

## **CONTENIDO DE PLOMO EN SUELOS Y PLANTAS DE PAPA (*SOLANUM TUBEROSUM* L.) VAR. HUAYRO CULTIVADA EN LA REGIÓN AMAZONAS, PERÚ**

GÓMEZ, V.<sup>1</sup>; MOLINA, M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa de Doctorado en Ciencias para el Desarrollo Sustentable, Escuela de Posgrado, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Chachapoyas, Perú;

<sup>2</sup>Departamento de Acuicultura y Recursos Agroalimentarios, Universidad de los Lagos, Osorno, Chile.

### **RESUMEN**

En el presente trabajo se determinó el contenido de Pb en plantas de papa var. Huayro obtenidas de seis diferentes sitios bajo producción de este cultivo de la región Amazonas, Perú. Se tomaron muestras compuestas tanto de las plantas como de los suelos. Las muestras de plantas se separaron en raíz, tallo, hoja, cáscara y tubérculos. Los muestreos de suelos y plantas se realizaron en triplicado. En los suelos se determinaron las principales propiedades físico-químicas incluyendo Pb total y Zn disponible (Zn-EDTA). Los análisis de Pb en suelos y tejidos se determinaron mediante espectrómetro de emisión atómica de plasma por microondas (MP-AES). Con los datos de Pb en tubérculos y suelo se determinó el factor de bioconcentración de Pb (BCF). Los resultados indicaron que las plantas de papa presentaron elevados valores de Pb en sus diferentes partes, incluido el tubérculo, sobrepasando los valores sugeridos por el Codex alimentarius, lo que representaría un riesgo potencial a la salud. La concentración de Pb en las diferentes partes de la planta siguió la secuencia raíz>tallo>hoja>cáscara>tubérculo. La concentración de Pb en raíz estuvo positivamente correlacionada con la concentración de Pb en el suelo ( $r=0,74$ ,  $p<0,001$ ), mientras que la concentración de Pb en los tubérculos no presentó diferencias entre sitios ( $p>0,05$ ) ni correlacionó ( $p>0,05$ ) con el contenido de Pb en el suelo. El BCF de Pb estuvo negativamente correlacionado con el contenido de Pb total y de Zn disponible en el suelo ( $-0,95>r>-0,88$ ,  $p<0,001$ ). Esto último podría indicar que la disponibilidad de Zn minimiza la transferencia de Pb desde los tejidos verdes al tubérculo.

**Palabras clave:** elementos traza; metales pesados; factor de bioconcentración

### **INTRODUCCIÓN**

El interés en el contenido de elementos traza en suelos y plantas cultivadas ha ido en aumento de la mano el creciente interés por el medio ambiente y la demanda por productos inocuos de la población, y con la reducción en la superficie cultivable disponible en diferentes países. Los elementos traza (ETs) son elementos que se encuentran en bajas concentraciones en diferentes matrices de la naturaleza, que pueden o no ser esenciales para el crecimiento de los organismos vivos, pero que sobre cierto umbral de concentración pueden ser tóxicos para plantas, animales y/o seres humanos (Pierzynski et al., 2005). Dentro de los elementos traza de mayor relevancia y preocupación se encuentra el plomo (Pb) el cual está presente de manera natural en varios minerales de la corteza terrestre y que puede ingresar a los suelos cultivados

por los residuos de actividades mineras e industriales, la aplicación de aguas residuales y el uso de enmiendas y fertilizantes, entre otras fuentes (Antonious and Snyder, 2007; Chen et al., 2015; Codling et al., 2016; Khan et al., 2017).

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es una de las especies de mayor relevancia para la alimentación a nivel mundial (FAO, 2006). Sin embargo, existe escasa información sobre la distribución de Pb en los tejidos de la planta de papa y su traspaso desde el suelo a la planta. La movilidad de los ETs y la absorción por parte de la planta está controlada por la concentración de Pb en el suelo, pero al mismo tiempo por otras propiedades físico-químicas del mismo, como el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el contenido de materia orgánica y la textura entre otras (Kabata-Pendias and Pendias, 2010). En condiciones de suelos contaminados y/o pH ácido, el Pb se puede acumular en diferentes órganos de la planta de papa y pasar desde el suelo a los seres humanos por el consumo de tubérculos (Codling et al., 2016; Khan et al., 2017).

