2), 288-289.

- Šrek, P., Hejcman, M., & Kunzová, E. (2010). Multivariate analysis of relationship between potato (*Solanum tuberosum* L.) yield, amount of applied elements, their concentrations in tubers and uptake in a long-term fertilizer experiment. *Field Crops Research*, 118(2), 183-193.
- Stevenson, F. J., & Cole, M. A. (1999). *Cycles of soils: Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients*. John Wiley & Sons.
- Swaine, D. J. (1955). *The trace element content of soils, commonwealth Bureau of Soil Sci (Great Britain), tech Commun 48*. Herald Printing Works, York, United Kingdom.
- Tack, F. M. G. (2015). Trace Elements in Potato. *Potato Research*, 57(3), 311-325.
- Ure, A. M., & Berrow, M. L. (1982). *The elemental constituents of soils*. En *Environmental Chemistry (Vol. 2)*. Royal Society of Chemistry.
- US-EPA. (1996). Method EPA 3050B. *The journal of the Japan Society for Bronchology*, 18(7), 723.
- Vargas, M., Bertsch, F., & Cordero, A. (1992). Comparación de métodos de extracción de fósforo, potasio, calcio y magnesio disponible en Vertisoles de Guanacaste, Costa Rica. *Agronomia Costarricense*, 16(1), 115-123.
- Viala, Y., Laurette, J., Denaix, L., Gourdain, E., Méléard, B., Nguyen, C., Schneider, A., & Sappin-Didier, V. (2017). Predictive statistical modelling of cadmium content in durum wheat grain based on soil parameters. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(25), 20641-20654.
- Vitali, D., Dragojevic, I. V., Sebecic, B., & Validzic, K. (2007). Assessment of toxic and potentially toxic elements in potato and cabbage grown in different locations in Croatia. *Deutsche Lebensmittelrundschau*, 103(9), 424.
- Walkley A., B. I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38.
- Wallnofer, P. R., & Engelhardt, G. (1984). *Schadstoffe, die aus dem Boden aufgenommen werden. Pflanzentoxicologie*. Edited by B. Hock and EF Elstner. Bibliographisches Institut, Mannheim, Germany, 95-117.
- Wayka. (2022, abril 25). Escasez de fertilizantes causará crisis alimentaria en Perú y Gobierno sigue sin ofrecer soluciones. Wayka.pe. Disponible en:



<https://wayka.pe/escasez-de-fertilizantes-causara-crisis-alimentaria-en-peru-y-gobierno-sigue-sin-ofrecer-soluciones/>

- Westfall, D., Sherrod, L., Peairs, F., Poss, D., Hansen, N., Peterson, G., Shaver, T., Larson, K., Thompson, D., & Ahuja, L. (2012). Sustainable dryland agroecosystems management. *Experiment Station Bulletins*, 12-01.
- Wierzbowska, J., Rychcik, B., & Światły, A. (2018). The effect of different production systems on the content of micronutrients and trace elements in potato tubers. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 68(8), 701-708.
- Yang, X., Li, Q., Tang, Z., Zhang, W., Yu, G., Shen, Q., & Zhao, F. J. (2017). Heavy metal concentrations and arsenic speciation in animal manure composts in China. *Waste Management*, 64, 333-339.
- Yang, Y., Wang, M., Chen, W., Li, Y., & Peng, C. (2017). Cadmium accumulation risk in vegetables and rice in Southern China: Insights from solid-solution partitioning and plant uptake factor. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(27), 5463-5469.
- Ye, Y., Dong, W., Luo, Y., Fan, T., Xiong, X., Sun, L., & Hu, X. (2020). Cultivar diversity and organ differences of cadmium accumulation in potato (*Solanum tuberosum* L.) allow the potential for Cd-safe staple food production on contaminated soils. *Science of the Total Environment*, 711, 134534.
- Yi, Z., Lehto, N. J., Robinson, B. H., & Cavanagh, J. A. E. (2020). Environmental and edaphic factors affecting soil cadmium uptake by spinach, potatoes, onion and wheat. *Science of the Total Environment*, 713, 136694.
- Zarzecka, K., Gugala, M., Baranowska, A., Dolega, H., & Sikorska, A. (2016). Concentrations of copper, zinc and manganese in potato tubers under the influence of herbicides. *Journal of Elementology*, 21(1).
- Zebarth, B. J., Moreau, G., Dixon, T., Fillmore, S., Smith, A., Hann, S., & Comeau, L. (2022). Soil properties and topographic features influence within-field variation in potato tuber yield in New Brunswick, Canada. *Soil Science Society of America Journal*, 86(1), 134-145.
- Zhang, Y., Wu, Y., Yang, A., Wang, J., Zhang, K., & Hu, D. (2017). Assessment of cadmium content of potato grown in Weining County, Guizhou Province, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(5).

Zhuang, P., McBride, M. B., Xia, H., Li, N., & Li, Z. (2009). Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China. *Science of The Total Environment*, 407(5), 1551-1561.

VIII. ANEXOS

8.1. Anexo 1: Encuesta para agricultores para la selección de suelos de cultivo de papa de las provincias de Luya y Chachapoyas.

	UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS	
UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA		
ESCUELA DE POSGRADO		
DOCTORADO EN CIENCIAS PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE		
<u>ENCUESTA PARA AGRICULTORES PARA LA SELECCIÓN DE SUELOS DE</u>		
<u>CULTIVO DE PAPA DE LAS PROVINCIAS DE LUYA Y CHACHAPOYAS</u>		
I. ASPECTOS GENERALES		
Nombre del encuestado: _____ Encuesta N° _____		
Fecha: _____ Provincia: _____		
Distrito: _____ Comunidad: _____		
Codificador: _____		
II. ASPECTOS PROPIOS DE LA INVESTIGACIÓN		
2.1. Área de la finca:		
a) 0 a 1 ha b) 1 a 3 ha c) 3 a 5 ha d) mayor a 5 ha.		
2.2. ¿Qué variedad(es) de papa cultiva?		

2.3. ¿Cuál es el rendimiento del cultivo de papa en su parcela? (ton/ha)		

2.4. ¿Cree Ud. que su rendimiento es alto, medio o bajo para la zona?		

2.5. ¿Cuál es la cantidad de años que viene produciendo papa en su parcela?		
a) 1 a 3 años b) 3 a 6 años c) 3 a 9 años d) mayor a 9 años.		
2.6. Antes de sembrar el cultivo, ¿realiza un análisis de fertilidad de suelo?		



a) Si, siempre b) Si, a veces. c) Nunca

2.7. Tipo de fertilizante que utiliza

a) Inorgánico b) orgánico c) a y b d) no utiliza.

2.8. Si utiliza fertilizantes inorgánicos, ¿cuáles son los que más utiliza?

2.9. Si utiliza fertilizantes o enmiendas orgánicas, ¿cuáles son los que más utiliza?

2.10. En el caso que utilice fertilizantes o enmiendas orgánicas ¿alguna vez a realizado un análisis del mismo?

a) Sí b) No

2.11. ¿Cuál es la dosis (kg/ha) que utiliza de cada uno de los fertilizantes?

Fertilizante	Dosis (kg/ha)

2.12. ¿Ud. tiene conocimiento sobre el ingreso de elementos que pueden ser tóxicos a través de la fertilización?



a) Sí b) No

Si su respuesta es "Sí", indique que elemento(s) potencialmente dañino(s) conoce:


2.13. ¿Le gustaría conocer cuál es la necesidad o requerimiento de fósforo (P) exacto de su cultivo?

a) Sí b) No


2.14. ¿Ud. estaría de acuerdo en que su sistema de cultivo sea parte de una investigación académica?

a) Sí b) No

8.2. Anexo 2: Formatos de validación de expertos del instrumento de investigación



UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE
MENDOZA DE AMAZONAS



**UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIAS PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE**

**FORMATO DE VALIDACIÓN DE EXPERTOS DEL INSTRUMENTO DE
INVESTIGACIÓN**

I. INFORMACIÓN GENERAL

- 1.1. Nombres y apellidos del experto: James Tirado Lara
- 1.2. Grado académico: Magister Scientiae
- 1.3. Especialidad: Fitopatología
- 1.4. Institución donde labora: Universidad Nacional de Jaén
- 1.5. Cargo que ocupa: Docente
- 1.6. Denominación del instrumento: Encuesta para agricultores para la selección de suelos de cultivo de papa de las provincias de Luya y Chachapoyas
- 1.7. Doctorando / maestrante: Víctor Hugo Gómez Ramírez
- 1.8. Programa de posgrado: Doctorado en Ciencias para el Desarrollo Sustentable.

II. VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO (Hernández-Nieto, 2002)

Nº de ítem	Indicadores generales	Observaciones	Escala de puntuación				
			1	2	3	4	5
2.1	Coherencia	Puede influenciar, pero estaría en función del muestreo a realizar y de la contaminación antropogénica			x		
	Claridad					x	
	Escala					x	
	Relevancia					x	
2.2	Coherencia	La variedad podría no influenciar en la asimilación de cadmio; sin embargo, esto sería demostrable con otra investigación pero más no con la presente; entendiéndose que su investigación se trata sólo de		x			



		muestrear suelos para determinar cadmio. Sin embargo, si muestrea suelo de las variedades diversas en una misma parcela y mismas características de suelo						
	Claridad	Para obtener indicadores es aceptable						x
	Escala	Para obtener indicadores es aceptable						x
	Relevancia	Para obtener indicadores es aceptable						x
2.3	Coherencia	La presencia de cadmio no influye en el rendimiento, salvo que las investigaciones demuestren lo contrario	x					
	Claridad							x
	Escala							x
	Relevancia	Con las preguntas sí, pero con el objeto de la investigación es distinto			x			
2.4	Coherencia	La presencia de cadmio no influye en el rendimiento, salvo que las investigaciones demuestren lo contrario	x					
	Claridad							x
	Escala							x
	Relevancia	Con las preguntas sí, pero con el objeto de la investigación es distinto			x			
2.5	Coherencia	La presencia de cadmio no influye en el rendimiento, salvo que las investigaciones demuestren lo contrario	x					
	Claridad							x
	Escala							x
	Relevancia	Con las preguntas sí, pero con el objeto de la investigación es distinto			x			
2.6	Coherencia	La presencia de cadmio no influye en el rendimiento, salvo que las	x					



		Investigaciones demuestren lo contrario						
	Claridad							x
	Escala							x
	Relevancia	Con las preguntas si, pero con el objeto de la investigación es distinto			x			
2.7	Coherencia	Si hay relación son el objeto de estudio, toda vez que hay marcadas diferencias en la contaminación antropogénica por el uso de fertilizantes sintéticos			x			
	Claridad							x
	Escala							x
	Relevancia	Si hay relación con el objeto de estudio				x		
2.8	Coherencia	Si hay relación son el objeto de estudio, toda vez que hay marcadas diferencias en la contaminación antropogénica por el uso de fertilizantes sintéticos			x			
	Claridad							x
	Escala							x
	Relevancia	Si hay relación con el objeto de estudio				x		
2.9	Coherencia	Si hay relación son el objeto de estudio, toda vez que hay marcadas diferencias en la contaminación antropogénica por el uso de fertilizantes sintéticos			x			
	Claridad							x
	Escala							x
	Relevancia	Si hay relación con el objeto de estudio				x		
2.10	Coherencia	Puede haber relación con las variables, en el sentido que la mayor o menor concentración de elementos			x			



		químicos influyen en la acumulación de cadmio en el suelo						
	Claridad							x
	Escala							x
	Relevancia				x			
2.11	Coherencia	Puede haber relación con las variables, en el sentido que la mayor o menor dosis del fertilizante influyen en la acumulación de cadmio en el suelo						x
	Claridad							x
	Escala							x
	Relevancia	Las altas dosis de sintéticos tienen relación con la acumulación de cadmio						x
2.12	Coherencia	En los posibles resultados, puede correlacionar con la variable. Por ejemplo, el aplicar dosis de fertilizantes sin criterio técnico puede causar acumulación de cadmio en el suelo				x		
	Claridad							x
	Escala							x
	Relevancia	Las buenas o malas prácticas se relacionan con la variable				x		
2.13	Coherencia	Pues el conocer la dosis NPK no se relaciona con las variables en estudio (concentración de cadmio). Sin embargo si en su investigación demuestra que la dosis recomendada según análisis de suelo, influye en la contaminación de cadmio, cambiaría la calificación de coherencia. Esto siempre y cuando se haga investigación al respecto	x					
	Claridad							x



	Escala	El instrumento es para demostrar, al parecer, concentración de cadmio, pero esta interrogante no tendría mayor implicancia		x				
	Relevancia	No sería relevante, salvo se quiera demostrar en la investigación que el fósforo en dosis exacta ayuda a disminuir cadmio		x				
2.14	Coherencia	Habría relación porque con la investigación se demuestra la influencia de la variable						x
	Claridad							x
	Escala							x
	Relevancia	Se cumpliría con el objetivo de investigar la presencia de cadmio						x

Indicadores generales:

- a) **Coherencia:** El ítem mide alguna variable/categoría que tenga relación de los contenidos con los indicadores de la variable.
- b) **Claridad:** El ítem es claro, no genera confusión o contradicciones.
- c) **Escala:** El ítem puede ser respondido de acuerdo con la escala que presenta el instrumento.
- d) **Relevancia:** El ítem es relevante para cumplir con las preguntas y objetos de la investigación.

Escala de valores:

1 = Inaceptable 2 = Deficiente 3= Regular 4 = Bueno 5 = Excelente

JAMES TIRADO LARA



UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIAS PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE

FORMATO DE VALIDACIÓN DE EXPERTOS DEL INSTRUMENTO DE
INVESTIGACIÓN

I. INFORMACIÓN GENERAL

- 1.1. Nombres y apellidos del experto: Segundo Sanchez Tello
- 1.2. Grado académico: Doctorado en Ciencias
- 1.3. Especialidad: Agronomía
- 1.4. Institución donde labora: Universidad Nacional de Jaén
- 1.5. Cargo que ocupa: Docente Nombrado
- 1.6. Denominación del instrumento: Encuesta para agricultores para la selección de suelos de cultivo de papa de las provincias de Luya y Chachapoyas
- 1.7. Doctorando / maestrante: Víctor Hugo Gómez Ramírez
- 1.8. Programa de posgrado: Doctorado en Ciencias para el Desarrollo Sustentable.

II. VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO (Hernández-Nieto, 2002)

N° de ítem	Indicadores generales	Observaciones	Escala de puntuación				
			1	2	3	4	5
2.1	Coherencia					x	
	Claridad					x	
	Escala					x	
	Relevancia					x	
2.2	Coherencia					x	
	Claridad					x	
	Escala				x		
	Relevancia				x		
2.3	Coherencia					x	
	Claridad					x	
	Escala					x	
	Relevancia					x	



2.4	Coherencia				x	
	Claridad				x	
	Escala			x		
	Relevancia				x	
2.5	Coherencia				x	
	Claridad				x	
	Escala				x	
	Relevancia				x	
2.6	Coherencia					x
	Claridad				x	
	Escala				x	
	Relevancia					x
2.7	Coherencia					x
	Claridad				x	
	Escala				x	
	Relevancia					x
2.8	Coherencia					x
	Claridad				x	
	Escala				x	
	Relevancia					x
2.9	Coherencia					x
	Claridad				x	
	Escala				x	
	Relevancia					x
2.10	Coherencia					x
	Claridad				x	
	Escala				x	
	Relevancia					x
2.11	Coherencia					x
	Claridad				x	
	Escala				x	
	Relevancia					x
2.12	Coherencia					x
	Claridad				x	
	Escala				x	
	Relevancia				x	



2.13	Coherencia						x
	Claridad					x	
	Escala					x	
	Relevancia					x	
2.14	Coherencia						x
	Claridad					x	
	Escala					x	
	Relevancia					x	

Indicadores generales:

- a) **Coherencia:** El ítem mide alguna variable/categoría que tenga relación de los contenidos con los indicadores de la variable.
- b) **Claridad:** El ítem es claro, no genera confusión o contradicciones.
- c) **Escala:** El ítem puede ser respondido de acuerdo con la escala que presenta el instrumento.
- d) **Relevancia:** El ítem es relevante para cumplir con las preguntas y objetos de la investigación.

Escala de valores:

1 = inaceptable 2 = Deficiente 3= Regular 4 = Bueno 5 = Excelente

Dr. Segundo Sánchez Tello
DNI. 27748121



UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIAS PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE

FORMATO DE VALIDACIÓN DE EXPERTOS DEL INSTRUMENTO DE
INVESTIGACIÓN

I. INFORMACIÓN GENERAL

- 1.1. Nombres y apellidos del experto: Walter Ricardo Roncal Briones
- 1.2. Grado académico: Magister Scientiae
- 1.3. Especialidad: Manejo Forestal / Agronomía
- 1.4. Institución donde labora: Universidad Nacional de Cajamarca
- 1.5. Cargo que ocupa: Director de Departamento Académico
- 1.6. Denominación del instrumento: Encuesta para agricultores para la selección de suelos de cultivo de papa de las provincias de Luya y Chachapoyas
- 1.7. Doctorando / maestrante: Víctor Hugo Gómez Ramírez
- 1.8. Programa de posgrado: Doctorado en Ciencias para el Desarrollo Sustentable.

II. VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO (Hernández-Nieto, 2002)

N° de ítem	Indicadores generales	Observaciones	Escala de puntuación				
			1	2	3	4	5
2.1	Coherencia					x	
	Claridad	Podría decir no 0 a 1 ha, sino hasta 1 ha			x		
	Escala					x	
	Relevancia						x
2.2	Coherencia						x
	Claridad						x
	Escala						x
	Relevancia						
2.3	Coherencia					x	
	Claridad					x	
	Escala					x	



	Relevancia					X	
2.4	Coherencia					X	
	Claridad					X	
	Escala					X	
	Relevancia				X		
2.5	Coherencia						X
	Claridad						X
	Escala					X	
	Relevancia						X
2.6	Coherencia						X
	Claridad						X
	Escala					X	
	Relevancia						X
2.7	Coherencia						X
	Claridad						X
	Escala					X	
	Relevancia						X
2.8	Coherencia						X
	Claridad						X
	Escala						X
	Relevancia						X
2.9	Coherencia						X
	Claridad						X
	Escala						X
	Relevancia						X
2.10	Coherencia						X
	Claridad						X
	Escala						X
	Relevancia						X
2.11	Coherencia						X
	Claridad						X
	Escala						X
	Relevancia						X
2.12	Coherencia					X	
	Claridad					X	
	Escala					X	



	Relevancia								X
2.13	Coherencia	Podría ser de los 3 macroelementos						X	
	Claridad							X	
	Escala							X	
	Relevancia							X	
2.14	Coherencia							X	
	Claridad							X	
	Escala							X	
	Relevancia							X	

Indicadores generales:

- a) **Coherencia:** El ítem mide alguna variable/categoría que tenga relación de los contenidos con los indicadores de la variable.
- b) **Claridad:** El ítem es claro, no genera confusión o contradicciones.
- c) **Escala:** El ítem puede ser respondido de acuerdo con la escala que presenta el instrumento.
- d) **Relevancia:** El ítem es relevante para cumplir con las preguntas y objetos de la investigación.

