

# Fraccionamiento de metales pesados en un suelo contaminado del Valle de Mexicali

## Heavy metals fractionation in Mexicali Valley contaminated soil

Francisco Javier Gómez-Puentes<sup>1</sup>, Jaime Alonso Reyes-López<sup>2</sup>,  
María Guadalupe Amado-Moreno<sup>3</sup>




---

*Fecha de recepción: 29 de agosto de 2019*  
*Fecha de aprobación: 16 de diciembre de 2019*

Gómez-Puentes, F; Reyes-López, J; Amado-Moreno, M.  
Fraccionamiento de metales pesados en un suelo contaminado del Valle de Mexicali . *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-4. Octubre-Diciembre 2020. Pág 103-113.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i4.4586>



- 1 Profesor del Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica. TecNM Campus Mexicali. México. Correo electrónico: javiergomezp@itmexicali.edu.mx.  
 <https://orcid.org/0000-0002-8778-8173>
- 2 Investigador del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California. México. Correo electrónico: Jaime.reyes63@uabc.edu.mx.  
 <https://orcid.org/0000-0001-7962-9191>
- 3 Profesora del Departamento de Ciencias Básicas. TecNM Campus Mexicali. México. Correo electrónico: lupitaamado@yahoo.com.mx.  
 <https://orcid.org/0000-0001-6363-5888>

## Palabras clave

Partición química; metales pesados; zona vadosa; agua subterránea.

## Resumen

La contaminación provocada por metales pesados constituye uno de los grandes retos relacionados con la calidad del ambiente y la salud humana. La introducción de estos elementos en los sistemas naturales puede deberse a diversas actividades humanas entre ellas la agricultura y la disposición de residuos sólidos. En el Valle de Mexicali, la agricultura representa la actividad económica más importante, sin embargo, el uso de agroquímicos, así como la disposición clandestina de residuos sólidos urbanos (RSU) han generado problemas de contaminación severos afectando la fertilidad de suelos y la calidad de las aguas subterráneas. El propósito de esta investigación consistió en evaluar el contenido de metales pesados en diferentes fracciones de suelo a través de la zona vadosa (ZV) en un sitio ubicado en el Valle de Mexicali e influenciado por la agricultura y la disposición de residuos. Las muestras de suelo se sometieron al procedimiento de extracción secuencial y fueron analizadas mediante espectrometría de absorción atómica. Los resultados obtenidos revelan una marcada acumulación de metales desde la superficie hasta los primeros 50 cm de profundidad. Las variaciones estacionales del nivel freático, así como el riego agrícola favorecen el transporte de solutos observándose concentraciones de metales en el agua subterránea superiores a los estándares para agua potable. Los elementos Cd, Cr y Ni se distribuyen preferentemente en la fracción residual del suelo limitando así su movilidad. El Cu presentó una fuerte asociación con la materia orgánica en tanto que el Zn y Pb presentaron la mayor asociación con fracción intercambiable.

## Keywords

Chemical partitioning; heavy metals; vadose zone; groundwater.

## Abstract

Heavy metals contamination is one of the greatest challenges related to the environment quality and human health. The introduction of these elements into natural systems may be due to various types of human activities such as agriculture and solid wastes disposal. In Mexicali Valley, agriculture represents the most important economic activity, however, the use of agrochemicals as well as the clandestine disposition of urban solid wastes have generated severe pollution problems affecting soil fertility and groundwater quality. The purpose of this research was to evaluate the heavy metals content in the different fractions of soil through the vadose zone (ZV) in a site located in Mexicali Valley, B.C. influenced by agriculture and solid wastes disposal. Soil samples were subjected to the sequential extraction procedure and then analyzed by atomic absorption spectrometry. The results obtained reveal a marked accumulation of metals from the surface until 50 cm depth. Seasonal variations in the water table, as well as agricultural irrigation, favors the solutes transport with heavy metals concentrations in groundwater higher than the standards for drinking water. The elements Cd, Cr y Ni are preferably distributed in the residual fraction of soil, limiting their mobility. Cu presented a strong association with organic matter, while Zn and Pb presented the greatest association with the exchangeable fraction.