De acuerdo con los antecedentes señalados, se plantearon los siguientes objetivos para este trabajo: i) determinar la concentración de Pb en suelos y diferentes órganos de planta de papa var. Huayro y ii) buscar posible relación entre el contenido de Pb en los tejidos de las plantas y las propiedades del suelo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Muestreo de suelos

Se muestrearon seis sitios pertenecientes a productores de papa var. Huayro en las provincias de Luya y Chachapoyas de la región Amazonas (Tabla 1). Esta variedad representa el 51% de la superficie de papa de la Región. En cada sitio se identificaron parcelas homogéneas (0,5 ha aprox.) desde las que se sacaron tres muestras de suelo compuestas para hacer un total de 18 muestras. Los suelos se muestrearon al momento de cosecha (marzo a septiembre 2021) a una profundidad de 0-30 cm. Las muestras fueron se llevaron al Laboratorio de Investigación de Suelos y Aguas (LABISSAG) del Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES-CES) – Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM).

### Muestreo de tejidos vegetales

Se recolectaron las muestras de tejidos vegetales de plantas de papa al momento de cosecha que fueron cultivadas en las seis parcelas seleccionadas. Se muestrearon tres plantas seguidas sobre la hilera por punto de muestreo (repetición), tomándose tres repeticiones distribuidas uniformemente en cada parcela. Cada muestra fue separada en las raíces, tallos, hojas y tubérculos. Se contabilizaron todos los tubérculos para estimar producción, pero para los análisis 6-10 tubérculos representativos de cada planta (Jalali & Meyari, 2016). Las muestras fueron llevadas al LABISSAG para su análisis.

Tabla 1. Datos de las parcelas seleccionadas de cultivo de papa varietal huayro.

| <b>Código de sitio</b> | <b>Coordenadas geográficas referenciales (UTM)</b> |         | <b>Altitud (m.s.n.m.)</b> | <b>Distrito</b> | <b>Provincia</b> |
|------------------------|--|---------|---------------------------|-----------------|------------------|
| 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      |

### Determinación de las propiedades de suelos

Todos los análisis de los suelos se determinaron en el LABISAG. Los suelos se secaron en estufa a una temperatura de 40 °C hasta masa constante. Los métodos para cada análisis se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Métodos de análisis de las propiedades del suelo.

| <b>Parámetros</b>                  | <b>Método</b>  |
|------------------------------------|--|
| <b>Físicos</b>                     |  |
| Textura                            | Hidrómetro y el método de tamizado (Gee & Bauder, 1986).<br>Hidrómetro (Bao, 2000) |
| <b>Químicos</b>                    |  |
| pH                                 | pHmetro Hanna, en una relación suelo agua 1:1 p/v (Bao, 2000)                      |
| Materia orgánica                   | Walkley - Black (Walkley A., 1934)   |
| Capacidad de intercambio catiónico | Con acetato de amonio (Gregorich & Carter, 2007)                                   |
| Conductividad eléctrica            | Conductímetro Hanna en una relación suelo agua 1:1 p/v (Gregorich & Carter, 2007)  |

|  |  |
|--|--|
| Fósforo disponible (P-Olsen)           | 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.                        |
| Acidez extraíble ( $Al^{3+} + H^{+}$ ) | Extracción con KCl 1M y determinación con el MP-AES.                                   |
| Zn disponible                          | Extracción con EDTA (Rodríguez y Trigoso, 2017)  |

La estadística descriptiva de las propiedades de los suelos se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas seleccionadas de los seis sitios de cultivo de papa.

|         | pH      | CE<br>( $dS\ m^{-1}$ ) | P-Olsen<br>(ppm) | MO<br>(%) | Arena<br>(%) | Limo<br>(%) | Arcilla<br>(%) | CIC<br>( $cmol\ kg^{-1}$ ) | $Al^{3+}+H^{+}$<br>( $cmol\ kg^{-1}$ ) |
|---------|---------|------------------------|------------------|-----------|--------------|-------------|----------------|----------------------------|--|
| Rango   | 4.4–5.6 | 0.1–0.7                | 2-30             | 4.0–6.9   | 4.7–68.7     | 12.0–40.0   | 11.3–33.3      | 9.6-20.8                   | 0.1-3.3                                |
| Media   | 4.9     | 0.3                    | 14.1             | 6.2       | 57.4         | 24.9        | 17.7           | 15.2                       | 1.2                                    |
| Mediana | 4.8     | 0.3                    | 13.2             | 6.3       | 58.7         | 24.0        | 16.8           | 14.4                       | 1.1                                    |
| D.E.    | 0.4     | 0.2                    | 10.2             | 0.9       | 10.2         | 7.2         | 6.3            | 4.4                        | 0.8                                    |
| C.V.    | 7.7     | 70.1                   | 72.3             | 14.8      | 17.8         | 28.8        | 35.6           | 28.8                       | 69.6                                   |