Escala de valores:

1 = inaceptable 2 = Deficiente 3= Regular 4 = Bueno 5 = Excelente



Ing. M.Sc. Walter Roncal Briones

FIRMA DEL EXPERTO

8.4. Anexo 4: Método de digestión de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos 3050B

METHOD 3050B

ACID DIGESTION OF SEDIMENTS, SLUDGES, AND SOILS

1.0 SCOPE AND APPLICATION

1.1 This method has been written to provide two separate digestion procedures, one for the preparation of sediments, sludges, and soil samples for analysis by flame atomic absorption spectrometry (FLAA) or inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) and one for the preparation of sediments, sludges, and soil samples for analysis of samples by Graphite Furnace AA (GFAA) or inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The extracts from these two procedures are not interchangeable and should only be used with the analytical determinations outlined in this section. Samples prepared by this method may be analyzed by ICP-AES or GFAA for all the listed metals as long as the detection limits are adequate for the required end-use of the data. Alternative determinative techniques may be used if they are scientifically valid and the QC criteria of the method, including those dealing with interferences, can be achieved. Other elements and matrices may be analyzed by this method if performance is demonstrated for the analytes of interest, in the matrices of interest, at the concentration levels of interest (See Section 8.0). The recommended determinative techniques for each element are listed below:

<u>FLAA/ICP-AES</u>		<u>GFAA/ICP-MS</u>
Aluminum	Magnesium	Arsenic
Antimony	Manganese	Beryllium
Barium	Molybdenum	Cadmium
Beryllium	Nickel	Chromium
Cadmium	Potassium	Cobalt
Calcium	Silver	Iron
Chromium	Sodium	Lead
Cobalt	Thallium	Molybdenum
Copper	Vanadium	Selenium
Iron	Zinc	Thallium
Lead		
Vanadium		

1.2 This method is not a total digestion technique for most samples. It is a very strong acid digestion that will dissolve almost all elements that could become "environmentally available." By design, elements bound in silicate structures are not normally dissolved by this procedure as they are not usually mobile in the environment. If absolute total digestion is required use Method 3052.

2.0 SUMMARY OF METHOD

2.1 For the digestion of samples, a representative 1-2 gram (wet weight) or 1 gram (dry weight) sample is digested with repeated additions of nitric acid (HNO₃) and hydrogen peroxide (H₂O₂).

2.2 For GFAA or ICP-MS analysis, the resultant digestate is reduced in volume while heating and then diluted to a final volume of 100 mL.

2.3 For ICP-AES or FLAA analyses, hydrochloric acid (HCl) is added to the initial digestate and the sample is refluxed. In an optional step to increase the solubility of some metals (see Section 7.3.1: NOTE), this digestate is filtered and the filter paper and residues are rinsed, first

with hot HCl and then hot reagent water. Filter paper and residue are returned to the digestion flask, refluxed with additional HCl and then filtered again. The digestate is then diluted to a final volume of 100 mL.

2.4 If required, a separate sample aliquot shall be dried for a total percent solids determination.

3.0 INTERFERENCES

3.1 Sludge samples can contain diverse matrix types, each of which may present its own analytical challenge. Spiked samples and any relevant standard reference material should be processed in accordance with the quality control requirements given in Sec. 8.0 to aid in determining whether Method 3050B is applicable to a given waste.

4.0 APPARATUS AND MATERIALS

4.1 Digestion Vessels - 250-mL.

4.2 Vapor recovery device (e.g., ribbed watch glasses, appropriate refluxing device, appropriate solvent handling system).

4.3 Drying ovens - able to maintain $30^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$.

4.4 Temperature measurement device capable of measuring to at least 125°C with suitable precision and accuracy (e.g., thermometer, IR sensor, thermocouple, thermister, etc.)

4.5 Filter paper - Whatman No. 41 or equivalent.

4.6 Centrifuge and centrifuge tubes.

4.7 Analytical balance - capable of accurate weighings to 0.01 g.

4.8 Heating source - Adjustable and able to maintain a temperature of $90\text{--}95^{\circ}\text{C}$. (e.g., hot plate, block digester, microwave, etc.)

4.9 Funnel or equivalent.

4.10 Graduated cylinder or equivalent volume measuring device.

4.11 Volumetric Flasks - 100-mL.

5.0 REAGENTS

5.1 Reagent grade chemicals shall be used in all tests. Unless otherwise indicated, it is intended that all reagents shall conform to the specifications of the Committee on Analytical Reagents of the American Chemical Society, where such specifications are available. Other grades may be used, provided it is first ascertained that the reagent is of sufficiently high purity to permit its use without lessening the accuracy of the determination. If the purity of a reagent is questionable, analyze the reagent to determine the level of impurities. The reagent blank must be less than the MDL in order to be used.

5.2 Reagent Water. Reagent water will be interference free. All references to water in the method refer to reagent water unless otherwise specified. Refer to Chapter One for a definition of reagent water.

5.3 Nitric acid (concentrated), HNO_3 . Acid should be analyzed to determine level of impurities. If method blank is < MDL, the acid can be used.

5.4 Hydrochloric acid (concentrated), HCl . Acid should be analyzed to determine level of impurities. If method blank is < MDL, the acid can be used.

5.5 Hydrogen peroxide (30%), H_2O_2 . Oxidant should be analyzed to determine level of impurities. If method blank is < MDL, the peroxide can be used.

6.0 SAMPLE COLLECTION, PRESERVATION, AND HANDLING

6.1 All samples must have been collected using a sampling plan that addresses the considerations discussed in Chapter Nine of this manual.

6.2 All sample containers must be demonstrated to be free of contamination at or below the reporting limit. Plastic and glass containers are both suitable. See Chapter Three, Section 3.1.3, for further information.

6.3 Nonaqueous samples should be refrigerated upon receipt and analyzed as soon as possible.

6.4 It can be difficult to obtain a representative sample with wet or damp materials. Wet samples may be dried, crushed, and ground to reduce subsample variability as long as drying does not affect the extraction of the analytes of interest in the sample.

7.0 PROCEDURE

7.1 Mix the sample thoroughly to achieve homogeneity and sieve, if appropriate and necessary, using a USS #10 sieve. All equipment used for homogenization should be cleaned according to the guidance in Sec. 6.0 to minimize the potential of cross-contamination. For each digestion procedure, weigh to the nearest 0.01 g and transfer a 1-2 g sample (wet weight) or 1 g sample (dry weight) to a digestion vessel. For samples with high liquid content, a larger sample size may be used as long as digestion is completed.

NOTE: All steps requiring the use of acids should be conducted under a fume hood by properly trained personnel using appropriate laboratory safety equipment. The use of an acid vapor scrubber system for waste minimization is encouraged.

7.2 For the digestion of samples for analysis by GFAA or ICP-MS, add 10 mL of 1:1 HNO_3 , mix the slurry, and cover with a watch glass or vapor recovery device. Heat the sample to $95^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ and reflux for 10 to 15 minutes without boiling. Allow the sample to cool, add 5 mL of concentrated HNO_3 , replace the cover, and reflux for 30 minutes. If brown fumes are generated, indicating oxidation of the sample by HNO_3 , repeat this step (addition of 5 mL of conc. HNO_3) over and over until no brown fumes are given off by the sample indicating the complete reaction with HNO_3 . Using a ribbed watch glass or vapor recovery system, either allow the solution to evaporate to approximately 5 mL without boiling or heat at $95^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ without boiling for two hours. Maintain a covering of solution over the bottom of the vessel at all times.

NOTE: Alternatively, for direct energy coupling devices, such as a microwave, digest samples for analysis by GFAA or ICP-MS by adding 10 mL of 1:1 HNO₃, mixing the slurry and then covering with a vapor recovery device. Heat the sample to 95°C ± 5°C and reflux for 5 minutes at 95°C ± 5°C without boiling. Allow the sample to cool for 5 minutes, add 5 mL of concentrated HNO₃, heat the sample to 95°C ± 5°C and reflux for 5 minutes at 95°C ± 5°C. If brown fumes are generated, indicating oxidation of the sample by HNO₃, repeat this step (addition of 5 mL concentrated HNO₃) until no brown fumes are given off by the sample indicating the complete reaction with HNO₃. Using a vapor recovery system, heat the sample to 95°C ± 5°C and reflux for 10 minutes at 95°C ± 5°C without boiling.

