

ESTUDIO DE METALES PESADOS EN SUELOS AGRÍCOLAS DE LA CUENCA DEL RÍO TUPIZA

Luis Fernando Pérez Mercado¹

¹ferpermer@yahoo.com, Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua – UMSS

RESUMEN

El 2003 se realizó un estudio de aguas y suelos regados en tres zonas agrícolas de la cuenca del río Tupiza – subcuenca Tatasi. Los resultados obtenidos reportaban altos contenidos de metales pesados en suelos, de manera que excedían la legislación ambiental. El objetivo del presente estudio fue complementar y profundizar el anterior ante el repunte de la actividad minera desde entonces. Para ello se tomaron muestras de suelo y de cultivos de maíz (*Zea mays*) en los mismos lugares que la investigación precedente. En todas las muestras se determinó la concentración de cinco elementos traza (As, Cd, Sb, Pb, Zn), además de parámetros relevantes para la dinámica de los metales pesados en el suelo. Se registraron algunas características de las parcelas, como el empleo de agroquímicos y la distancia a la posible fuente de contaminación. Los suelos presentaron valores considerados contaminantes por la legislación vigente y mostraron incrementos significativos en Cd y Pb. Ante la falta de una normativa nacional para el contenido de elementos traza en material vegetal, se recurrió a normas de otros países; el resultado fue que todos los metales excedían dichos límites. Además se realizaron análisis de correlación lineal obteniendo buen ajuste para la concentración en plantas y suelos (en Cd, Pb y Zn), y para la concentración en suelos en relación con la distancia a la posible fuente de contaminación (en Pb, Zn y As). Por último, se determinó el Índice de Bioacumulación (IB) para cada elemento, destacando por una parte el Zn porque a pesar de los elevados registros en suelo tuvo un IB bajo (0.17), y por otro lado el Sb por presentar un valor bastante elevado (IB=11). Los resultados tienen diversas implicaciones, desde la necesidad de actualizar y complementar las normativas, pasando por el evidente impacto ambiental del incremento de las operaciones mineras a toda escala existentes en la cuenca, el papel del agua como agente transportador de contaminantes, y finalmente en la necesidad de profundizaciones tanto en el estudio de la dinámica de metales pesados en suelos andinos, como en la fitoremediación mediante maíz y su impacto en la cadena alimenticia.

Palabras clave: metal pesado, contaminación de suelos, *Zea mays*

ABSTRACT

In 2003 a study was done on water and irrigated soil in three agricultural zones in the basin of the Tupiza River—subbasin Tatasi. The results showed a high content of heavy metals in the soil that exceeded the levels allowed by the environmental laws. The goal of the study was to complement and go more in depth than the previous due to the increase in mining activity since that time. In the study, sample of soil and corn crops were taken in the same places as the previous study. In all of the samples, the concentration of five heavy metals (As, Cd, Sb, Pb, Zn) was determined in addition to the relevant parameters for the dynamic of heavy metals in the soil. Some characteristics of the cropland were recorded, such as the use of agrochemicals and the distance from a possible source of contamination. The soil showed levels high enough to be considered by the law to be contaminated, and they showed a significant increase in Cd and Pb. Due to the lack of national legislation surrounding the content of heavy metals in vegetation, laws from other countries were used. The result was that all of the metals exceeded the limits. In addition, analysis of the linear correlation was carried out, using an adjustment for the concentration in plants and soil (in Cd, Pb and Zn), and for the concentration in soil in relation to the distance from a possible source of contamination (in Pb, Zn and As). Lastly, the Index of Bioaccumulation (BI) was determined for each element, with Zn being an outlier because despite the elevated readings the soil, it had a low BI (0.17), and conversely the Sb showed a fairly high reading (BI=11). The results have various implications, from the necessity of modernizing and complementing legislation, recognizing the obvious environmental impact of the increasing in mining operations of different sizes that exist in the basin, the role of water as a transporter of contaminants, and finally the necessity of more in depth research as much in the study of the dynamics of heavy metals in Andean soils as in the phytoremediation of plants and its impact on the food chain.