### Determinación de Pb en suelos

La determinación de la concentración total de Pb en suelos se realizó después de la digestión ácida con  $HNO_3$  según el método 3050 B de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA, 1996). Para la determinación de los elementos traza (cinco medidas por muestra) se utilizó un espectrómetro de emisión atómica de plasma por microondas (MP-AES) marca AGILENT del LABISAG, INDES-CES, UNTRM. El límite de detección para Pb de este método fue de  $0.61\ mg\ kg^{-1}$ . Para el control de calidad se utilizaron patrones de referencia propios, a las cuales se les agregó una concentración conocida de Pb. Los porcentajes de recuperación estuvieron en el rango de 90.7 a 97.7 % para la referencia de  $1\ mg\ kg^{-1}$  y en el rango de 90.1-99.1 % para la referencia de  $5\ mg\ kg^{-1}$ .

## Determinación de Pb en tejidos de las plantas

Se realizó la separación de las plantas y tubérculos al momento de cosecha. En el laboratorio, previo al secado las muestras se lavaron y se separó las plantas en sus diferentes órganos. Se realizó un proceso de secado de las muestras por separado (raíz, tallos, hojas, tubérculos y cáscara de tubérculos) a 70 °C en estufa de aire forzado hasta masa constante y luego a las muestras se le realizó un molido y tamizado a <0,5 mm (Mengist et al., 2017). Se realizó una digestión ácida de las muestras vegetales utilizando HNO<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> adecuando las metodologías descritas por Jalali & Meyari (2016) y Figueroa et al. (2008). Se pesaron 0.25 gramos de muestra y se agregaron 5 ml de HNO<sub>3</sub> concentrado, luego se calentaron a 65 °C por 60 minutos y 120 °C por 60 minutos. Una vez las muestras enfriadas, se agregó 0,25 ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y se dejó reaccionar por 30 minutos. Luego se filtró y se aforó a 25 ml con agua ultrapura. La determinación de Pb se realizó el MP-AES tomando cinco medidas de cada muestra. El límite de detección para la determinación de Pb en tejidos vegetales fue de 0,77 mg kg<sup>-1</sup>. En cada batch de medición se consideraron soluciones patrón y digestatos de los patrones de suelos como control de calidad.

## Análisis de datos

Se realizó análisis de varianza (ANDEVA) para evaluar diferencias entre sitios para las variables de suelo y planta. Algunos variables no distribuyeron normal (Shapiro-Wilk,  $p < 0,05$ ), por lo que se transformaron previo a realización de ANDEVA. Se realizó análisis de correlación de Spearman para buscar posibles relaciones entre las variables evaluadas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 4 se presenta la concentración de Pb en los suelos de los diferentes sitios y en los diferentes tejidos de las plantas. El contenido de Pb fue variable al igual que las propiedades de los suelos presentadas en la Tabla 3. Los valores de Pb total en el suelo fueron superiores al límite establecido por el estándar de calidad ambiental para suelos agrícolas en Perú y Canadá (70 mg kg<sup>-1</sup>) y bajo los valores establecidos por la Comunidad Europea (300 mg kg<sup>-1</sup>) (European Union, 2002; CCME, 2019; MINAM, 2017). No se tiene antecedentes de contaminación antropogénica del suelo en los sitios evaluados, y lo más probable es que el Pb tenga su origen en los minerales de los suelos.