## Introducción

El municipio de Mexicali, en el estado de Baja California, México, se caracteriza por poseer un clima semiárido con temperaturas que alcanzan los 48 °C durante el verano y una precipitación media anual de escasos 77.8 mm [1]. Por las características geológicas de ambiente deltaico, la principal explotación de los suelos del Valle de Mexicali ha sido la agricultura, de modo que el riego de las tierras de cultivo se ha venido llevando a cabo mediante el aprovechamiento de las únicas fuentes de agua disponibles, las aguas del Río Colorado y las del acuífero de la región. Con estas aguas se abastecen, a través de una amplia red de canales, 207 935 hectáreas de tierras agrícolas del Distrito de Riego 014 [2]. El agua del Río Colorado, que representa la principal fuente de recarga para el acuífero del Valle de Mexicali, se caracteriza por poseer una concentración de sales que alcanza en promedio las 1000 ppm, lo que ha favorecido la salinización progresiva de los suelos agrícolas. La salinización del suelo del Valle de Mexicali se ha convertido en una preocupación primordial de los productores agrícolas en relación con la rentabilidad de los cultivos [3].

Por otro lado, la proliferación de sitios clandestinos de disposición final de residuos sólidos urbanos (RSU) en el Valle de Mexicali representa una seria amenaza al ambiente. Los impactos provocados por este tipo de sitios incluyen la contaminación de suelo, aire, vectores transmisores de enfermedades, vegetación, así como la afectación de cuerpos de agua superficial y subterránea [4]. Los lixiviados de vertederos municipales son efluentes complejos altamente concentrados que contienen materia orgánica disuelta, macrocomponentes inorgánicos, metales pesados y sustancias orgánicas xenobióticas [5]. La concentración total de metales pesados es un importante indicador de los riesgos de contaminación. Sin embargo, los metales asociados con las diferentes fracciones de un suelo tienen diferentes impactos sobre el medio ambiente por lo que el contenido total de metales pesados por sí mismo es insuficiente para evaluar su impacto ambiental en suelos contaminados. Varios métodos químicos y de fraccionamiento han sido desarrollados y aplicados para el análisis de metales en suelos y sedimentos [6]. El uso de los procedimientos de extracción secuencial (partición química) proporciona información significativa sobre la biodisponibilidad de metales tóxicos a los organismos vivos ya que estos métodos permiten determinar la forma en la que estos elementos se distribuyen en las diferentes fracciones del suelo [7].

El sitio de estudio colinda al norte con varias parcelas de cultivo de riego por inundación y durante cerca de 20 años operó como un sitio no controlado recibiendo diariamente 30 Ton de residuos sólidos procedentes de diferentes poblados de la localidad. Hoy en día, este basurero se encuentra en proceso de regularización siendo administrado por la autoridad municipal. Hasta el año 2011, se llevaba a cabo la separación y reciclaje solamente de metales ferrosos y aluminio mientras que el resto de los residuos era quemado a cielo abierto. La cercanía al Río Colorado contribuye a que el nivel freático sea muy próximo a la superficie fluctuando a lo largo del año entre los 4 y 1.5 m de profundidad. Con el propósito de determinar impacto ambiental provocado por metales pesados (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn), durante febrero y junio de 2017 se llevó a cabo el muestro y análisis químico de suelo y agua subterránea en este sitio.

## Metodología

Muestreo y tratamiento de agua. Durante el mes de junio de 2017, se tomaron 08 muestras de agua de las cuales 06 correspondieron a agua subterránea obtenidas de la red de pozos de monitoreo instalada y 02 muestras de agua superficial correspondientes a un canal de riego agrícola y al Río Colorado respectivamente (figura 1). El muestreo se realizó siguiendo las recomendaciones para estos tipos de aguas [8]. Para la toma de las muestras se emplearon recipientes de polietileno de 1 L de capacidad. La toma de muestras de agua subterránea se

realizó mediante un sistema de vacío tipo manual de acuerdo con la literatura consultada [9]. Por cada punto de muestreo se usaron dos recipientes uno para análisis de aniones y otro para cationes y metales pesados. Durante la colección del agua, la materia en suspensión fue removida mediante el uso de papel filtro de 0.45 micras. Finalmente, las muestras para análisis de cationes y metales fueron acidificadas hasta un pH menor a 2 mediante la adición de ácido nítrico concentrado.