Keywords: heavy metals, soil contamination, *Zea mays*

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes problemas ambientales que el hombre tienen que afrontar y solucionar es la gestión de los diferentes residuos que genera (Cuevas y Walter, 2004). En Bolivia, muchas de las explotaciones mineras trabajan en condiciones precarias, utilizando tecnología completa e ineficiente que no garantiza la protección del medio ambiente; uno de los principales problemas que esta situación ocasiona es la contaminación de los ríos (Möeller *et al*, 2002). Se pueden esperar impactos en las tierras agrícolas que son regadas con aguas que contienen metales pesados. Este problema se presenta particularmente en regiones donde es grande la presión sobre las tierras agrícolas y recursos hídricos, de manera que los agricultores en las áreas aledañas y que comparten la cuenca con las minas, no tienen otra opción que usar esas aguas para riego (Lin *et al*, 2005). A largo plazo, esto puede resultar en la acidificación y acumulación de metales pesados en los suelos, lo que significa una potencial amenaza para la salud humana a través de la cadena alimenticia.

En Bolivia, la mayoría de las investigaciones sobre metales pesados originados por la minería se centran en su concentración en cuerpos de agua y suelos. Ello se refleja en la escasez de estudios sobre la toma de metales pesados por los cultivos en dichos suelos. Por otra parte, el reciente periodo de alza en los precios de varios minerales impulsó el incremento de actividades mineras, haciendo necesaria la actualización de investigaciones pasadas. En este trabajo se estudian los cambios de los contenidos de metales pesados en suelos sobre los que se desarrollan cultivos de maíz en una subcuenca del río Tupiza y se analiza la posible transferencia de los metales en el sistema suelo-planta. Es de esperar que la información generada sirva de base para la remediación de suelos agrícolas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Sitio de estudio

El área de investigación se encuentra en la provincia Sur Chichas, al sudeste del departamento de Potosí, y está limitada por las coordenadas geográficas 21° 06' a 21° 17' de latitud sur y 65° 42' a 66° 09' de longitud oeste (Figura 1). Los puntos de muestreo se encuentran a lo largo del río Tatasi, el cual tiene una longitud de 52 km y es tributario del río Tupiza. En su parte alta se encuentra el Centro Minero Tatasi, que registra explotaciones desde la época colonial. Actualmente es explotado por cooperativas mineras que extraen plomo, plata y zinc. El material potencialmente contaminante en el sitio incluye desmontes, drenaje ácido de mina y depósitos de colas.

El contacto de ríos pequeños y corrientes de aguas superficiales que pasan a través de la instalación de Tatasi, han sido identificados como la principal fuente de incorporación de metales en las aguas del río del mismo nombre. La distribución marcadamente estacional de la precipitación en la cuenca hace que las lluvias intensas impliquen una gran incorporación de metales; sin embargo, ésta también se presenta el resto del año aunque en menor magnitud (SERGEOMIN, 2003).

El flujo del río Tatasi constituye uno de los principales tributarios del curso de agua utilizado para riego en las partes bajas de la cuenca. Es así que los puntos de muestreo fueron ubicados en cuatro comunidades que se encuentran aguas abajo y cuya única fuente de agua para riego es el río: Hornos, Oro Ingenio, Villa Providencia y Tambillo Alto.

2.2. Metodología de campo

Se definió la fecha de muestreo (27 de enero del 2007) en base a Moya *et al* (2002), quienes afirman que los máximos contenidos de micronutrientes en las plantas se dan a finales de la primavera, y también en base a Lazo (2002), que indica que la incorporación fluvial de residuos mineros ocurre principalmente durante lluvias torrenciales. Es decir que la definición de la fecha estuvo orientada a determinar los máximos contenidos estacionales en suelos y material vegetal.