La concentración de Pb en las diferentes partes de la planta siguió la secuencia raíz ≥ tallo > hoja > cáscara ≥ tubérculo, observándose que la mayor parte del Pb absorbido por esta variedad se concentra en la raíz, hojas y tallos, órganos que actúan como un filtro para el paso de este ET a la cáscara y el tubérculo. Esto concuerda con lo observado para otros elementos traza en papa, como cadmio (Cd), para el cual la absorción no ocurre directamente desde el suelo hacia los tubérculos, sino que su concentración en el órgano cosechado depende de su traslocación desde las hojas al floema, desde donde puede alcanzar los tubérculos (Dunbar et al., 2003).

Tabla 4. Concentración de plomo en suelo y en las diferentes partes de la planta (base materia seca) para los seis sitios evaluados.

| Sitio | Suelo<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | Raíz<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | Tallo<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | Hoja<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | Tubérculo<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | Cáscara<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) |
|-------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| SS01  | 38.2c                           | 20,2d                          | 23,1b                           | 25,5a                          | 14,3a                               | 13,7                              |
| SS02  | 179.7a                          | 41,9a                          | 29,9d                           | 28,2a                          | 15,3a                               | 15,5                              |
| SS03  | 25.6c                           | 19,8d                          | 23,0b                           | 25,8a                          | 13,8a                               | 14,6                              |
| SS04  | 98.3b                           | 19,9d                          | 23,1b                           | 22,6a                          | 14,5a                               | 14,9                              |
| SS05  | 37.7c                           | 24,6c                          | 21,5b                           | 22,3a                          | 16,1a                               | 17,3                              |
| SS06  | 162.2a                          | 31,5b                          | 23,7b                           | 24,4a                          | 13,9a                               | 16,3                              |

Los datos muestran el promedio de tres repeticiones. Letras diferentes después de cada valor indican diferencia significativa entre sitios según prueba de DMS ( $p < 0,05$ ).

Los valores de Pb en tejidos determinados en este estudio son altos, inclusive en tubérculos, para los cuales se superó en todos los casos el límite recomendado en Codex alimentarius de 0,1 mg kg<sup>-1</sup> en base peso fresco para el producto pelado (FAO & WHO, 2021). De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 4 y el porcentaje de materia seca promedio de tubérculos, la concentración de Pb en tubérculos fue de 3,24 a 3,78 mg kg<sup>-1</sup> de peso fresco. Para la variedad estudiada la concentración de Pb en tubérculo pelado y la cáscara fue muy similar (Tabla 4). 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).

Utilizando los datos de producción de materia seca y la concentración de Pb en las diferentes partes de la planta, se obtuvieron los valores de absorción en tubérculos y total (mg ha<sup>-1</sup>). Los resultados indicaron que, dependiendo del sitio, el tubérculo de papa se lleva entre un 73% y 85% del Pb total absorbido por la planta y una menor cantidad queda en los residuos de cosecha. Para estimar el riesgo de traspaso de Pb al tubérculo (sin piel), se calculó el factor de bioconcentración (BCF) de acuerdo con la ecuación 1 (Eq.1):

$$BCF = \frac{[Pb]_{tub}}{[Pb]_{suelo}} \quad (1)$$

Donde  $[Pb]_{tub}$  y  $[Pb]_{suelo}$  es la concentración total (mg kg<sup>-1</sup>) de Pb en el tubérculo pelado y en el suelo, respectivamente. Los valores obtenidos presentaron diferencias estadísticas ( $p < 0,05$ ) entre sitios y estuvieron en el rango de 0,08 y 0,55, siendo menores en aquellos sitios con mayor concentración de Pb en el suelo (Tabla 5).

Tabla 5. Factor de bioconcentración (BCF) de Pb determinado para los diferentes sitios.

| Sitio | BCF   |
|-------|-------|
| SS01  | 0,38b |
| SS02  | 0,08c |
| SS03  | 0,55a |
| SS04  | 0,14c |
| SS05  | 0,43b |
| SS06  | 0,09c |

Los datos muestran el promedio de tres repeticiones. Letras diferentes después de cada valor indican diferencia significativa entre sitios según prueba de DMS ( $p < 0,05$ ).

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.

Para establecer posibles relaciones entre el contenido de Pb en las diferentes partes de la planta, BCF y las propiedades de los suelos, se realizó análisis de correlación (Tabla 6).