7.2.1 After the step in Section 7.2 has been completed and the sample has cooled, add 2 mL of water and 3 mL of 30% H₂O₂. Cover the vessel with a watch glass or vapor recovery device and return the covered vessel to the heat source for warming and to start the peroxide reaction. Care must be taken to ensure that losses do not occur due to excessively vigorous effervescence. Heat until effervescence subsides and cool the vessel.

NOTE: Alternatively, for direct energy coupled devices: After the Sec. 7.2 "NOTE" step has been completed and the sample has cooled for 5 minutes, add slowly 10 mL of 30% H₂O₂. Care must be taken to ensure that losses do not occur due to excessive vigorous effervescence. Go to Section 7.2.3.

7.2.2 Continue to add 30% H₂O₂ in 1-mL aliquots with warming until the effervescence is minimal or until the general sample appearance is unchanged.

NOTE: Do not add more than a total of 10 mL 30% H₂O₂.

7.2.3 Cover the sample with a ribbed watch glass or vapor recovery device and continue heating the acid-peroxide digestate until the volume has been reduced to approximately 5 mL or heat at 95°C ± 5°C without boiling for two hours. Maintain a covering of solution over the bottom of the vessel at all times.

NOTE: Alternatively, for direct energy coupled devices: Heat the acid-peroxide digestate to 95°C ± 5°C in 8 minutes and remain at 95°C ± 5°C without boiling for 10 minutes.

7.2.4 After cooling, dilute to 100 mL with water. Particulates in the digestate should then be removed by filtration, by centrifugation, or by allowing the sample to settle. The sample is now ready for analysis by GFAA or ICP-MS.

7.2.4.1 Filtration - Filter through Whatman No. 41 filter paper (or equivalent).

7.2.4.2 Centrifugation - Centrifugation at 2,000-3,000 rpm for 10 minutes is usually sufficient to clear the supernatant.

7.2.4.3 The diluted digestate solution contains approximately 5% (v/v) HNO₃. For analysis, withdraw aliquots of appropriate volume and add any required reagent or matrix modifier.

7.3 For the analysis of samples for FLAA or ICP-AES, add 10 mL conc. HCl to the sample digest from 7.2.3 and cover with a watch glass or vapor recovery device. Place the sample on/in the heating source and reflux at 95°C ± 5°C for 15 minutes.

NOTE: Alternatively, for direct energy coupling devices, such as a microwave, digest samples for analysis by FLAA and ICP-AES by adding 5 mL HCl and 10 mL H₂O to the sample digest from 7.2.3 and heat the sample to 95°C ± 5°C, Reflux at 95°C ± 5°C without boiling for 5 minutes.

7.4 Filter the digestate through Whatman No. 41 filter paper (or equivalent) and collect filtrate in a 100-mL volumetric flask. Make to volume and analyze by FLAA or ICP-AES.

NOTE: Section 7.5 may be used to improve the solubilities and recoveries of antimony, barium, lead, and silver when necessary. These steps are optional and are not required on a routine basis.

7.5 Add 2.5 mL conc. HNO₃ and 10 mL conc. HCl to a 1-2 g sample (wet weight) or 1 g sample (dry weight) and cover with a watchglass or vapor recovery device. Place the sample on/in the heating source and reflux for 15 minutes.

7.5.1 Filter the digestate through Whatman No. 41 filter paper (or equivalent) and collect filtrate in a 100-mL volumetric flask. Wash the filter paper, while still in the funnel, with no more than 5 mL of hot (~95°C) HCl, then with 20 mL of hot (~95°C) reagent water. Collect washings in the same 100-mL volumetric flask.

7.5.2 Remove the filter and residue from the funnel, and place them back in the vessel. Add 5 mL of conc. HCl, place the vessel back on the heating source, and heat at 95°C ± 5°C until the filter paper dissolves. Remove the vessel from the heating source and wash the cover and sides with reagent water. Filter the residue and collect the filtrate in the same 100-mL volumetric flask. Allow filtrate to cool, then dilute to volume.

NOTE: High concentrations of metal salts with temperature-sensitive solubilities can result in the formation of precipitates upon cooling of primary and/or secondary filtrates. If precipitation occurs in the flask upon cooling, do not dilute to volume.

7.5.3 If a precipitate forms on the bottom of a flask, add up to 10 mL of concentrated HCl to dissolve the precipitate. After precipitate is dissolved, dilute to volume with reagent water. Analyze by FLAA or ICP-AES.

7.6 Calculations

7.6.1 The concentrations determined are to be reported on the basis of the actual weight of the sample. If a dry weight analysis is desired, then the percent solids of the sample must also be provided.

7.6.2 If percent solids is desired, a separate determination of percent solids must be performed on a homogeneous aliquot of the sample.

8.0 QUALITY CONTROL

8.1 All quality control measures described in Chapter One should be followed.

8.2 For each batch of samples processed, a method blank should be carried throughout the entire sample preparation and analytical process according to the frequency described in Chapter One. These blanks will be useful in determining if samples are being contaminated. Refer to Chapter One for the proper protocol when analyzing method blanks.

8.3 Spiked duplicate samples should be processed on a routine basis and whenever a new sample matrix is being analyzed. Spiked duplicate samples will be used to determine precision and bias. The criteria of the determinative method will dictate frequency, but 5% (one per batch) is recommended or whenever a new sample matrix is being analyzed. Refer to Chapter One for the proper protocol when analyzing spiked replicates.

8.4 Limitations for the FLAA and ICP-AES optional digestion procedure. Analysts should be aware that the upper linear range for silver, barium, lead, and antimony may be exceeded with some samples. If there is a reasonable possibility that this range may be exceeded, or if a sample's analytical result exceeds this upper limit, a smaller sample size should be taken through the entire procedure and re-analyzed to determine if the linear range has been exceeded. The approximate linear upper ranges for a 2 gram sample size:

Ag	2,000 mg/kg
As	1,000,000 mg/kg
Ba	2,500 mg/kg
Be	1,000,000 mg/kg
Cd	1,000,000 mg/kg
Co	1,000,000 mg/kg
Cr	1,000,000 mg/kg
Cu	1,000,000 mg/kg
Mo	1,000,000 mg/kg
Ni	1,000,000 mg/kg
Pb	200,000 mg/kg
Sb	200,000 mg/kg
Se	1,000,000 mg/kg
Tl	1,000,000 mg/kg
V	1,000,000 mg/kg
Zn	1,000,000 mg/kg

NOTE: These ranges will vary with sample matrix, molecular form, and size.

9.0 METHOD PERFORMANCE

9.1 In a single laboratory, the recoveries of the three matrices presented in Table 2 were obtained using the digestion procedure outlined for samples prior to analysis by FLAA and ICP-AES. The spiked samples were analyzed in duplicate. Tables 3-5 represents results of analysis of NIST Standard Reference Materials that were obtained using both atmospheric pressure microwave digestion techniques and hot-plate digestion procedures.

10.0 REFERENCES

1. Rohrbough, W.G.; et al. Reagent Chemicals, American Chemical Society Specifications, 7th ed.; American Chemical Society: Washington, DC, 1986.
2. 1985 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 11.01; "Standard Specification for Reagent Water"; ASTM: Philadelphia, PA, 1985; D1193-77.
3. Edgell, K.; USEPA Method Study 37 - SW-846 Method 3050 Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils, EPA Contract No. 68-03-3254, November 1988.

4. Kimbrough, David E., and Wakakuwa, Janice R. Acid Digestion for Sediments, Sludges, Soils, and Solid Wastes. A Proposed Alternative to EPA SW 846 Method 3050. Environmental Science and Technology, Vol. 23, Page 898, July 1989.
5. Kimbrough, David E., and Wakakuwa, Janice R. Report of an Interlaboratory Study Comparing EPA SW 846 Method 3050 and an Alternative Method from the California Department of Health Services. Fifth Annual Waste Testing and Quality Assurance Symposium, Volume I, July 1989. Reprinted in Solid Waste Testing and Quality Assurance: Third Volume, ASTM STP 1075, Page 231, C.E. Tatch, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1991.
6. Kimbrough, David E., and Wakakuwa, Janice R. A Study of the Linear Ranges of Several Acid Digestion Procedures. Environmental Science and Technology, Vol. 26, Page 173, January 1992. Presented Sixth Annual Waste Testing and Quality Assurance Symposium, July 1990.
7. Kimbrough, David E., and Wakakuwa, Janice R. A Study of the Linear Ranges of Several Acid Digestion Procedures. Sixth Annual Waste Testing and Quality Assurance Symposium, Reprinted in Solid Waste Testing and Quality Assurance: Fourth Volume, ASTM STP 1076, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992.
8. NIST published leachable concentrations. Found in addendum to certificate of analysis for SRMs 2709, 2710, 2711 - August 23, 1993.
9. Kingston, H.M. Haswell, S.J. ed., Microwave Enhanced Chemistry, Professional Reference Book Series, American Chemical Society, Washington, D.C., Chapter 3, 1997.