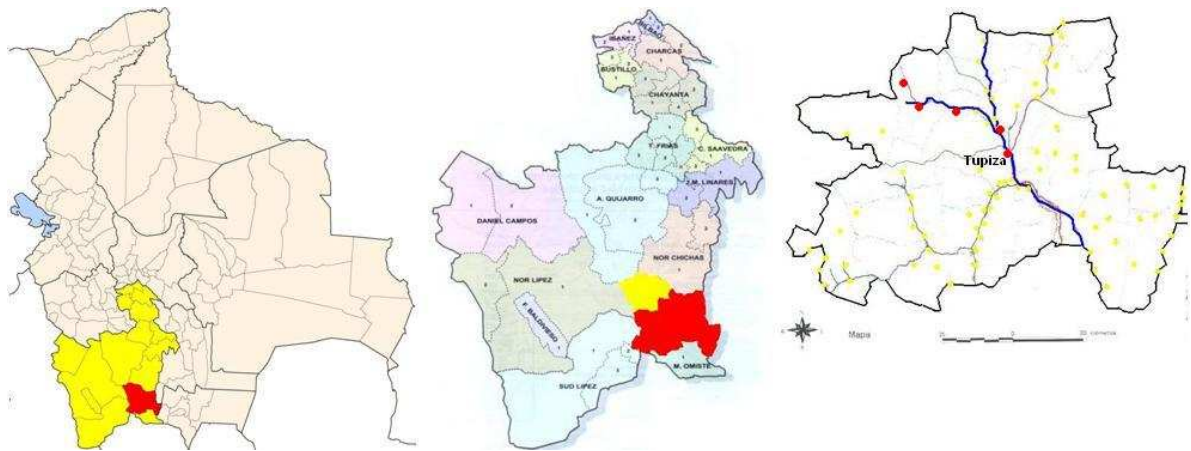


Fig. 1. Ubicación del área del estudio

Las muestras de suelos fueron recolectadas de las mismas parcelas estudiadas por SERGEOMIN (2003) para las comunidades de Hornos, Villa Providencia y Tambillo Alto. La comunidad de Oro Ingenio fue incluida para el presente estudio con el fin de tener un punto adicional para las pruebas de correlación y para homogeneizar la distribución espacial de los puntos de muestreo. En cada parcela se recolectaron 9 submuestras de suelo a 0.3 m de profundidad, las cuales fueron mezcladas para obtener una muestra compuesta representativa.

Al mismo tiempo, se recabaron muestras de material vegetal. Éstas consistieron en un muestreo aleatorio por parcela, donde se colectaron hojas de maíz (*Zea mays*) ubicadas debajo de la espiga y que ya presentaban sedas (barbas) de la inflorescencia femenina, de acuerdo a las recomendaciones de la Junta de Extremadura (1992). La extracción fue en un número de 3 hojas de cada planta a razón de 10 plantas por parcela, haciendo un total de 30 hojas por muestra compuesta (Moya *et al*, 2002).

2.3. Fase de laboratorio

En base a los resultados obtenidos por SERGEOMIN (2003), se definió estudiar las concentraciones de arsénico, antimonio, cadmio, plomo y zinc.

Para la determinación de la concentración de dichos metales pesados en los suelos se recurrió al Laboratorio de Geoquímica de la Universidad Autónoma Tomás Frías (Potosí), donde se realizaron los análisis mediante la técnica de la absorción atómica de llama.

También se realizaron análisis de los parámetros considerados más relevantes por diversos autores (Seoáñez, 1999; Álvarez, 2004; Ramos *et al*, 2001), para explicar la dinámica de los metales en el suelo. Para el pH acuoso se utilizó una dilución 1:2 mediante potenciometría. La textura fue determinada mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos. La conductividad eléctrica (CE) fue obtenida por el método de potenciometría; la capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue calculada mediante los datos de Ca, Na, K Mg; y el contenido de carbonatos mediante volumetría. Además se determinó el contenido de materia orgánica.