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 ( $r=0,74$ ,  $p < 0,001$ ) (Figura 1) y negativamente con el contenido de materia orgánica del suelo ( $r=-0,70$ ,  $p < 0,001$ ) 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,  $p < 0,001$ ) 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 ETs, 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 disponible en el suelo, como indica la correlación significativa y positiva entre ambas variables ( $r=0,77$ ,  $p < 0,001$ ), 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.

Tabla 6. Análisis de correlación de Spearman para variables de suelo y planta.

|                                     | pH    | CE           | MO           | Ar           | Lim          | Arc   | Al <sup>3+</sup> H <sup>+</sup> | Pb <sub>soil</sub> | Zn <sub>EDTA</sub> | BCF          | Pb <sub>raíz</sub> | Pb <sub>tallo</sub> | Pb <sub>hoja</sub> | Pb <sub>tub</sub> | Pb <sub>case</sub> | Ab <sub>stub</sub> | Ab <sub>stot</sub> |
|-------------------------------------|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|---------------------------------|--------------------|--------------------|--------------|--------------------|---------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| <b>pH</b>                           | 1.00  |              |              |              |              |       |                                 |                    |                    |              |                    |                     |                    |                   |                    |                    |                    |
| p valor                             | -     |              |              |              |              |       |                                 |                    |                    |              |                    |                     |                    |                   |                    |                    |                    |
| <b>CE</b>                           | -0,04 | 1.00         |              |              |              |       |                                 |                    |                    |              |                    |                     |                    |                   |                    |                    |                    |
| p valor                             | 0,86  | -            |              |              |              |       |                                 |                    |                    |              |                    |                     |                    |                   |                    |                    |                    |
| <b>MO</b>                           | -0,12 | <b>-0,69</b> | 1.00         |              |              |       |                                 |                    |                    |              |                    |                     |                    |                   |                    |                    |                    |
| p valor                             | 0,65  | <0,01        | -            |              |              |       |                                 |                    |                    |              |                    |                     |                    |                   |                    |                    |                    |
| <b>Ar</b>                           | 0,03  | -0,28        | 0,39         | 1.00         |              |       |                                 |                    |                    |              |                    |                     |                    |                   |                    |                    |                    |
| p valor                             | 0,89  | 0,25         | 0,11         | -            |              |       |                                 |                    |                    |              |                    |                     |                    |                   |                    |                    |                    |
| <b>Lim</b>                          | -0,16 | 0,16         | -0,16        | <b>-0,78</b> | 1.00         |       |                                 |                    |                    |              |                    |                     |                    |                   |                    |                    |                    |
| p valor                             | 0,53  | 0,53         | 0,53         | <0,01        | -            |       |                                 |                    |                    |              |                    |                     |                    |                   |                    |                    |                    |
| <b>Arc</b>                          | -0,14 | 0,45         | -0,47        | <b>-0,74</b> | 0,26         | 1.00  |                                 |                    |                    |              |                    |                     |                    |                   |                    |                    |                    |
| p valor                             | 0,59  | 0,06         | 0,05         | <0,01        | 0,31         | -     |                                 |                    |                    |              |                    |                     |                    |                   |                    |                    |                    |
| <b>Al<sup>3+</sup>H<sup>+</sup></b> | -0,24 | <b>-0,66</b> | <b>0,67</b>  | -0,04        | 0,01         | 0,05  | 1.00                            |                    |                    |              |                    |                     |                    |                   |                    |                    |                    |
| p valor                             | 0,34  | <0,01        | <0,01        | 0,88         | 0,98         | 0,84  | -                               |                    |                    |              |                    |                     |                    |                   |                    |                    |                    |
| <b>Pb<sub>soil</sub></b>            | 0,00  | 0,45         | <b>-0,56</b> | 0,06         | 0,06         | -0,03 | <b>-0,71</b>                    | 1.00               |                    |              |                    |                     |                    |                   |                    |                    |                    |