8.5. Anexo 5: Ficha técnica de fertilizante utilizado en el cultivo de papa



Ficha Técnica
Fertilizantes Compuestos
Mezclas ESPECÍFICAS

MOLIMAX PAPA SIERRA
NPK 15-25-15+2MgO+3S

Composición:	CO(NH ₂) ₂ , (NH ₄) ₂ HPO ₄ , KCl, K ₂ SO ₄ , 2MgSO ₄
Aspecto:	Mezcla física de gránulos blancos, marrón claro a oscuro o negro, rojos y cristalinos o vidriosos.
Nitrógeno (N):	15%
Fósforo (P ₂ O ₅):	25%
Potasio (K ₂ O):	15%
Magnesio (MgO):	2%
Azufre (S):	3 %
Presentación:	Bolsas polietileno de 50 kg.
Uso:	Fertilizante para aplicación directa al Suelo.



ÁREA TÉCNICA

www.molinoscia.com

ventasmolinos@molicom.com.pe

LIMA: Av. Los Ingenieros 154, Urb. Santa Raquel 2da Etapa, Ate - Lima
Central Telefónica: (01) 512 3370 // Fax: (01) 348 0637 / (01) 348 0615

8.6. Anexo 6: Fichas técnicas individuales de los fertilizantes que forman parte de la mezcla comercial Molimax papa sierra.

 <p style="text-align: right;">Ficha Técnica Fertilizantes Nitrogenados</p> <h2 style="text-align: center; background-color: #006633; color: white; padding: 5px;">UREA AGRÍCOLA</h2> <p>Composición: $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$</p> <p>Aspecto: Gránulos blancos.</p> <p>Solubilidad (aproximada a 20°C): 105kg en 100 L de agua pura.</p> <p>Nitrógeno Total (N): 46 %</p> <p>Presentación: Bolsas de polietileno de 50kg.</p> <p>Uso: Fertilizante para aplicación directa al suelo y fertirriego.</p>	 <p style="text-align: right;">Ficha Técnica Fertilizantes Fosfatados</p> <h2 style="text-align: center; background-color: #006633; color: white; padding: 5px;">FOSFATO DIAMÓNICO (DAP)</h2> <p>Composición: $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$</p> <p>Aspecto: Gránulos opacos, oscuros, pardos, negros, o grises</p> <p>Solubilidad (aprox.): 66kg en 100 litros de agua a 20°C.</p> <p>Nitrógeno (N): 18%.</p> <p>Fósforo (P_2O_5): 46%</p> <p>Presentación: Bolsa polietileno de 50kg.</p> <p>Uso: Fertilizante para aplicación directa al suelo.</p>
 <p style="text-align: right;">Ficha Técnica Fertilizantes Potásicos</p> <h2 style="text-align: center; background-color: #006633; color: white; padding: 5px;">CLORURO DE POTASIO ROJO</h2> <p>Composición: KCl</p> <p>Aspecto: Gránulos rojos y cristalinos.</p> <p>Solubilidad (aprox.): 35kg en 100 litros de agua a 20° C.</p> <p>Potasio (K_2O): 60%.</p> <p>Presentación: Estándar y Granular.</p> <p>Bolsa polietileno de 50kg.</p> <p>Uso: Fertilizante para aplicación directa al suelo.</p>	 <p style="text-align: right;">Ficha Técnica Fertilizantes Magnésicos</p> <h2 style="text-align: center; background-color: #006633; color: white; padding: 5px;">SULPOMAG K-Mag®</h2> <p>Composición: $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4$</p> <p>Aspecto: Cristales.</p> <p>Solubilidad (aprox.): 24.4kg en 100 litros a 25°C.</p> <p>Potasio (K_2O): 22%.</p> <p>Magnesio (MgO): 18%.</p> <p>Azufre (S) 22%.</p> <p>Presentación: Estándar, Granular y Premium Bolsa polietileno de 50kg.</p> <p>Uso: Fertilizante para aplicación directa al suelo.</p>

8.7. Anexo 07: Datos de las propiedades fisicoquímicas de suelos para cultivo de papa de la región Amazonas.

Parte I:

Código muestra	pH (1:1)	pH (1:2.5)	C.E (dS/m) (1:1)	C.E (dS/m) (1:2.5)	MO (%)	C (%)	N (%)	P Olsen (ppm)	K (ppm)
S-01	4,61	4,72	0,35	0,19	6,44	3,73	0,32	7,67	261,70
S-02	5,29	5,50	0,17	0,09	6,44	3,73	0,32	3,21	273,94
S-03	5,10	5,33	0,26	0,15	6,44	3,73	0,32	13,41	220,70
S-04	5,85	6,12	0,44	0,23	7,36	4,27	0,37	4,69	423,79
S-05	5,20	5,27	0,10	0,07	7,43	4,31	0,37	10,65	529,96
S-06	6,54	6,84	0,70	0,58	6,44	3,73	0,32	1,71	326,07
S-07	5,47	5,63	0,13	0,07	7,51	4,36	0,37	4,78	336,29
S-08	5,87	6,08	0,09	0,05	5,52	3,20	0,28	1,68	103,28
S-09	7,64	7,72	0,28	0,16	4,60	2,67	0,23	43,39	254,73
S-10	5,57	5,71	0,37	0,19	5,52	3,20	0,28	55,70	164,91
S-11	5,73	5,86	0,83	0,43	5,52	3,20	0,28	102,93	231,09
S-12	6,35	6,41	0,29	0,13	4,60	2,67	0,23	74,68	16,54
S-13	5,46	5,51	0,32	0,17	6,52	3,78	0,33	64,74	160,11
S-14	7,73	7,94	0,57	0,29	6,03	3,50	0,30	17,19	261,29
S-15	8,11	8,19	0,42	0,19	5,17	3,00	0,26	22,07	434,67
S-16	5,92	5,88	0,19	0,07	6,98	4,05	0,35	9,53	246,89
S-17	4,51	4,48	0,11	0,07	6,90	4,00	0,34	25,91	296,15
S-18	4,32	4,31	0,18	0,13	7,04	4,08	0,35	49,48	289,47
S-19	4,70	4,73	0,10	0,07	6,75	3,92	0,34	18,35	501,95
S-20	6,06	6,16	0,23	0,09	6,90	4,00	0,34	57,76	582,72
S-21	5,33	5,38	0,18	0,09	5,17	3,00	0,26	33,00	313,95
S-22	7,18	6,84	0,26	0,12	6,87	3,98	0,34	39,93	83,42
S-23	5,25	5,22	0,12	0,05	7,00	4,06	0,35	34,22	73,60
S-24	5,37	5,96	0,12	0,07	6,13	3,56	0,31	6,34	347,32
S-25	4,56	4,95	0,11	0,07	6,15	3,57	0,31	28,89	119,24
S-26	4,92	5,32	0,09	0,06	5,23	3,03	0,26	12,75	186,36
S-27	5,60	5,90	0,13	0,07	5,17	3,00	0,26	3,50	194,98
S-28	4,99	5,41	0,10	0,06	6,90	4,00	0,34	53,07	230,09
S-29	4,90	5,15	0,16	0,10	5,44	3,16	0,27	32,77	250,35
S-30	5,63	6,09	0,19	0,08	3,06	1,78	0,15	27,26	296,53
S-31	7,79	8,29	0,33	0,18	1,53	0,89	0,08	34,61	368,90
S-32	5,25	5,42	0,15	0,08	6,90	4,00	0,34	39,25	160,13
S-33	5,24	5,39	0,11	0,06	5,75	3,33	0,29	14,82	124,83
S-34	5,75	5,78	0,07	0,04	5,75	3,33	0,29	53,78	100,79
S-35	5,37	5,44	0,09	0,05	5,75	3,33	0,29	51,50	103,36
S-36	5,50	5,69	0,05	0,03	5,75	3,33	0,29	5,68	237,94
S-37	5,76	5,86	0,03	0,02	5,75	3,33	0,29	58,36	66,84

S-38	5,79	5,90	0,09	0,05	5,75	3,33	0,29	44,61	117,75
S-39	5,75	6,00	0,04	0,03	3,45	2,00	0,17	2,41	174,57
S-40	5,62	5,89	0,05	0,03	4,60	2,67	0,23	4,69	286,88

Propiedades fisicoquímicas de los suelos de cultivo de papa en la región Amazonas (parte 2).