La determinación de metales pesados en el material vegetal fue realizada por el Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental de la Universidad Mayor de San Simón (Cochabamba), empleando la técnica de absorción atómica de llama.

2.4. Análisis de datos

Para el análisis comparativo entre los resultados del 2003 y los del presente estudio, se utilizó la

prueba de un rango con signo de Wilcoxon, utilizando un 90% de confiabilidad. Se la escogió porque toma en cuenta tanto el signo como la magnitud de las diferencias entre pares de observaciones, además de que admite pocos datos.

También se empleó el coeficiente de correlación lineal de Pearson (r) para determinar las relaciones entre las concentraciones en el material vegetal, el suelo y la distancia a la probable fuente de contaminación (Centro Minero Tatasi). Además se determinó el índice de bioacumulación (IB) según la ecuación citada por Juárez *et al* (2006):

$$IB = \text{metal en planta (mg/kg)} / \text{metal en suelo (mg/kg)} \quad (1)$$

3. RESULTADOS

3.1. Concentraciones de metales pesados en las muestras de suelos

Las concentraciones determinadas en el presente estudio y en el de SERGEOMIN (2003), además de los límites permisibles, son presentadas en la Tabla 1. La mayoría de las concentraciones exceden los límites permitidos por las normas consideradas. Es destacable el caso del Zn, pues sus datos superan en más de 10 veces el límite, seguido por el arsénico que en todos los casos excede el límite en un orden de 3 veces o más. El único elemento que se acerca al contenido permisible es el antimonio.

Tabla 1. Concentraciones de metales pesados en suelos de la cuenca del río Tatasi comparados con los límites permisibles

Elemento	Límite permisible	Hornos		Oro Ingenio	Villa Providencia		Tambillo Alto	
		2003	2007	2007	2003	2007	2003	2007
Cd (ppm)	3 (a)	2.1	10.6	9.2	1.2	7.4	0.8	4.1
Pb (ppm)	100 (a)	196.0	492.0	395.5	131.0	221.0	128.0	81.3
Zn (ppm)	300 (a)	760.0	5304.0	4809.3	520.0	4382.0	276.0	3094.0
Sb (ppm)	5 (a)	61.0	6.9	6.6	47.0	6.4	51.0	3.6
As (ppm)	20 (b)	102.0	151.7	104.9	86.0	72.5	83.0	59.4

Fuentes: Fundación MEDMIN (1996), GTZ (1996), SERGEOMIN (2003)

(a) Normativa australiana; (b) Normativa boliviana

Los datos de los análisis estadísticos realizados son presentados en la Tabla 2. En base a los datos obtenidos de la prueba de Wilcoxon para los datos pasados y presentes, se contrastaron las respectivas hipótesis, cuyos resultados fueron que el Cd y el Zn incrementaron significativamente sus concentraciones; el Pb y el As no reportaron diferencias significativas y el Sb disminuyó respecto a los datos pasados.

Los incrementos de Cd y Zn eran esperados considerando que el primero es sustituto del segundo en forma de impureza en los minerales y diversos compuestos naturales (Micó, 2005); es por eso que la extracción de zinc arrastra menas de cadmio en forma de impurezas constituyendo una fuente de contaminación de ambos elementos (Navarro *et al*, 2006). En el caso del Pb existe un incremento que, aunque no es significativo estadísticamente, está relacionado con la actividad minera tomando en cuenta que en suelos contaminados se encuentra asociado a Cd y Zn (Hettiarachchi y Pierzynski, 2002).

Por otra parte, es destacable la fuerte correlación entre las concentraciones de Pb, Zn y As, y la distancia a través del curso del río hasta la posible fuente de contaminación. Esto implicaría que el transporte de dichos elementos en la cuenca se produce casi exclusivamente a través del cuerpo de agua, minimizando el transporte mediante el viento y confirmando lo expresado por los productores de la zona en el sentido de que el uso de agroquímicos es mínimo.

