

Evaluación del índice de geoacumulación de algunos metales pesados en suelos de cultivo de hortalizas en la ribera del río Bogotá

Walter Pérez-Mora

Grupo de investigación en procesos industriales Neurona, Centro de Gestión Industrial, Servicio Nacional de aprendizaje – SENA, carrera 15 # 31 42, Bogotá D.C., Colombia.

whperez@sena.edu.co

Fecha recepción: abril 12 de 2020

Fecha aceptación: junio 30 de 2020

Resumen

El aumento poblacional y consecuentemente la alta demanda en los procesos de industrialización de diferentes complejidades, ha causado diversas problemáticas de carácter ambiental como el aumento en la concentración de metales pesados, que causan variados efectos sobre la salud, en diferentes matrices ambientales, particularmente agua que constituye por lo general el primer destino de vertimientos, agua que particularmente en el caso colombiano es usada para riego en suelos de cultivo. De acuerdo a esto, en el presente estudio se analizaron suelos de cultivo de los municipios de Sibaté, Tenjo, Mosquera, Facatativá, Siberia, en el departamento de Cundinamarca, y la localidad de Bosa de la ciudad de Bogotá, Colombia, influenciados por el cauce del río Bogotá, midiendo las concentraciones de cromo, cadmio, plomo y níquel por espectrofotometría de absorción atómica con horno de grafito. Para evaluar el grado de contaminación se calculó el índice de geoacumulación, encontrando que los suelos están clasificados como moderada y extremadamente contaminados, particularmente en contenidos de cromo en todas las zonas de muestreo estudiadas, y de plomo y cadmio en la zona de Sibaté. Se recomienda analizar los contenidos en vegetales para evaluar el efecto en las cadenas tróficas.

Palabras clave: *Espectrofotometría de absorción atómica; Índice de geoacumulación; Horno de grafito; Metales pesados; Río Bogotá.*

Evaluation of the geoaccumulation index of some heavy metals in vegetable cultivation soils on the Bogotá riverbank

Abstract

The population increase and consequently the high demand in the industrialization processes of different complexities, has caused various environmental problems such as the increase in the concentration of heavy metals, which cause various effects on health, in different environmental matrices, particularly water that it is generally the first destination for dumping, water that, particularly in the Colombian case, is used for irrigation in cultivated soils. Accordingly, in this study, cultivated soils from the municipalities of Sibaté, Tenjo, Mosquera, Facatativá, Siberia, in the department of Cundinamarca, and the town of Bosa in the city of Bogotá, Colombia, influenced by the Bogotá river, measuring the concentrations of chromium, cadmium, lead and nickel by atomic absorption spectrophotometry with a graphite furnace. To assess the degree of contamination, the geoaccumulation index was calculated, finding that the soils are classified as moderate and extremely contaminated, particularly in chromium contents in all the sampling areas studied, and lead and cadmium in Sibaté. It is recommended to analyze the contents in vegetables to evaluate the effect on the food chains.

Keywords: *Atomic absorption spectrophotometry; Geoaccumulation index; Graphite furnace; Heavy metals; Bogotá river.*

Avaliação do índice de geoacumulação de alguns metais pesados em solos de cultivo vegetal na margem do rio Bogotá

Resumo

O aumento da população e, conseqüentemente, a alta demanda nos processos de industrialização de diferentes complexidades, causaram diversos problemas ambientais, como o aumento da concentração de metais pesados, que causam diversos efeitos na saúde, em diferentes matrizes ambientais, principalmente a água que Geralmente é o primeiro destino para o despejo, a água que, particularmente no caso colombiano, é usada para irrigação em solos cultivados. Nesse sentido, neste estudo, foram analisados solos cultivados nos municípios de Sibaté, Tenjo, Mosquera, Facatativá, Siberia, no departamento de Cundinamarca, e na cidade de Bosa, na cidade de Bogotá, Colômbia, influenciada pelo leito do rio. do rio Bogotá, medindo as concentrações de cromo, cádmio, chumbo e níquel por espectrofotometria de absorção atômica com forno de grafite. Para avaliar o grau de contaminação, calculou-se o índice de geoacumulação, constatando que os solos são classificados como moderados e extremamente contaminados, principalmente no teor de cromo em todas as áreas amostradas e chumbo e cádmio na área de Sibaté. Recomenda-se analisar o conteúdo em vegetais para avaliar o efeito nas cadeias alimentares.