Código	C.I.C. (meq/100g)	Ca²⁺ (meq/100g)	Mg²⁺ (meq/100g)	K⁺ (meq/100g)	Na⁺ (meq/100g)	Al³⁺ + H⁺ (meq/100g)
S-01	8,00	1,70	0,64	0,76	0,00	0,44
S-02	12,00	7,80	1,15	0,84	0,15	0,00
S-03	10,40	5,40	0,67	0,71	0,08	0,00
S-04	29,33	24,92	1,27	0,98	0,13	0,00
S-05	8,00	4,09	0,96	1,26	0,12	0,00
S-06	36,53	32,94	1,18	0,75	0,20	0,00
S-07	14,40	10,28	1,44	0,85	0,17	0,00
S-08	9,60	5,93	0,74	0,39	0,20	0,00
S-09	18,99	17,31	0,86	0,60	0,22	0,00
S-10	12,00	8,04	0,99	0,48	0,21	0,00
S-11	16,00	11,58	1,21	0,55	0,16	0,00
S-12	11,20	6,53	0,57	0,26	0,23	0,00
S-13	16,00	13,44	0,59	0,40	0,21	0,00
S-14	36,30	31,86	3,85	0,42	0,18	0,00
S-15	34,43	32,48	1,04	0,73	0,18	0,00
S-16	30,40	25,45	0,79	0,63	0,20	0,00
S-17	8,00	1,70	0,48	0,67	0,18	1,13
S-18	7,20	1,64	0,32	0,79	0,21	0,21
S-19	11,20	1,95	0,24	1,27	0,19	1,80
S-20	28,00	24,41	1,38	1,43	0,25	0,00
S-21	19,73	7,62	0,87	0,70	0,20	0,00
S-22	31,20	22,07	5,40	0,18	0,20	0,00
S-23	8,00	4,16	0,28	0,17	0,23	0,23
S-24	16,27	10,13	2,24	0,82	0,25	0,00
S-25	8,00	1,90	0,61	0,29	0,28	0,80
S-26	10,40	4,32	1,30	0,44	0,26	0,14
S-27	16,80	10,61	2,59	0,41	0,27	0,00
S-28	11,20	6,92	0,62	0,49	0,24	0,16
S-29	8,00	3,32	0,58	0,47	0,20	0,12
S-30	27,20	23,05	1,43	0,52	0,24	0,00
S-31	25,93	24,14	0,81	0,72	0,25	0,00
S-32	9,60	4,31	0,48	0,39	0,17	0,19
S-33	9,60	3,96	0,35	0,26	0,15	0,40
S-34	8,00	3,29	0,30	0,24	0,16	0,00

S-35	8,00	1,77	0,25	0,24	0,16	0,11
S-36	16,00	7,64	0,61	0,61	0,07	0,00
S-37	12,00	6,22	0,14	0,41	0,34	0,00
S-38	24,00	14,68	0,88	0,32	0,15	0,00
S-39	24,00	11,67	1,26	0,47	0,05	0,00
S-40	20,00	10,30	1,17	0,79	0,24	0,00

Propiedades fisicoquímicas de los suelos de cultivo de papa en la región Amazonas (parte 3).

Código	Suma cationes (meq/100g)	Suma Bases (meq/100g)	% de saturación de bases	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
S-01	3,55	3,10	38,79	56,00	24,67	19,33
S-02	9,94	9,94	82,84	65,33	22,67	12,00
S-03	6,85	6,85	65,88	66,00	21,33	12,67
S-04	27,30	27,30	93,07	60,00	16,00	24,00
S-05	6,43	6,43	80,36	61,33	20,67	18,00
S-06	35,07	35,07	95,99	57,33	12,67	30,00
S-07	12,73	12,73	88,44	79,33	12,67	8,00
S-08	7,25	7,25	75,50	63,33	26,67	10,00
S-09	18,99	18,99	100,00	68,67	17,33	14,00
S-10	9,73	9,73	81,11	55,33	34,67	10,00
S-11	13,50	13,50	84,37	55,33	32,00	12,67
S-12	7,59	7,59	67,78	71,33	16,00	12,67
S-13	14,64	14,64	91,47	64,00	20,33	15,67
S-14	36,30	36,30	100,00	33,33	18,00	48,67
S-15	34,43	34,43	100,00	20,00	18,67	61,33
S-16	27,06	27,06	89,01	39,33	22,67	38,00
S-17	4,16	3,03	37,88	44,00	25,33	30,67
S-18	3,16	2,95	40,97	57,33	24,67	18,00
S-19	5,46	3,66	32,67	54,00	16,67	29,33
S-20	27,47	27,47	98,10	36,67	22,00	41,33
S-21	9,40	9,40	47,63	38,67	32,00	29,33
S-22	27,85	27,85	89,27	63,33	22,33	14,33
S-23	5,06	4,84	60,45	67,33	21,67	11,00
S-24	13,44	13,44	82,63	68,67	20,00	11,33
S-25	3,88	3,08	38,50	80,00	8,00	12,00
S-26	6,46	6,32	60,82	60,67	27,33	12,00
S-27	13,88	13,88	82,61	74,00	16,67	9,33
S-28	8,43	8,27	73,88	65,33	22,67	12,00
S-29	4,69	4,57	57,17	66,67	23,67	9,67
S-30	25,24	25,24	92,78	56,00	31,33	12,67
S-31	25,93	25,93	100,00	56,67	35,33	8,00

S-32	5,55	5,36	55,82	62,67	22,00	15,33
S-33	5,11	4,71	49,05	53,33	23,00	23,67
S-34	3,99	3,99	49,88	74,33	14,67	11,00
S-35	2,53	2,42	30,22	81,33	8,67	10,00
S-36	8,93	8,93	55,79	54,67	23,33	22,00
S-37	7,10	7,10	59,20	63,33	20,00	16,67
S-38	16,02	16,02	66,76	52,00	28,67	19,33
S-39	13,45	13,45	56,06	43,33	29,00	27,67
S-40	12,50	12,50	62,49	43,33	26,00	30,67

Concentración de elementos traza en suelos de cultivo de papa de la región Amazonas

Código de muestra	Cd (mg kg⁻¹)	Pb (mg kg⁻¹)	Cu (mg kg⁻¹)	Zn (mg kg⁻¹)
S-01	0,00	47,53	24,89	72,97
S-02	0,00	244,88	74,11	194,49
S-03	0,00	25,67	4,35	21,40
S-04	0,00	41,61	11,18	32,31
S-05	0,00	48,14	7,39	37,90
S-06	0,00	61,30	9,04	65,08
S-07	0,00	43,64	8,37	82,72
S-08	0,00	34,78	4,70	46,63
S-09	1,60	260,29	16,72	618,01
S-10	0,00	160,50	42,65	146,08
S-11	0,56	623,51	28,71	819,49
S-12	0,00	391,35	19,86	399,28
S-13	0,36	159,40	13,63	625,64
S-14	0,00	76,60	7,25	29,65
S-15	0,00	45,95	7,66	33,04
S-16	0,00	71,72	9,55	73,41
S-17	0,00	25,75	6,74	9,87
S-18	0,00	28,10	4,05	7,25
S-19	0,00	67,46	8,71	59,67
S-20	0,00	39,39	10,86	43,95
S-21	0,00	69,18	46,11	233,04
S-22	0,00	287,82	32,39	346,79
S-23	1,06	139,05	6,50	252,27
S-24	0,00	0,00	42,42	83,80
S-25	0,00	38,05	38,16	74,07
S-26	0,00	43,20	62,50	106,08
S-27	0,00	47,65	57,55	54,78
S-28	0,57	50,87	20,54	244,59

S-29	0,00	210,52	15,10	135,32
S-30	0,00	69,05	6,47	46,47
S-31	0,00	75,46	6,77	127,64
S-32	0,00	151,29	6,84	138,51
S-33	0,00	183,50	7,20	140,40
S-34	0,00	92,94	11,27	206,61
S-35	0,00	136,43	12,95	307,42
S-36	0,00	30,32	19,75	105,06
S-37	1,48	46,14	22,00	301,99
S-38	4,03	174,66	14,81	484,38
S-39	0,00	37,57	13,52	121,85
S-40	0,00	27,79	24,38	287,27

8.8. Anexo 08: Límites de detección y porcentajes de recuperación

Elemento	Límite de detección (mg kg ⁻¹)	Porcentaje de recuperación		
		1 mg kg ⁻¹	5 mg kg ⁻¹	20 mg kg ⁻¹
Cadmio	0,13	92,3 - 97,3 %	90,4 - 97,2 %	---
Plomo	0,61	90,7 - 97,7 %	90,1 - 99,1 %	---
Cobre	2,39	---	93,4 - 98,6 %	94,2 - 99,5 %
Zinc	0,13	---	91,4 - 98,0 %	92,3 - 97,9 %

8.9. Anexo 09: Límites de detección para la determinación de ETs disponibles en suelos.

Elemento	Límite de detección (mg kg ⁻¹)
Cadmio	0,06
Plomo	2,99
Cobre	0,73
Zinc	0,20

8.10. Anexo 10: Límites de detección para la determinación de ETs en vegetales.

Elemento	Límite de detección (mg kg⁻¹)
Cadmio	0,39
Plomo	0,77
Cobre	0,65
Zinc	1,45

8.11. Anexo 11: Datos completos de las concentraciones de Pb, Cu y Zn en las diferentes partes de la planta de papa variedad huayro de las parcelas seleccionadas.

Plomo en las diferentes partes de la planta de papa variedad huayro de las parcelas seleccionadas.

Suelo	Raíz (mg kg⁻¹)	Tallo (mg kg⁻¹)	Hoja (mg kg⁻¹)	Tubérculo (mg kg⁻¹)	Cáscara (mg kg⁻¹)
SS01-01	20,08	22,58	28,40	12,62	14,23
SS01-02	21,15	22,51	24,08	14,96	13,09
SS01-03	19,42	24,31	23,88	15,20	13,80
SS02-01	39,67	26,20	24,89	15,85	16,72
SS02-02	40,36	29,79	25,90	14,55	13,55
SS02-03	45,71	33,57	33,86	15,48	16,32
SS03-01	18,70	25,80	29,10	13,60	15,80
SS03-02	18,40	21,35	24,52	13,95	13,28
SS03-03	22,30	21,75	23,90	13,71	14,67
SS04-01	17,01	22,44	20,41	14,16	15,39
SS04-02	20,23	23,79	22,62	14,20	14,49
SS04-03	22,47	23,07	24,76	14,98	14,77
SS05-01	24,69	20,98	23,58	16,34	16,87
SS05-02	25,03	21,29	23,02	15,53	17,41
SS05-03	24,06	22,13	20,37	16,35	17,74
SS06-01	31,02	21,73	24,07	14,68	15,31
SS06-02	32,04	23,41	23,96	15,17	16,61
SS06-03	31,52	26,00	25,18	11,94	17,03

Cobre en las diferentes partes de la planta de papa variedad huayro de las parcelas seleccionadas.