Tabla 2. Parámetros estadísticos calculados para contenidos de metales en suelos

Elemento	Estadístico T+ de Wilcoxon	z calculada	r para correlación entre contenido en suelo y distancia al Centro Minero	Significación (P)
Cadmio	0	-2	-0.97	-4.16
Plomo	1	-1	-0.98*	-6.96
Zinc	0	-2	-0.95*	-4.37
Antimonio	6	4	-0.84	-2.21
Arsénico	3	1	-0.95*	-4.54

* La correlación es significativa al nivel 0.05

En la Tabla 3 se presentan los coeficientes de correlación de Pearson (r) y la significación (P) en el estudio de las correlaciones entre los contenidos totales de metales pesados. A partir de los datos presentados, se observa que la mayoría de los metales están correlacionados entre sí. Estos resultados parecen indicar que el aumento del contenido de un metal puede estar relacionado con el aumento del resto de metales, revelando un origen común y/o que procesos similares controlarían las interrelaciones con los componentes del suelo (Chen *et al*, 1999).

Tabla 3. Correlaciones entre los contenidos de metales pesados

Variable		Cd	Pb	Zn	Sb	As
Cd	r	1.00				
	P	-				
Pb	r	0.98 (b)	1.00			
	P	7.39	-			
Zn	r	1.00 (a)	0.96 (b)	1.00		
	P	16.84	5.06	-		
Sb	r	0.94 (c)	0.86	0.96 (b)	1.00	
	P	3.90	2.41	5.07	-	
As	r	0.90 (c)	0.95 (b)	0.88	0.71	1.00
	P	3.01	4.37	2.56	1.44	-

(a) La correlación es significativa al nivel de 0.01;

(b) La correlación es significativa al nivel de 0.05;

(c) La correlación es significativa al nivel de 0.1

El coeficiente de correlación más alto es el de la relación Zn y Cd, respaldando la hipótesis del origen común debido a la actividad minera (Micó, 2005). Los elementos que presentan menor correlación con el resto de los metales son el antimonio y el arsénico. Esta falta de correlación podría deberse a su origen antrópico (Chen *et al*, 1999); de hecho ambos elementos tienen correlación con el Cd y más fuerte aún el Sb con Zn y el As con Pb, que son metales procedentes de la actividad minera.

En la tabla 4 se presentan los coeficientes de correlación de Pearson (r) y la significación (P) entre las propiedades edáficas estudiadas con los contenidos totales de metales pesados en las muestras de suelos.

La correlación lineal con los parámetros edáficos analizados fue baja en general. Únicamente la conductividad eléctrica muestra valores altos de r, aunque sólo es significativo el obtenido en su relación con el Pb. Esto indica que la salinidad del suelo podría influir en la dinámica de este metal, si bien no existen referencias respecto a esta posible interacción. Similar es el caso del limo respecto al Zn, pero en este caso la relación es inversa, lo que quiere decir que a mayor porcentaje de limo,

menor concentración de Zn en el suelo.

Tabla 4. Correlaciones entre las propiedades y características edáficas y los contenidos totales de metales pesados

Variable		pH	Arcilla	Limo	Arena	CE	CIC	Carbonatos	M.O.
Cd	r	-0.50	-0.70	-0.96	0.71	0.95	-0.59	-0.73	-0.22
	P	-0.57	-0.97	-3.35	1.01	3.08	-0.74	-1.07	-0.22
Pb	r	-0.26	-0.49	-0.85	0.51	1.00 a	-0.37	-0.53	-0.46
	P	-0.27	-0.56	-1.64	0.59	18.10	-0.40	-0.63	-0.52
Zn	r	-0.68	-0.84	-1.00 a	0.85	0.86	-0.76	-0.87	0.01
	P	-0.94	-1.56	-16.85	1.63	1.65	-1.18	-1.75	0.01
Sb	r	0.06	-0.19	-0.65	0.21	0.97	-0.06	-0.24	-0.72
	P	0.06	-0.19	-0.85	0.22	3.69	-0.06	-0.25	-1.03
As	r	-0.36	-0.58	-0.90	0.60	0.99	-0.47	-0.62	-0.36
	P	-0.39	-0.71	-2.12	0.75	6.06	-0.53	-0.79	-0.39