| p valor                             | 1,00  | 0,06         | 0,02         | 0,82         | 0,82         | 0,91  | <0,01                           | -                  |                    |              |                    |                     |                    |                   |                    |                    |                    |
| <b>Zn<sub>EDTA</sub></b>            | 0,01  | 0,44         | -0,47        | -0,02        | 0,23         | -0,06 | <b>-0,69</b>                    | <b>0,91</b>        | 1.00               |              |                    |                     |                    |                   |                    |                    |                    |
| p valor                             | 0,98  | 0,07         | 0,05         | 0,93         | 0,36         | 0,82  | <0,01                           | <0,01              | -                  |              |                    |                     |                    |                   |                    |                    |                    |
| <b>BCF</b>                          | 0,03  | -0,43        | <b>0,56</b>  | -0,12        | 0,06         | 0,00  | <b>0,72</b>                     | <b>-0,95</b>       | <b>-0,88</b>       | 1.00         |                    |                     |                    |                   |                    |                    |                    |
| p valor                             | 0,90  | 0,07         | 0,02         | 0,63         | 0,82         | 0,99  | <0,01                           | <0,01              | <0,01              | -            |                    |                     |                    |                   |                    |                    |                    |
| <b>Pb<sub>raíz</sub></b>            | -0,03 | <b>0,69</b>  | <b>-0,70</b> | -0,13        | 0,20         | 0,15  | <b>-0,75</b>                    | <b>0,74</b>        | <b>0,67</b>        | <b>-0,67</b> | 1.00               |                     |                    |                   |                    |                    |                    |
| p valor                             | 0,91  | <0,01        | <0,01        | 0,59         | 0,43         | 0,56  | <0,01                           | <0,01              | <0,01              | <0,01        | -                  |                     |                    |                   |                    |                    |                    |
| <b>Pb<sub>tallo</sub></b>           | -0,09 | 0,24         | <b>-0,52</b> | -0,39        | 0,41         | 0,35  | -0,23                           | 0,46               | <b>0,49</b>        | <b>-0,53</b> | 0,36               | 1.00                |                    |                   |                    |                    |                    |
| p valor                             | 0,74  | 0,33         | 0,03         | 0,11         | 0,09         | 0,16  | 0,36                            | 0,05               | 0,04               | 0,03         | 0,14               | -                   |                    |                   |                    |                    |                    |
| <b>Pb<sub>hoja</sub></b>            | 0,45  | 0,22         | -0,42        | -0,10        | -0,04        | 0,23  | -0,40                           | 0,19               | 0,20               | -0,31        | 0,29               | <b>0,61</b>         | 1.00               |                   |                    |                    |                    |
| p valor                             | 0,06  | 0,39         | 0,08         | 0,69         | 0,89         | 0,35  | 0,10                            | 0,44               | 0,44               | 0,22         | 0,25               | 0,01                | -                  |                   |                    |                    |                    |
| <b>Pb<sub>tub</sub></b>             | -0,05 | 0,44         | -0,30        | -0,27        | 0,25         | 0,22  | -0,14                           | 0,28               | 0,23               | -0,04        | 0,43               | -0,13               | -0,37              | 1.00              |                    |                    |                    |
| p valor                             | 0,84  | 0,07         | 0,22         | 0,27         | 0,31         | 0,38  | 0,59                            | 0,25               | 0,36               | 0,86         | 0,08               | 0,61                | 0,13               | -                 |                    |                    |                    |
| <b>Pb<sub>case</sub></b>            | -0,21 | <b>0,55</b>  | -0,21        | 0,01         | 0,14         | -0,09 | -0,36                           | 0,23               | 0,39               | -0,17        | 0,43               | -0,07               | -0,22              | 0,44              | 1.00               |                    |                    |
| p valor                             | 0,41  | 0,02         | 0,41         | 0,96         | 0,57         | 0,72  | 0,14                            | 0,35               | 0,11               | 0,50         | 0,07               | 0,77                | 0,38               | 0,07              | -                  |                    |                    |
| <b>Ab<sub>stub</sub></b>            | 0,15  | -0,26        | 0,16         | <b>0,48</b>  | <b>-0,58</b> | -0,35 | 0,17                            | -0,24              | -0,40              | 0,22         | -0,19              | -0,37               | -0,13              | -0,21             | 0,00               | 1.00               |                    |
| p valor                             | 0,55  | 0,3          | 0,54         | 0,04         | 0,01         | 0,15  | 0,50                            | 0,34               | 0,10               | 0,37         | 0,45               | 0,14                | 0,61               | 0,39              | 0,99               | -                  |                    |
| <b>Ab<sub>stot</sub></b>            | 0,17  | -0,36        | 0,22         | <b>0,48</b>  | <b>-0,55</b> | -0,41 | 0,19                            | -0,26              | -0,41              | 0,23         | -0,26              | -0,31               | -0,06              | -0,32             | -0,07              | <b>0,98</b>        | 1.00               |
| p valor                             | 0,51  | 0,15         | 0,37         | 0,04         | 0,02         | 0,10  | 0,44                            | 0,29               | 0,09               | 0,35         | 0,29               | 0,22                | 0,82               | 0,19              | 0,77               | <0,01              | -                  |