Suelo	Raíz (mg kg⁻¹)	Tallo (mg kg⁻¹)	Hoja (mg kg⁻¹)	Tubérculo (mg kg⁻¹)	Cáscara (mg kg⁻¹)
SS01-01	8,35	8,53	9,73	5,89	5,14
SS01-02	8,28	7,86	7,83	6,37	3,87
SS01-03	5,78	6,46	6,67	7,98	4,20
SS02-01	11,41	10,83	10,65	9,79	7,21
SS02-02	13,77	16,64	14,55	8,00	6,94
SS02-03	16,70	15,42	13,43	8,54	7,32
SS03-01	6,33	6,45	7,99	6,84	3,19
SS03-02	5,70	5,93	5,35	4,86	3,38
SS03-03	4,32	4,53	5,93	4,49	3,55
SS04-01	3,83	3,50	5,05	5,68	3,21
SS04-02	4,00	2,90	4,61	6,00	3,24
SS04-03	5,10	3,48	4,50	5,87	3,48
SS05-01	7,16	6,41	7,98	7,57	6,29
SS05-02	7,38	6,38	7,96	6,62	6,90
SS05-03	5,97	5,88	7,05	5,44	5,52
SS06-01	4,98	4,00	4,29	2,22	2,99
SS06-02	7,57	6,62	5,79	3,52	3,88
SS06-03	6,62	6,28	5,69	2,62	3,93

Zinc en las diferentes partes de la planta de papa variedad huayro de las parcelas seleccionadas.

Suelo	Raíz (mg kg⁻¹)	Tallo (mg kg⁻¹)	Hoja (mg kg⁻¹)	Tubérculo (mg kg⁻¹)	Cáscara (mg kg⁻¹)
SS01-01	49,18	46,01	73,39	6,61	11,32
SS01-02	60,41	54,45	52,17	6,48	11,80
SS01-03	51,42	48,38	46,34	5,94	10,00
SS02-01	79,78	107,50	43,60	13,26	17,56
SS02-02	92,14	118,89	50,37	11,08	19,36
SS02-03	89,89	115,93	49,55	14,85	21,05
SS03-01	50,42	48,98	77,85	6,20	15,72
SS03-02	49,90	45,79	86,54	4,81	12,69
SS03-03	49,14	45,23	86,53	4,59	13,06
SS04-01	110,06	127,82	229,24	15,42	20,55
SS04-02	180,19	207,00	262,57	13,81	22,92
SS04-03	161,13	174,22	250,14	16,07	23,61
SS05-01	131,76	168,90	77,36	16,07	12,44
SS05-02	177,41	230,77	88,26	17,36	14,71

SS05-03	168,34	218,13	81,13	18,29	15,54
SS06-01	94,06	130,56	150,77	13,97	13,51
SS06-02	129,24	190,79	173,79	11,80	13,39
SS06-03	197,28	251,18	163,87	15,58	15,78

8.12. Anexo 12: Datos de la materia seca en las plantas de papa variedad huayro de las parcelas seleccionadas.

Materia seca en los diferentes órganos de las plantas y materia seca total de las plantas seleccionadas.

Suelo	Raíz (g/planta)	Tallo (g/planta)	Hoja (g/planta)	Cáscara (g/planta)	Tubérculo (g/planta)	Materia seca total (g/planta)
SS01-01	2,92	16,82	17,50	32,54	315,51	385,29
SS01-02	2,71	13,71	18,70	33,17	282,12	350,42
SS01-03	2,16	16,50	16,20	43,44	323,79	402,09
SS02-01	2,13	12,02	19,00	23,54	181,07	237,76
SS02-02	1,85	5,86	15,00	23,01	141,74	187,46
SS02-03	1,27	7,13	12,67	18,80	138,77	178,65
SS03-01	4,71	16,25	29,10	33,95	327,61	411,62
SS03-02	4,05	10,93	24,18	29,99	301,76	370,91
SS03-03	5,28	21,49	33,49	42,53	398,78	501,58
SS04-01	6,47	27,84	30,41	28,71	242,45	335,89
SS04-02	4,57	14,81	21,96	20,03	161,55	222,93
SS04-03	5,55	19,67	26,40	24,56	185,65	261,83
SS05-01	3,57	16,15	26,95	22,12	286,15	354,94
SS05-02	4,05	10,79	23,70	18,72	196,69	253,95
SS05-03	3,92	10,31	18,85	17,17	148,66	198,90
SS06-01	5,84	11,73	22,84	27,91	338,99	407,31
SS06-02	8,12	16,12	28,55	28,41	411,94	493,14
SS06-03	6,12	14,98	25,58	29,65	384,77	461,10

Porcentaje de masa seca en los diferentes órganos de una planta de papa variedad huayro.

Suelo	Raíz (%)	Tallo (%)	Hoja (%)	Cáscara (%)	Tubérculo (%)
SS01-01	0,76	4,36	4,54	8,45	81,89
SS01-02	0,77	3,91	5,34	9,47	80,51
SS01-03	0,54	4,10	4,03	10,80	80,53
SS02-01	0,90	5,06	7,99	9,90	76,16
SS02-02	0,99	3,12	8,00	12,28	75,61
SS02-03	0,71	3,99	7,09	10,53	77,68
SS03-01	1,14	3,95	7,07	8,25	79,59
SS03-02	1,09	2,95	6,52	8,09	81,36
SS03-03	1,05	4,28	6,68	8,48	79,51
SS04-01	1,93	8,29	9,05	8,55	72,18
SS04-02	2,05	6,64	9,85	8,99	72,47
SS04-03	2,12	7,51	10,08	9,38	70,91
SS05-01	1,01	4,55	7,59	6,23	80,62
SS05-02	1,59	4,25	9,33	7,37	77,45
SS05-03	1,97	5,18	9,48	8,63	74,74
SS06-01	1,43	2,88	5,61	6,85	83,23
SS06-02	1,65	3,27	5,79	5,76	83,54
SS06-03	1,33	3,25	5,55	6,43	83,45

Rendimiento en masa por hectárea de las parcelas seleccionadas de cultivo de papa variedad huayro.

Suelo	Masa muestra* (kg)	Rendimiento fresco (kg/ha)	Rendimiento fresco (ton/ha)	Rendimiento teórico del agricultor (ton/ha)
SS01-01	4,64	46400	46,40	15,00
SS01-02	3,99	39880	39,88	15,00
SS01-03	4,83	48280	48,28	15,00
SS02-01	2,62	26190	26,19	15,00
SS02-02	2,00	20020	20,02	15,00
SS02-03	2,07	20650	20,65	15,00
SS03-01	4,44	44428	44,43	15,00
SS03-02	3,95	39532	39,53	15,00
SS03-03	5,44	54394	54,39	15,00
SS04-01	3,69	36862	36,86	15,00
SS04-02	2,48	24799	24,80	15,00
SS04-03	2,79	27880	27,88	15,00
SS05-01	4,28	42748	42,75	15,00
SS05-02	3,11	31090	31,09	15,00
SS05-03	2,54	25384	25,38	15,00
SS06-01	4,86	48591	48,59	10,00
SS06-02	6,20	62003	62,00	10,00
SS06-03	5,61	56048	56,05	10,00

8.13. Anexo 13: Datos de BCF_{total} , $BCF_{disponible}$ y Kd

Suelo	BCF_{total}			$BCF_{disponible}$	Kd
	Pb	Cu	Zn	Zn	Zn
SS01-1	0,38	0,87	0,18	7,11	0,03
SS01-2	0,33	1,26	0,12	6,00	0,02
SS01-3	0,42	1,35	0,13	6,25	0,02
SS02-1	0,10	0,16	0,07	1,29	0,05
SS02-2	0,09	0,17	0,06	1,46	0,04
SS02-3	0,05	0,14	0,07	1,10	0,06
SS03-1	0,47	---	0,12	4,81	0,03
SS03-2	0,54	---	0,13	8,44	0,02
SS03-3	0,63	---	0,20	10,20	0,02
SS04-1	0,15	---	0,13	2,06	0,06
SS04-2	0,12	---	0,10	1,91	0,05
SS04-3	0,15	---	0,14	2,71	0,05
SS05-1	0,42	0,76	0,11	3,45	0,03
SS05-2	0,41	0,63	0,11	3,34	0,03
SS05-3	0,45	0,54	0,14	4,57	0,03
SS06-1	0,08	---	0,11	1,58	0,07
SS06-2	0,09	---	0,12	2,09	0,06
SS06-3	0,08	---	0,14	2,05	0,07

8.14. Anexo 14: Equipos utilizados durante la investigación.



Espectrómetro de emisión atómica de plasma por microondas (MP-AES), LABISAG, INDES-CES, UNTRM.