a La correlación es significativa al nivel de 0.05

Existe la posibilidad de que las correlaciones sean de otro tipo, no necesariamente lineales (Micó, 2005), debido a que las interacciones entre los componentes del sistema suelo-planta pueden influir unas sobre otras, teniendo como resultado reacciones y procesos complejos, difíciles de describir (Cuevas y Walter, 2004).

3.2. Concentraciones de metales pesados en las muestras vegetales

Se tuvieron que descartar las determinaciones de As en el material vegetal debido a problemas técnicos del equipo de absorción atómica. Los contenidos de metales pesados en el cultivo sigue la siguiente secuencia: Zn>Pb>Sb>Cd. El micronutriente Zn presenta los contenidos más elevados, mientras que los más bajos corresponden al Cd, que es considerado no esencial y tóxico, y al Sb que, aunque se considera beneficioso para algunas plantas superiores (Cava, 2005), aparece también en bajas concentraciones.

En la Tabla 5 se muestran los principales parámetros obtenidos del análisis de contenidos de metales pesados para el cultivo de maíz, en base a peso seco. También se incluyen los límites máximos establecidos por diversas fuentes.

Tabla 5. Parámetros obtenidos para el análisis de metales pesados en material vegetal

Elemento	Límite admisible (mg/Kg)	Valores medios (mg/Kg)	r para correlación entre contenido en suelo y contenido en planta	Significación (P)	IB
Cadmio	0.5 (a)	6.21	0.93 *	3.51	0.79
Plomo	10.0 (b)	127.31	0.97 **	5.98	0.43
Zinc	100.0 (b)	753.58	0.93 *	3.65	0.17
Antimonio	nd	67.29	0.86	2.36	11.41

Fuentes: Kabata-Pendias (2000); FAO/WHO (1993)

(a) Kabata-Pendias, 2000; (b) Normativa argentina; nd No disponible

* La correlación es significativa al nivel de 0.1; ** La correlación es significativa al nivel de 0.05

Los tres elementos para los cuales se obtuvieron límites (i.e. Cd, Pb, Zn), presentan valores que superan en varios órdenes de magnitud a dichas recomendaciones. En cuanto a las correlaciones,

presentan en general un buen ajuste; esto implica que los contenidos de Cd, Pb y Zn en las plantas pueden ser explicados en gran parte por el contenido total de los mismos elementos en el suelo.

El bajo IB presentado por el maíz para el zinc puede ser explicado por el efecto antagónico que provoca la presencia adicional del cadmio en el suelo (Juárez *et al*, 2006); esto se confirmaría por el alto IB de dicho elemento. Seoáñez (1999) afirma que la vegetación tiene preferencia por el Cd debido a que éste se almacena en el suelo en formas asimilables por la planta durante varios años. Un aspecto a considerar es que el Cd es considerado más zootóxico que fitotóxico, por tanto puede acumularse en el tejido vegetal en cantidades tóxicas para los animales y el hombre, sin que ello produzca un efecto adverso en la planta (Carrasco *et al*, 2003).

El IB del Pb es limitado a pesar de los altos niveles encontrados en el suelo, debido a que le afectan muchos procesos de inmovilización química en el suelo (Pinochet *et al*, 2002). Por eso, generalmente se limita la transferencia del suelo a la parte aérea de la planta (Cuevas y Walter, 2004).