Palavras-chave: *Espectrofotometria de absorção atômica; Índice de geoacumulaçã; Forno de grafite; Metais pesados; Rio Bogotá.*

Introducción

La contaminación ambiental por metales pesados y la seguridad alimentaria asociada es una preocupación mundial importante hoy en día. Aunque naturalmente se presentan contenidos en la corteza terrestre, son los factores antropogénicos como los procesos de industrialización, el riego con aguas residuales de procesos industriales y la dependencia de fertilizantes fosfatados, los que han aumentado la biodisponibilidad de metales pesados como cadmio y plomo en el medio ambiente afectando particularmente el sistema suelo-planta. Los metales pesados son contaminantes peligrosos, no biodegradables debido a sus altos tiempos de vida media [1], y su presencia en agricultura afecta el principio de seguridad alimentaria que deben profesar las naciones, ya que no es posible asegurar la disponibilidad de alimentos libres de metales pesados tóxicos para los consumidores en las cadenas tróficas, y el principio de seguridad en la salud pública [1,2].

La contaminación por metales pesados está influenciada de manera natural por proceso de meteorización de minerales y las erupciones volcánicas [3], sin embargo, en las últimas décadas, la concentración de cadmio en el medio ambiente ha aumentado más que otros metales pesados debido al uso de fertilizantes fosfatados, procesos galvánicos, elaboración de pigmentos y la industria del cemento; por su parte la contaminación por plomo ha crecido a causa de la mala disposición, manejo de baterías de plomo y la estabilización de pigmentos y pinturas [4,6]. Mientras que los contenidos de cromo han aumentado por procesos de la industria de la curtiembre y procesos de galvanizado, al igual que el níquel. Debido a la alta movilidad del suelo y la disponibilidad de estos metales, hay preocupación acerca de la fitotoxicidad y los consecuentes riesgos sobre el consumidor final en las cadenas tróficas [4], en este sentido el cadmio es considerado como un carcinógeno humano clase I de acuerdo a la agencia internacional para la investigación en cáncer (IARC) [5], mientras que el plomo después del arsénico, se reportó como la segunda sustancia más peligrosa por la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades [7]. Por otro lado, el níquel causa alergias en personas expuestas que puede producir bronquitis crónica, disminución de la función pulmonar, cáncer de los pulmones

y los senos nasales [8]; el cromo es altamente cancerígeno y puede producir efectos sistémicos, inmunológicos, neurológicos, genotóxicos, entre otros [9]. Estos metales se difunden en las cadenas alimentarias principalmente por el uso de aguas de riego no óptimas para los cultivos, en Colombia, por ejemplo, se utilizan aguas residuales crudas o parcialmente tratadas de origen doméstico, pecuario, industrial y agroindustrial para el riego de cultivos. En la Sabana de Bogotá, en el distrito de riego y drenaje de la Ramada, se riegan 3.500 hectáreas de cultivos de hortalizas, flores y pastos con agua bombeada del río Bogotá [10,11].

Desde su nacimiento en el municipio de Villapinzón, el río Bogotá recibe contaminación proveniente de curtiembres en su mayoría artesanales presentes en este municipio tras su recorrido de 380 km. En su recorrido el río recibe los vertimientos domiciliarios e industriales de 42 municipios incluyendo municipios con alta presencia de industrias de diferentes sectores económicos, y además recibe los vertimientos de Bogotá y de su sistema hídrico (ríos Salitre, Fucha y Tunjuelo), que albergan aproximadamente un 19% de la población del país en donde se genera aproximadamente un 26% de la actividad económica nacional [12,13].