Suelo: CE = conductividad eléctrica, MO = materia orgánica del suelo, Ar=arena, Lim=Limo, Arc=arcilla Al<sup>3+</sup>H<sup>+</sup> = acidez extraíble; Planta: Pb = concentración de Pb, BCF = factor de bioconcentración, Abs =absorción de Pb.

En la Figura 1 se presenta la relación observada entre el Pb en el suelo y en raíz de las plantas de papa.

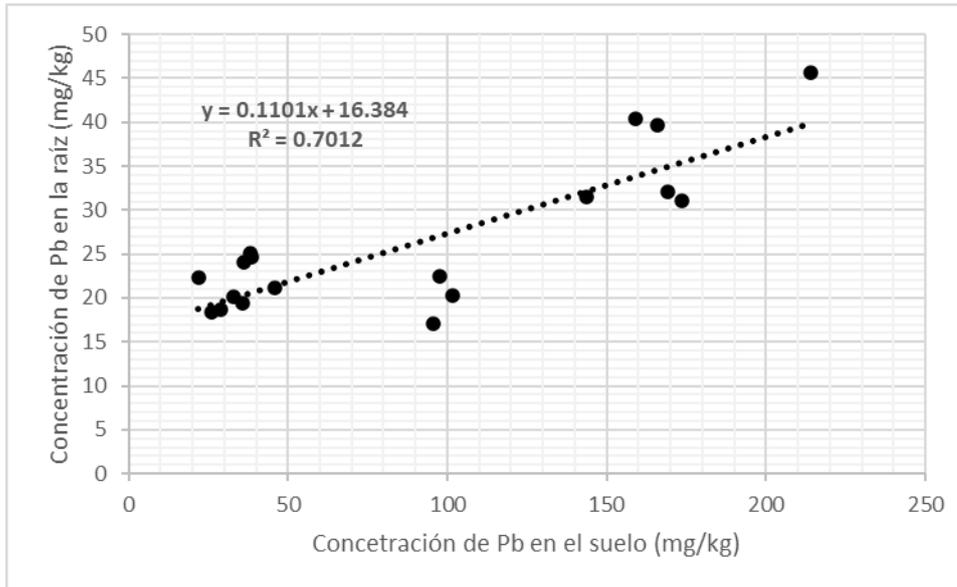


Figura 1. Relación entre el Pb en el suelo y en raíz de las plantas de papa.

## CONCLUSIONES

Las plantas de papa var. Huayro presentaron elevados valores de Pb en sus diferentes partes, incluido el tubérculo, sobrepasando los valores sugeridos por el Codex alimentarius, lo que representaría un riesgo potencial a la salud por consumo de tubérculos. Esta situación debería ser evaluada. La concentración de Pb en las diferentes partes de la planta siguió la secuencia raíz  $\geq$  tallo  $\geq$  hoja  $>$  cáscara  $\geq$  tubérculo. La concentración de Pb en raíz estuvo correlacionada con la concentración de Pb en el suelo, mientras que la concentración de Pb en los tubérculos no presentó variaciones entre sitios y no correlacionó con el contenido de Pb en el suelo. El BCF de Pb fue altamente dependiente del contenido de Pb del suelo y estuvo negativamente correlacionado con el contenido de Zn disponible en el suelo, indicando que la disponibilidad de Zn minimizaría la transferencia de Pb desde los tejidos verdes al tubérculo.