Potenciómetro de mesa marca HANNA.



Espectrómetro UV-Visible marca THERMO SCIENTIFIC.



Bloque digestor de muestras marca PSELECTA.



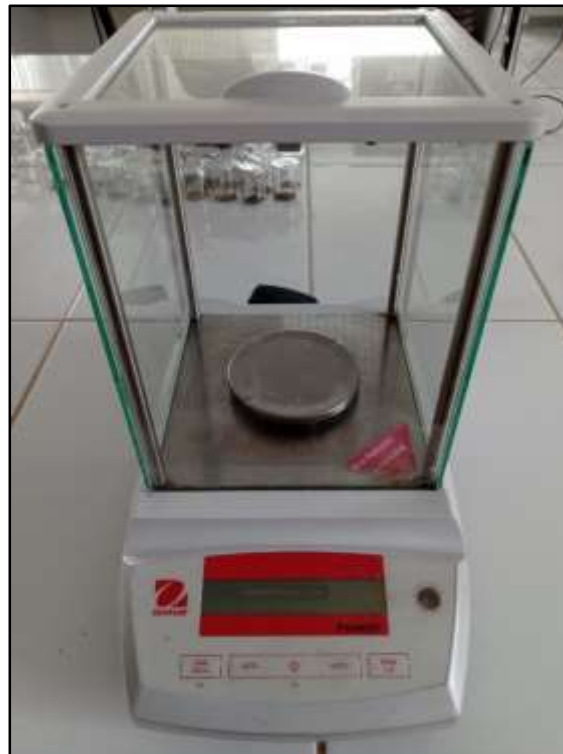
Estufa marca ECOCELL.



Agitador de muestras marca FGL.



Campana extractora de gases tóxicos marca ESCO.



Balanza analítica marca OHAUS

8.15. Anexo 15: Datos de salida ANOVA y de Test de Kruskal-Wallis

Tabla 27:

Raíz

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	50,74	10,15	18,82	2.64e-05	***
Residuales	12	6,47	0,54			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Tallo

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	258,0	51,60	3,08	0.0511	
Residuales	12	200,9	16,74			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Hoja

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	415,9	83,18	6,56	0,004	**
Residuales	12	152,3	12,69			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Cáscara

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	757,9	151,57	8,17	0.00145	**
Residuales	12	22,7	18,56			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Tubérculo

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	122162	24432	12,72	0,000188	***
Residuales	12	23044	1920			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Materia seca total

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	152138	30428	10,36	0.000499	***
Residuales	12	35239	2937			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Tabla 28:

Raíz

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	3,65	0,73	14.17	0,000111	***
Residuales	12	0,618	0,05			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Tallo

	GL	Chi-cuadrado	Valor de P
Valores	5	11,99	0,03487

Hoja

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	54,07	10,815	29,49	2,41e-06	***
Residuales	12	4,40	0,367			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Cáscara

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	38,97	7,79	9,615	0.0007	***
Residuales	12	9,73	0.81			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Tubérculo

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	245,84	49,17	24,09	7.18e-06	***
Residuales	12	24,49	2,04			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Tabla 29:

Rendimiento fresco

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	2268,2	453,6	10,84	0.0004	***
Residuales	12	502,2	41,8			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Tabla 30:

Raíz

	GL	Chi-cuadrado	Valor de P
Valores	5	14,75	0,01147

Tallo

	GL	Chi-cuadrado	Valor de P
Valores	5	10,92	0,1667

Hoja

	GL	Chi-cuadrado	Valor de P
Valores	5	9,84	0,07983

Tubérculo

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	11,86	2,3713	2.38	0.101	
Residuales	12	11,96	0,9963			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Cáscara

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	25,27	5,053	4,96	0,0108	*
Residuales	12	12,23	1,019			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Tabla 31:

Raíz

	GL	Chi-cuadrado	Valor de P
Valores	5	12,88	0,0245

Tallo

	GL	Chi-cuadrado	Valor de P
Valores	5	14,31	0,01376

Hoja

	GL	Chi-cuadrado	Valor de P
Valores	5	13,84	0,01664

Tubérculo

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	57,82	11,564	13,23	0,000156	***
Residuales	12	10,49	0,874			

Códigos de significancia: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Cáscara

	GL	Chi-cuadrado	Valor de P
Valores	5	14,24	0,01416

Tabla 32:

Raíz

	GL	Chi-cuadrado	Valor de P
Valores	5	14,45	0,01299

Tallo

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	74099	14820	14,01	0,000117	***
Residuales	12	12693	1058			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Hoja

	GL	Chi-cuadrado	Valor de P
Valores	5	15,78	0,00749

Tubérculo

	GL	Chi-cuadrado	Valor de P
Valores	5	14,95	0,01057

Cáscara

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	260,84	52,17	23,0	9,2e-06	***
Residuales	12	27,22	2,27			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Tabla 36:

Tallo/raíz

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	0,7126	0,14252	10,79	0,000413	***
Residuales	12	0,1585	0,01321			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Hoja/tallo

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	0,07374	0,014747	1,806	0.186	
Residuales	12	0,09799	0,008166			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Cáscara/hoja

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	0,12738	0,025476	5,638	0,00668	**
Residuales	12	0,05423	0,004519			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Tubérculo/cáscara

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	0,05885	0,011771	1,262	0,341	
Residuales	12	0,11193	0,009327			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Tabla 37:

Tallo/raíz

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	0,1716	0,03431	3,637	0,0311	*
Residuales	12	0,1132	0,00943			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Hoja/tallo

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	0,5805	0,11611	7,649	0,00193	**
Residuales	12	0,1821	0,01518			

Cáscara/hoja

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	0,17606	0,03521	5.52	0,00724	**
Residuales	12	0,07654	0,00638			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Tubérculo/cáscara

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	2,1903	0,4381	6,299	0,00432	**
Residuales	12	0,8346	0,0695			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Tabla 38:

Tallo/raíz

	GL	Chi-cuadrado	Valor de P
Valores	5	14,38	0,01337

Hoja/tallo

	GL	Chi-cuadrado	Valor de P
Valores	5	14,801	0,01125

Cáscara/hoja

	GL	Chi-cuadrado	Valor de P
Valores	5	14,801	0,01125

Tubérculo/cáscara

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	1,3387	0,26774	62,17	3,68e-08	***
Residuales	12	0,0517	0,00431			

Códigos de significancia: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Tabla 39:

BCF_{Pb}

	GL	Chi-cuadrado	Valor de P
Valores	5	15,931	0,007043

BCF_{Cu}

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	1,5105	0,7552	29,21	0,000808	***
Residuales	12	0,1551	0,0259			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

BCF_{Zn}

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	0,012911	0,0025822	3,939	0,024	*
Residuales	12	0,007867	0,0006556			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

BCF_{disponibleZn}

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	106,5	21,295	14,77	9,03e-05	***
Residuales	12	17,3	1,442			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Kd_{Zn}

	GL	Suma de cuadrados	Promedio suma de cuadrados	F	Pr(>F)	Significancia
Suelo	5	0,004911	0,0009822	25,26	5,58e-06	***
Residuales	12	0,000467	0,0000389			

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

8.16. Anexo 16: Codex Alimentario para Pb en alimentos.

LEAD						
Reference to JECFA:		10 (1966), 16 (1972), 22 (1978), 30 (1986), 41 (1993), 53 (1999)				
Toxicological guidance:		PTWI 0.025 mg/kg bw (1987 for infants and young children, extended to all age groups in 1993, maintained 1999)				
Residue definition:		Lead, total				
Synonyms:		Pb				
Related Code of Practice:		Code of Practice for the Prevention and Reduction of Lead Contamination in Foods (CAC/RCP 56-2004) Code of Practice for Source Directed Measures to Reduce Contamination of Foods with Chemicals (CAC/RCP 49-2001)				
Commodity/Product Code	Name	Level mg/kg	Suffix	Type	Reference	Notes/Remarks for Codex Alimentarius
FT 0026	Assorted (sub)tropical fruits, edible peel	0.1		ML		
FI 0030	Assorted (sub)tropical fruits, inedible peel	0.1		ML		
FB 0018	Berries and other small fruits	0.2		ML		
FC 0001	Citrus fruits	0.1		ML		
FP 0009	Pome fruits	0.1		ML		
FS 0012	Stone fruits	0.1		ML		
VB 0040	Brassica vegetables	0.3		ML		Excluding kale
VA 0035	Butb vegetables	0.1		ML		
VC 0045	Fruting vegetables, Cucurbits	0.1		ML		
VO 0050	Fruting vegetables, other than Cucurbits	0.1		ML		Excluding mushrooms
VL 0053	Leafy vegetables	0.3		ML		Including Brassica leafy vegetables but excluding spinach
VP 0060	Legume vegetables	0.2		ML		
VD 0070	Pulses	0.2		ML		
VR 0075	Root and tuber vegetables	0.1		ML		Including peeled potatoes
	Canned fruit cocktail	1		ML	CS 78-1981	
	Canned grapefruit	1		ML	CS 15-1981	
	Canned mandarin oranges	1		ML	CS 68-1981	
	Canned mangoes	1		ML	CS 159-1987	