Aunque se reporta que el río recibe aproximadamente 51,62 toneladas al mes de metales pesados provenientes de vertimientos industriales, de acuerdo a lo expresado por la Corporación Autónoma Regional CAR, en el acuerdo 043 de 2006 [14], por el cual se establecen los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020, la cual indica que de acuerdo a los usos que se le da al río, las concentraciones de metales son aceptables, y sólo se recomienda que en los ambientes localizados donde puntualmente se presentan excesos en los niveles de estos metales se lleven a cabo las medidas necesarias de contingencia.

Sin embargo, se reporta que el riego constante con aguas contaminadas por causas antropogénicas aumentan las concentraciones de los metales pesados en los suelos y por lo tanto aumenta la biodisponibilidad de esto a las plantas cultivadas en estos terrenos [2,15,17]. Los cultivos de hortalizas comerciales y residenciales a menudo se encuentran en zonas urbanas y están sujetas a contaminación antropogénica de diversas fuentes, como: desechos urbanos e industriales, industrias mineras y de fundición y metalúrgicas [2]. En el caso de Bogotá, mediciones realizadas

en la cuenca media del río Bogotá en el municipio de Soacha demuestran que cultivos de hortalizas como lechuga, apio y brócoli, presentan contenidos mayores a los límites permitidos por normas internacionales tanto para cadmio como para plomo [10], lo cual es una alerta para las autoridades nacionales y de países en desarrollo donde se presenta este fenómeno [2,16].

En este estudio se realiza un diagnóstico de la cantidad de metales pesados plomo (Pb), cromo (Cr), cadmio (Cd) y níquel (Ni), en suelos de cultivo influenciados por aguas de la cuenca media del río Bogotá, con el fin de caracterizar la problemática ambiental a nivel suelo en el departamento de Cundinamarca, Colombia, teniendo como referencia la medición del índice de geocumulación.

Materiales y métodos

Muestreo

Las muestras de suelos se tomaron de acuerdo a la norma ISO 18400:2018 (parte 205) [18], a 30 cm de profundidad, de suelos de cultivo en diferentes municipios influenciados por la ribera de la cuenca media del río Bogotá o que utilizan aguas de uso agrícola provenientes del distrito de riego la Ramada y el distrito de Riego Bojacá-La Herrera, alimentados en gran parte por aguas del río Bogotá, con ubicaciones de acuerdo a la tabla 1. Se tomaron 10 submuestras de cada zona de muestreo, se mezclaron para finalmente tomar la muestra definitiva. Las muestras del municipio de Facatativá se consideran en este ensayo como control debido a que es el lugar más alejado de las influencias del río Bogotá, de los considerados en este estudio.

Tabla 1. Ubicación de los sitios de muestreo.

<i>Lugar de muestreo</i>	<i>Longitud oeste</i>	<i>Latitud norte</i>
Bosa	-74,203	4,646
Sibate	-74,263	4,543
Facatativa	-74,354	4,838
Tenjo	-74,140	4,868
Siberia	-74,196	4,775
Mosquera	-74,210	4,685

Análisis de suelos

El suelo colectado se guardó en bolsas de plástico, fue secado a temperatura ambiente (20°C), homogeneizado, molido y tamizado a una malla de 2 mm para la cuantificación de metales pesados. El contenido de metales pesados contaminantes se calculó por espectrofotometría de absorción atómica con horno de grafito de fuente continua de alta resolución (HR-CS GFAAS por sus siglas en inglés) con un espectrofotómetro ContrAA 700 con horno de grafito (Analytik Jena, Jena – Alemania), de acuerdo al método de la ISO 11047-1998 [19], aún vigente. La extracción de las muestras de suelo se realizó por el sistema de digestión asistida por microondas Top Wave (Analytik Jena, Jena –

Alemania), mediante el método de Mehlich que permite la extracción de microelementos utilizando como solución extractante ácido clorhídrico (HCl) 0,05M y ácido sulfúrico (H₂SO₄) 0.05M recomendado para todo tipo de suelos.

Las condiciones de análisis para cada uno de los metales analizados se pueden observar en la tabla 2, y las ecuaciones para las curvas de calibración preparadas con patrones de calibración de 1000 ppm cada elemento (Panreac) y su coeficiente de correlación lineal (R²) se pueden observar en la tabla 3.