La incorporación de Sb en la planta merece una mención especial. Por una parte, no ha recibido mucha atención en el análisis de alimentos y ambiental, debido a que no es un elemento esencial y sus niveles de concentración generalmente son bajos (Cava, 2005). Sin embargo, el elevado índice de bioacumulación representa un aporte considerable a la cadena alimenticia con todas las consecuencias que ello implica. El maíz es ampliamente reconocido como planta hiperacumuladora de Pb (Quanlin *et al*, 2007); el presente estudio sugiere que también tiene potencial para remediar suelos con altos contenidos de Sb.

4. CONCLUSIONES

Todos los resultados del presente estudio tienen un carácter de aproximación debido al tamaño muestral empleado. Los suelos de la cuenca estudiada presentan concentraciones muy altas de metales pesados, siendo el origen más probable la actividad minera localizada aguas arriba. Los resultados obtenidos en distintas temporadas sugieren que la incorporación al suelo es por un proceso de almacenamiento debido al constante contacto con el agua de riego.

Si bien no fue posible establecer correlaciones claras entre la influencia de diversos parámetros y propiedades edáficas sobre la dinámica de los metales pesados en el suelo, su papel es ampliamente reconocido; por tanto, lo más probable es que al ser las interacciones tan complejas, sean también difíciles de describir por correlación lineal.

Finalmente, se ha comprobado el ingreso de metales pesados a los tejidos del maíz con altas posibilidades de que dicho ingreso sea efecto directo de sus concentraciones en el suelo, implicando que el almacenamiento en el suelo se está produciendo en formas asimilables por la vegetación.

5. RECOMENDACIONES

Es evidente la necesidad de encarar nuevas investigaciones en el país respecto a la presencia de metales pesados en el ambiente actualizando metodologías e iniciando la adecuación regional de las normas legales, pero sobre todo buscando alternativas efectivas y de bajo costo para la remediación de suelos. Específicamente en la cuenca estudiada, es necesario priorizar la investigación en la calidad del agua, no sólo por las implicaciones que tiene su uso en riego, sino también porque una parte de la provisión de agua potable es tomada del río Tupiza.