## REFERERENCIAS

- ANTONIOUS, G. F.; SNYDER, J. C. Accumulation of heavy metals in plants and potential phytoremediation of lead by potato, *Solanum tuberosum* L. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 42(6), 811-816, 2007.
- BAO, S. *Soil and agricultural chemistry analysis* (C. A. Press, Ed.); 2000.
- CCME - CANADIAN COUNCIL MINISTER ENVIRONMENTAL. (2019 Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health. 2019. URL [https://esdat.net/Environmental%20Standards/Canada/SOIL/rev\\_soil\\_summary\\_tbl\\_7.0\\_e.pdf](https://esdat.net/Environmental%20Standards/Canada/SOIL/rev_soil_summary_tbl_7.0_e.pdf)
- CODLING, E. E.; CHANEY, R. L.; GREEN, C. E. Accumulation of Lead and Arsenic by Potato Grown on Lead-Arsenate-Contaminated Orchard Soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(6), 799-807, 2016.
- DUDKA, S.; PIOTROWSKA, M.; TERELAK, H. Transfer of cadmium, lead, and zinc from industrially contaminated soil to crop plants: a field study. *Environmental Pollution*, 94(2), 181-188, 1996.
- DUNBAR, K.; MCLAUGHLIN, M. J.; REID, R. J. The uptake and partitioning of cadmium in two cultivars of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Journal of Experimental Botany*, 54(381), 349-354, 2003.
- EUROPEAN UNION. *Heavy Metals in Wastes*, European Commission on Environment. 2002. URL [http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/heavy\\_metals\\_report.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/heavy_metals_report.pdf) ).
- FAO. Enfoques: Tesoro enterrado-La papa. 2006. URL <http://www.fao.org/ag/esp/revista/0611sp1.htm>
- FAO AND WHO. *Codex Alimentarius*. CXS193-1995. 2021.
- FIGUEROA, J. A. L.; WROBEL, K.; AFTON, S.; CARUSO, J. A.; FELIX GUTIERREZ CORONA, J.; WROBEL, K. 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, 2008.
- GEE, G.; BAUDER, J. *Methods of soil analysis, part 1, physical and mineralogical methods*. En *Soil Science Society of America, American Society of Agronomy*. 1986.
- GREGORICH, E. G., & CARTER, M. R. *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Second Edition. CRC Press. 2007.
- JALALI, M.; MEYARI, A. Accumulation of Heavy Metals in Potatoes Grown on Calcareous Soils of the Hamedan, Western Iran. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 25(4), 365-377, 2016.
- KABATA-PENDIAS, A. *Trace elements in soils and plants* (4th ed.). Taylor & Francis Group, CRC Press. 2010.

KHAN, Z. I.; AHMAD, K.; YASMEEN, S.; AKRAM, N. A.; ASHRAF, M.; MEHMOOD, N. 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, 2017.

MENGIST, M. F., MILBOURNE, D., GRIFFIN, D., MCLAUGHLIN, M. J., CREEDON, J., JONES, P. W., & ALVES, S. Cadmium uptake and partitioning in potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars with different tuber-Cd concentration. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(35), 27384-27391, 2017.

MINAM - MINISTERIO DEL AMBIENTE PERÚ. Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM: Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. 2017. URL <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-011-2017-minam/>

PIERZYNSKI, G. M.; VANCE, G. F.; SIMS, J. T. *Soils and environmental quality* (3.a ed.). CRC press. 2005.

QUEIROLO, F.; STEGEN, S.; RESTOVIC, M.; PAZ, M.; OSTAPCZUK, P.; SCHWUGER, M. J.; MUNOZ, L. Total arsenic, lead, and cadmium levels in vegetables cultivated at the Andean villages of northern Chile. *Science of the Total Environment*, 255(1-3), 75-84, 2000.

RODRÍGUEZ, M. S.; TRIGOZO, J. P. R. 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, Huánuco (Perú). *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 1(1), 87-94, 2017.

SANDERSON, D.-V.; VOUTCHKOV, M.; BENKEBLIA, N. Bioaccumulation of cadmium in potato tuber grown on naturally high levels cadmium soils in Jamaica. *Science of The Total Environment*, 649, 909-915, 2019.

US-EPA. Method EPA 3050B. *The journal of the Japan Society for Bronchology*, 18(7), 723, 1996. URL [https://doi.org/10.18907/jjsre.18.7\\_723\\_2](https://doi.org/10.18907/jjsre.18.7_723_2)

VARGAS, M.; BERTSCH, F.; CORDERO, A. Comparación de métodos de extracción de fósforo, potasio, calcio y magnesio disponible en Vertisoles de Guanacaste, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 16(1), 115-123, 1992.

WALKLEY A.; BLACK I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *journals.lww.com*, 37(1), 29-38, 1934.