Los análisis se realizaron en el laboratorio de Espectrofotometría de la Universidad Escuela Colombiana de Carreras industriales ECCI.

Tabla 2. Parámetros analíticos optimizados para análisis de metales pesados por HR-CS GFAAS.

Metal	Longitud de onda (nm)	Secado (°C)	Pirólisis (°C)	Atomizado (°C)	Calcinado (°C)
Cromo	357	80 – 110	1300	2300	2450
Cadmio	228	80 – 110	350 y 600	1200	2450
Níquel	232	90-110	350 y 1050	2300	2450
Plomo	217	90-110	350 y 800	1500	2450

Tabla 3. Curvas de calibración para análisis de metales pesados por HR-CS GFAAS.

Metal	curva de calibración	R²
Cromo	Abs = 0,0043ppb de Cr - 0,0041	0,9969
Cadmio	Abs = 0,0057ppb de Cd - 0,0058	0,9914
Níquel	Abs = 0,0019ppb de Ni - 0,0017	0,9958
Plomo	Abs = 0,022ppb de Pb - 0,0027	0,9927

Cálculo del índice de geoacumulación (I-geo)

El índice de geo-acumulación (*I-geo*) propuesto por Müller (1969) [20], es ampliamente utilizado para evaluar la contaminación a través de la relación de la concentración de un analito en la matriz de estudio frente a los valores de referencia o control. El índice de geoacumulación se calcula de acuerdo a la ecuación (1) [21,22]:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1.5 * B_n} \quad (1)$$

donde C_n es la concentración medida del metal contaminante n (mg/kg) en el suelo, B_n es el valor de fondo geoquímico (mg/kg) del elemento en la muestra control (para este caso se tomó al municipio de Facatativá) y el factor de 1.5 es introducido para reducir al mínimo los efectos de las posibles variaciones en los valores de fondo que puede atribuirse a efectos litogénicos [21,23]. El resultado del *I-geo* da una medida del grado de contaminación de un suelo o sedimento y los clasifica en siete categorías de acuerdo a la tabla 4.

Tabla 4. Clasificación del grado de contaminación de suelos de acuerdo al cálculo del *I-geo* (21).

Valor I-geo	Clasificación I-geo	Nivel de contaminación
< 0	0	No contaminado
0-1	1	No contaminado a moderadamente contaminado
1-2	2	Moderadamente contaminado
2-3	3	De moderado a fuertemente contaminado
3-4	4	Fuertemente contaminado
4-5	5	De fuertemente contaminado a extremadamente contaminado
> 5	6	Extremadamente contaminado

Análisis estadístico

Se identificaron 6 zonas de muestreo influenciadas por aguas de la cuenca media del río Bogotá. En cada zona se tomaron 10 submuestras las cuales fueron mezcladas para obtener finalmente una muestra compuesta del suelo. Cada muestra fue analizada por triplicado. Se realizaron análisis de varianza para identificar diferencias significativas entre zonas de muestreo, y se realizó un test de comparaciones múltiples de Tukey para identificar

qué zonas de muestreo son estadísticamente diferentes para cada metal. Para el análisis estadístico se utilizó el software Minitab 17.

Resultados y discusión

El contenido de metales pesados cromo, cadmio, níquel y plomo medido en las seis zonas de muestreo por HR-CS GFAAS se pueden observar en la tabla 5.

Tabla 5. Contenido de metales pesados en suelos medidos por HR-CS GFAAS.