Los estudios deben incluir metodologías de análisis geológico y geoestadístico, para determinar con mayor confianza el origen de los elementos traza, además de optimizar los puntos de muestreo; y permitir establecer redes permanentes de monitoreo de la calidad ambiental de las cuencas. Por otra parte, se debe hacer énfasis en que la mayoría de los estudios en Bolivia recurren al contenido total de metales pesados, cuando la tendencia a nivel mundial es estudiar los contenidos solubles de dichos elementos, por ser los más susceptibles de ingresar en la cadena alimenticia, y representar mejor el estado de contaminación de los suelos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- ÁLVAREZ, L. 2004. Mineralización *in vitro* de nitrógeno y fósforo y contenido de metales pesados en suelos acondicionados con lodo proveniente de una planta de tratamiento de aguas servidas. Tesis de grado de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. Chile.
- CAVA, P. 2005. Empleo de las técnicas atómicas para el análisis multielemental y la especiación en alimentos. Tesis de doctorado. Facultad de Química. Universidad de Valencia. España.
- CARRASCO, M., Ahumada, I., Castillo, G., Sadzawka, A., Pedraza, C., León, O. 2003?. Absorción de Cu y Zn en ballica (*Lolium perenne*) cultivada en suelos tratados con biosólidos. Universidad de Chile. Chile.
- CHEN, M., Ma, L., Harris, W. 1999. Baseline concentrations of 15 trace elements in Florida surface soils. *Journal of Environmental Quality* 28:1173-1181
- CUEVAS, G., Walter, I. 2004. Metales pesados en maíz (*Zea mays*) cultivado en un suelo enmendado con diferentes dosis de compost de lodo residual. *Revista Internacional Contaminación Ambiental* 20(2):59-68
- FAO/WHO. 1993. Joint FAO/WHO Food Standards Programme, Codex Alimentarius Commission, 20th Session, Geneva 28 June-7 July 1993.
- FUNDACIÓN MEDIO AMBIENTE, MINERÍA E INDUSTRIA. 1996. Reglamentos a la Ley del Medio Ambiente de Bolivia. Fundación Medio Ambiente, Minería e Industria. MEDMIN. La Paz, Bolivia.
- GTZ. 1996. Guía de protección Ambiental. Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo. Catálogo de Estándares ambientales. Tomo 3. Editorial Vieweg. Alemania
- HETTIARACHCHI, G., PIERZYNSKI, G. 2002. In situ stabilization of soil lead using phosphorus and manganese oxide: Influence of plant growth. *Journal of Environmental Quality* 31:564-573
- JUÁREZ, M., SÁNCHEZ, J., SÁNCHEZ, A. 2006. Química del suelo y medio ambiente. Universidad de Alicante. Alicante, España.
- JUNTA DE EXTREMADURA. 1992. Análisis de suelo, foliar y agua de riego. Coedición Junta de Extremadura y Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- KABATA-PENDIAS, A. 2000. Trace elements in soils and plants. Third Edition. CRC Press. Boca Raton, USA
- LAZO, I. 2002. Evaluación de la contaminación por arsénico y metales pesados (Pb, Cu, Zn) y análisis de riesgo en salud en Villa de La Paz-Matehuala, San Luis Potosí. Tesis de maestría en Ingeniería de Minería. Facultad Ingeniería. Universidad Autónoma San Luis Potosí. México.
- LIN, C., Lu, W., Wu, Y. 2005. Agricultural soils irrigated with acidic mine water: acidity, heavy metals, and crop contamination. *Australian Journal of Soil Research* 43:819-826
- MICÓ, C. 2005. Estudio de metales pesados en suelos agrícolas con cultivos hortícolas de la provincia de Alicante. Tesis de Doctorado. Facultad de Farmacia. Universidad de Valencia. España.
- MÖELLER, H., TRUJILLO, E., SORIA, N., SORIA, Y., CHOQUE, E., JACINTO, F. 2002. Dinamitas y contaminantes: cooperativas mineras y su incidencia en la problemática ambiental. Fundación PIEB. La Paz, Bolivia.
- MOYA, J., RAMÍREZ, R., FOROUGHBAKHCH, R., HÁUAD, L., GONZÁLEZ H. 2002. Variación estacional de minerales en las hojas de ocho especies arbustivas. *Ciencia UANL* 5(1):59-65
- NAVARRO, A., RAMOS, K., CAMPOS, K., MALDONADO, H. 2006. Elucidación del efecto del pH en la adsorción de metales pesados mediante biopolímeros naturales: cationes divalentes y superficies activas. *Revista Iberoamericana de Polímeros* 7(2):113-126
- PINOCHET, D., AGUIRRE, J., QUIROZ, E. 2002. Estudio de la lixiviación de cadmio, mercurio y plomo en suelos derivados de cenizas volcánicas. *Agrosur* 30(1)
- QUANLIN, D, JIANGANG, Y, WEI, F, ZHONGYI, Y. 2007. Differences on Pb accumulation among plant tissues of 25 varieties of maize (*Zea mays*) (Author abstract). *Frontiers of Biology in China* 2(3):303
- RAMOS, R., CAJUSTE, L., FLORES, D., GARCÍA, N. 2001. Metales pesados, sales y sodio en suelos de Chinampa en México. *Agrociencia* 35:385-395
- SEOÁÑEZ, M. 1999. Aguas residuales: tratamiento por humedales artificiales. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- SERGEOMIN. 2003. Clasificación de cuerpos de agua en las cuencas altas de los río Tupiza y Cotagaita. Dirección de Recursos Naturales y Medio Ambiente de la Prefectura del Departamento de Potosí. Bolivia.