Lugar de muestreo	Cromo (mg/kg)	Cadmio (mg/kg)	Níquel (mg/kg)	Plomo (mg/kg)
Bosa	2,71 ^b ± 0,20	0,79 ^c ± 0,06	0,34 ^b ± 0,07	2,42 ^b ± 0,09
Sibaté	35,7 ^a ± 1,3	6,86 ^a ± 0,29	0,12 ^d ± 0,01	27,5 ^a ± 3,2
Facatativá	0,54 ^f ± 0,02	0,20 ^d ± 0,01	0,42 ^b ± 0,05	0,31 ^c ± 0,01
Tenjo	1,03 ^d ± 0,09	1,12 ^b ± 0,02	0,26 ^c ± 0,02	0,24 ^d ± 0,01
Siberia	3,52 ^c ± 0,43	0,10 ^e ± 0,01	1,25 ^a ± 0,30	0,22 ^d ± 0,02
Mosquera	0,96 ^e ± 0,01	0,20 ^{d,e} ± 0,09	0,18 ^d ± 0,06	0,11 ^e ± 0,01
Contenido promedio mundial (24)	42	1,1	18	25

(Los valores se reportan como promedio ± desviación estándar, diferente letra en cada columna significan diferencias significativas en el contenido del metal entre lugares de muestreo de acuerdo a un test de Tukey p<0.5)

Tomando como suelo control el de Facatativá, puesto que es el suelo que se encuentra más alejado del río, se calculó el índice de geoacumulación y se clasificó. En la figura 1 se puede observar el *I-geo* para cada metal en cada lugar de muestreo (La gráfica de radar permite visibilizar el nivel de contaminación, valores negativos se interpretan

como suelos no contaminados, valores más alejados del centro se interpretan como suelos más contaminados para cada parámetro), y en la tabla 6 el resultado de acuerdo a la clasificación resultado del cálculo del *I-geo* si se tiene en cuenta la clasificación de la tabla 4 reportada por Eqani *et al.* [21] y Hanif *et al.* [23].

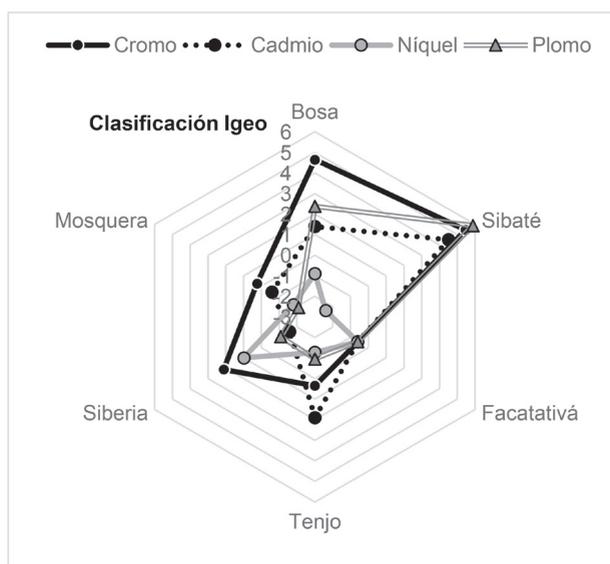


Figura 1. Índices de geoacumulación para cada suelo y contaminante.

Tabla 6. Clasificación de los suelos analizados de acuerdo a su Igeo.

Lugar de muestreo	Cromo	Cadmio	Níquel	Plomo
Bosa	Clase 5	Clase 2	Clase 0	Clase 3
Sibaté	Clase 6	Clase 5	Clase 0	Clase 6
Facatativá	Control	Control	Control	Control
Tenjo	Clase 1	Clase 2	Clase 0	Clase 0
Siberia	Clase 3	Clase 0	Clase 1	Clase 0
Mosquera	Clase 1	Clase 0	Clase 0	Clase 0

Clase 0 no contaminado, clase 6 extremadamente contaminado – ver tabla 4.

En el presente estudio se encuentra que el caso más preocupante es el del contenido de metales pesados en el municipio de Sibaté. Respecto al contenido de cromo, aunque las concentraciones del metal encontradas son menores al promedio reportado como mundial por Machado *et al.* [24], se puede sugerir de acuerdo a los valores encontrados que hay una contaminación antropogénica, ya que los niveles de cromo son considerablemente más altos en comparación con las demás zonas de muestreo estudiadas. Los altos niveles de cromo en los suelos y sedimentos son con frecuencia asociados con procesos industriales que incluyen fundiciones e instalaciones para galvanizado, pero son las curtiembres una de las fuentes más importantes de este contaminante [25]. En Colombia sobresalen las curtiembres de los municipios de Villapinzón en el nacimiento del río Bogotá, y las curtiembres del barrio San Benito en Bogotá que depositan sus desechos en el río Tunjuelo, afluente del río Bogotá. Problemas con contaminación con cromo con altos índices de geoacumulación se han encontrado también en regiones de Brasil asociados al proceso de las curtiembres en el estado de Minas Gerais [25,26]. Respecto al plomo, sólo las zonas de muestreo más cercanas al río presentan algún grado de contaminación, lo cual sugiere que son las zonas que mayor geoacumulación tienen en estos metales pesados, siendo Sibaté nuevamente, donde se presentan la mayor contaminación (extremadamente contaminado en plomo), encontrando resultados mayores a los reportados como promedio mundial [24]. Los resultados reportados para plomo en el municipio de Sibaté supera lo encontrado en otros estudios en suelos de cultivo de hortalizas como tomate y repollo en Etiopía [2] y en la región del Caspio al sur de Rusia en cultivos de diferentes hortalizas [27], sin embargo, son menores a los reportados en la ciudad de Huixian, China [15] y en Daye, China [28] que mostraron niveles de contaminación más elevados.

Similar al plomo, los resultados para cadmio muestran que la zona de Sibaté presenta el mayor grado de contaminación comparado con las otras muestras, siendo clasificado como clase 5 (fuertemente contaminado a extremadamente contaminado), sin embargo, el contenido es 6 veces más alto al 1,1 mg de Cd/kg de suelo, reportado como promedio mundial [24], lo cual sugiere un alto efecto por causas antropogénicas. En el estudio, las muestras de la localidad de

Bosa y el municipio de Tenjo clasificaron a las muestras medidas, como suelos moderadamente contaminados. El municipio de Sibaté presentó contenidos de cadmio más elevados a los reportados en la región de Daye, China [28], Mojo, Etiopía [2] y Huixian, China [15].

El níquel presenta la situación particular de que el suelo que se usó como control resulta ser el segundo con mayor contenido, razón por la cual los demás suelos se clasifican como no contaminados, a excepción del suelo de Siberia el cual se clasificó en la categoría de No contaminado a moderadamente contaminado. Sin embargo, los contenidos de níquel encontrados son inferiores a otros reportes como el de suelo de cultivo de tomate (1.86 ± 0.05 mg de Ni/kg de suelo) y repollo (4.13 ± 0.20 mg de Ni/kg de suelo) en la región de Mojo en Etiopía [2], y mucho menor comparado con el valor reportado como promedio mundial en [24], lo cual sugiere que los suelos no muestran contaminación por níquel.

Los resultados obtenidos muestran una acumulación de los metales analizados en el suelo. Al respecto, se debe aclarar que la concentración total en el suelo no se relaciona necesariamente con la biodisponibilidad para la planta, ya que esta está influenciada por las características propias del suelo como el pH (el cual puede fijar los metales por precipitación si el pH es básico), la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el potencial redox, cantidad de materia orgánica que puede aumentar la formación de complejos que dificultan la disponibilidad a la planta [29], cantidad de arcillas que junto con altas CIC y cantidad de materia orgánica, poseen un alto número de sitios cargados eléctricamente que pueden retener iones [2], la interacción con microorganismos propios del suelo que también pueden interactuar con los metales pesados [30], entre otras propiedades. Algunos metales como, el Cd y el Zn son bastante móviles y las plantas los absorben fácilmente, y el proceso se favorece en suelos ácidos con bajos CIC [29,30] mientras que, el Cu y el Pb se adsorben fuertemente en las partículas del suelo, lo que reduce su disponibilidad para las plantas [29].

Además, las características propias de cada planta influyen en las cantidades de metales pesados que se pueden absorber. Algunas plantas están adaptadas genéticamente para crecer y reproducirse en suelos contaminados con metales pesados, y otras han desarrollado ecotipos tolerantes capaces de sobrevivir en ambientes tóxicos [30]. Eissa y Negim en 2018

[16], Yang y *et al.* (2018) [28] y Intawongse y Dean (2007) [29], demostraron que metales pesados como los estudiados en el presente estudio, se bioacumulan en hortalizas como la lechuga, espinaca y zanahoria, además se translocan entre los diferentes tejidos de la planta, sugiriendo un riesgo en el consumo de hortalizas cultivadas en áreas contaminadas con metales pesados, por lo que se sugiere realizar mediciones en plantas cultivadas en estos suelos, calcular el índice de bioacumulación, que muestra la transferibilidad de los metales pesados a las plantas [16,17] y el factor de translocación que muestra el movimiento de los metales pesados entre tejidos de la misma planta [16], así como las características fisicoquímicas del suelo, para comprobar la magnitud del riesgo.

Conclusiones

El estudio realizado encontró que las concentraciones de cromo particularmente, son elevadas de acuerdo al índice de geoacumulación, clasificando el suelo como extremadamente contaminado para la zona de muestreo de Sibaté. En el mismo municipio se encuentran contenidos más altos de plomo y cadmio comparado contra el promedio mundial. Claramente las zonas con mayor contaminación se pueden identificar en las cercanías del río. Los suelos analizados son utilizados como suelos de cultivo, razón por la cual es posible que haya contaminación por estos metales en alimentos de consumo frecuente como las hortalizas, particularmente la lechuga, cultivada principalmente en las zonas de estudio. Se recomienda realizar mediciones sobre plantas para tener una mayor visión del impacto.

Referencias bibliográficas

[1] Tasrina RC, Rowshon A, Mustafizur A, Rafiqul I, Ali MP. Heavy Metals Contamination in Vegetables and its Growing Soil. *Int J Environ Anal Chem.* 2015;2(3):1-6.

[2] Gebeyehu HR, Bayissa LD. Levels of heavy metals in soil and vegetables and associated health risks in Mojo area, Ethiopia. *PLoS One.* 2020;15(1):1-22.

[3] Tchounwou PB, Yedjou CG, Patlolla AK, Sutton DJ. Heavy Metals Toxicity and the Environment. *Experientia Supl.* 2014;101:133-64.

[4] Pereira Faria FB, Rozane DE, Romeiro S, Barth G, Josemara R, Queiroz B, et al. Cadmium

availability and accumulation by lettuce rice. *Rev Bras Ciência do Solo.* 2011;35:645-54.

[5] Gallego SM, Pena LB, Barcia RA, Azpilicueta CE, Iannone MF, Rosales EP, et al. Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: Insight into regulatory mechanisms. *Environ Exp Bot.* 2012;83:33-46.

[6] Zorrig W, El Khouni A, Ghnaya T, Davidian JC, Abdely C, & Berthomieu P. Lettuce (*Lactuca sativa*): a species with a high capacity for cadmium (Cd) accumulation and growth stimulation in the presence of low Cd concentrations. *J Horticult Sci Biotechnol.* 2013;88(6):783-789.

[7] Shahid M, Dumat C, Pourrut B, Sabir M, Pinelli E. Assessing the effect of metal speciation on lead toxicity to Vicia faba pigment contents. *J Geochemical Explor [Internet].* 2014;144:290-7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.01.003>

[8] Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). Resumen de salud pública Níquel CAS#: 7440-02-0 [Internet]. 2005. Available from: www.atsdr.cdc.gov/es

[9] Sun H, Brocato J, Costa M. Oral Chromium Exposure and Toxicity. *Curr Environ Heal Reports.* 2016;2(3):295-303.

[10] Miranda D, Carranza C, Rojas C, Jerez C, Fischer G, Zurita J. Acumulación de metales pesados en suelo y plantas de cuatro cultivos hortícolas, regados con agua del río Bogotá. *Rev Colomb Ciencias Hortícolas.* 2008;2(2):180-91.

[11] Silva J, Torres P, Madera C. Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura . Una revisión. *Agron Colomb.* 2008;26(2):347-59.

[12] Conpes. Conpes 3320 Estrategia para el manejo ambiental del río Bogotá. 2004.

[13] Combariza DA. Contaminación por metales pesados en el embalse del muña y su relación con los niveles en sangre de plomo, mercurio y cadmio y alteraciones de salud en los habitantes del municipio de Sibaté (Cundinamarca) 2007. Universidad Nacional de Colombia; 2009.

[14] (CAR). Acuerdo número 43 del 17 de octubre de 2006 Por el cual se establecen los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020. Bogotá: Corporación autónoma regional de cundinamarca; 2006. p. 1-16.

[15] Huang L, Rad S, Xu L, Gui L, Song X, Li Y, et al. Heavy Metals Distribution, Sources,

- and Ecological Risk Assessment in Huixian Wetland , South China. *Water*. 2020;12:1–14.
- [16] Eissa MA, Negim OE. Heavy metals uptake and translocation by lettuce and spinach grown on a metal-contaminated soil. *J Soil Sci Plant Nutr*. 2018;18(4):1097–107.
- [17] Ahmed M, Matsumoto M, Ozaki A, Thinh N Van. Heavy Metal Contamination of Irrigation Water, Soil, and Vegetables and the Difference between Dry and Wet Seasons Near a Multi-Industry Zone. *Water*. 2019;11:1–12.
- [18] ISO. ISO 18400-205:2018. Soil quality — Sampling — Part 205: Guidance on the procedure for investigation of natural, near-natural and cultivated sites. ISO, editor. International Organization for Standardization; 2018. 15 p.
- [19] ISO. ISO 11047:1998 Soil quality -- Determination of cadmium, chromium, cobalt, copper, lead, manganese, nickel and zinc -- Flame and electrothermal atomic absorption spectrometric methods. 1st ed. International standardization organization; 1998. 24 p.
- [20] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geo J*. 1969;2:108–18.
- [21] Eqani ASMAS, Kanwal A, Kumar A, Sohail M, Ullah R, Maria S, et al. Spatial distribution of dust e bound trace elements in Pakistan and their implications for human exposure *. *Environ Pollut*. 2016;213:213–22.
- [22] Charzyński P, Plak A, Hanaka A. Influence of the soil sealing on the geoaccumulation index of heavy metals and various pollution factors. *Environ Sci Pollut Res*. 2017;24:4801–11.
- [23] Hanif N, Ali S, Akber M, Eqani S, Maria S, Cincinelli A, et al. Geo-accumulation and enrichment of trace metals in sediments and their associated risks in the Chenab River , Pakistan. *J Geochemical Explor*. 2016;165:62–70.
- [24] Machado dos Santos N, Araújo do Nascimento CW, Aguiar Accioly AM de. Guideline Values and Metal Contamination in Soils of an Environmentally Guideline Values and Metal Contamination in Soils of an Environmentally Impacted Bay. *Water Air Soil Pollut*. 2017;(March):1–12.
- [25] Matamet FRM, Bonotto DM. Evaluation of the chromium contamination at Ribeirão dos Bagres , Franca (SP), Brazil , by the 210 Pb method. *Appl Radiat Isot*. 2013;82:359–69.
- [26] Jordao CP, Pereira JL, Jham GN. Chromium contamination in sediment , vegetation and fish caused by tanneries in the State of Minas Gerais , Brazil. *Sci Total Environ*. 1997;207:1–11.
- [27] Tumanyan AF, Shcherbakova NA, Tusaint F, Seliverstova AP, Tyutyuma N V. Heavy Metals contents in solid and vegetables of southern Russia. *Chem Technol Fuels Oils*. 2018;54(6):766–70.
- [28] Yang J, Ma S, Zhou J, Song Y, Li F. Heavy metal contamination in soils and vegetables and health risk assessment of inhabitants in Daye , China. *J Int Med Res*. 2018;46(8):3374–87.
- [29] Intawongse M, Dean JR. Uptake of heavy metals by vegetable plants grown on contaminated soil and their bioavailability in the human gastrointestinal tract. *Food Addit Contam*. 2007.
- [30] Xie Y, Fan J, Zhu W, Amombo E, Lou Y, Chen L, et al. Effect of Heavy Metals Pollution on Soil Microbial Diversity and Bermudagrass Genetic Variation. *Front Plant Sci*. 2016;7(May):1–12.