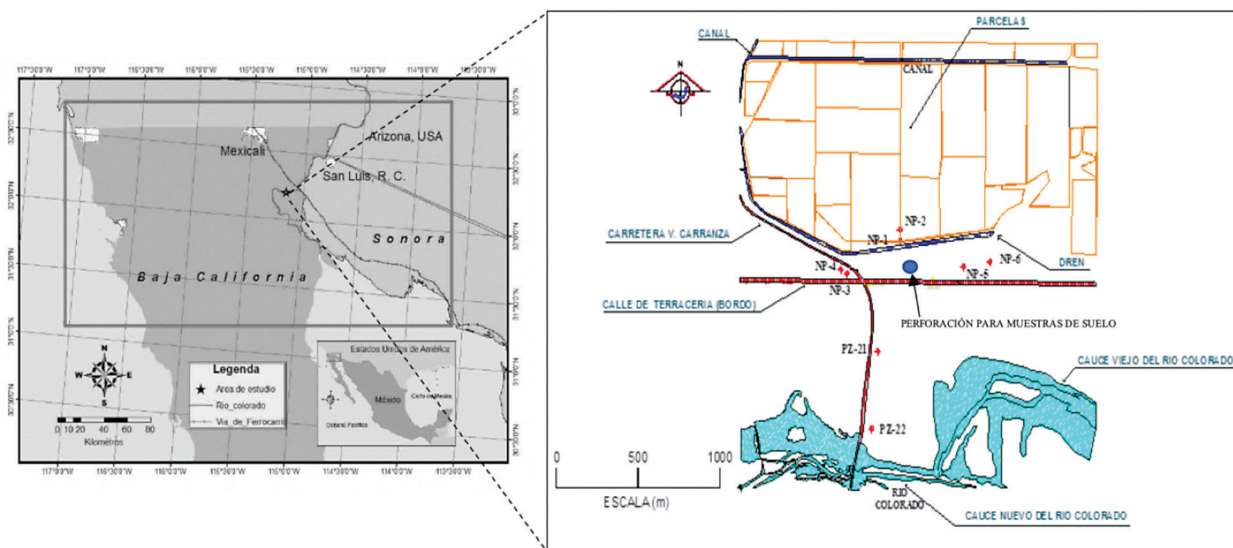


Figura 1. Área de estudio

Muestreo y tratamiento de suelo. En base a resultados de estudios previos en cuanto al contenido total de metales pesados en suelo, los cuales evidenciaron un contenido superior a suelos cultivados de acuerdo con la literatura, en febrero de 2017, se realizó una perforación en el área de descarga de residuos sólidos próxima a las parcelas de cultivo. Dicha zona fue caracterizada como la de mayor impacto. A partir de dicha perforación se obtuvieron muestras de suelo desde la superficie hasta alcanzar el nivel freático tomándose una muestra a intervalos de 50 cm. Dicho muestreo se realizó con base en las recomendaciones de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 [10]. El tratamiento de cada muestra de suelo se basó en lo establecido en el método AS-01 de la referida Norma e incluyó las etapas de secado, molienda, tamizado y homogeneizado.

Análisis de Agua. Parámetros fisicoquímicos en agua, tales como pH, temperatura, oxígeno disuelto, alcalinidad, sólidos disueltos (SD) y conductividad eléctrica fueron medidos en campo utilizando instrumentos portátiles previamente calibrados. El contenido de cationes y de metales pesados en agua se determinaron mediante espectrometría de absorción atómica empleando un espectrofotómetro marca GBC modelo Avanta.

Análisis de suelo. Se estimó el contenido de materia orgánica mediante el método de Walkley & Black basado en la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una solución de dicromato de potasio y ácido sulfúrico concentrado, con la posterior dilución de la mezcla y su valorización volumétrica con sulfato ferroso. El pH del suelo se determinó electroquímicamente en la solución sobrenadante de una mezcla de relación suelo/agua de 1:2. La conductividad eléctrica se determinó en el extracto de saturación mediante un instrumento marca HANNA

modelo HI99301. Se empleó el método denominado titulación rápida de Piper para determinar el contenido de carbonatos de calcio. La textura del suelo se determinó por el método del hidrómetro de Bouyoucos y se cuantificó el contenido de cationes y aniones en el extracto de saturación del suelo.

Extracción secuencial (partición química) de metales pesados en suelo. A una cantidad adecuada (1 g) de cada muestra homogeneizada se le agregaron diversos reactivos químicos ajustándose el pH y sometiéndose a una serie de extracciones sucesivas de acuerdo con la literatura [7]. De esta extracción secuencial se obtuvieron 05 diferentes extractos para cada una de las muestras.

Análisis químico de metales pesados. A cada extracto obtenido se le analizó el contenido de metales pesados (Cu, Cd, Cr, Ni, Pb, Zn) mediante la técnica de espectrometría de absorción atómica con un espectrofotómetro marca GBC modelo Avanta.

## Resultados y discusión

Parámetros fisicoquímicos. En el cuadro 1 se presentan los resultados de los análisis de los parámetros fisicoquímicos de agua y suelo. En el caso del agua, los valores de pH en general son neutros, lo que termodinámicamente desfavorece la solubilidad de metales y cationes [11]. El oxígeno disuelto de las aguas superficiales está muy por encima del correspondiente a la muestra de agua subterránea debido su interacción con la atmosfera favoreciendo la disolución del gas. Los valores de conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales de las aguas superficiales y subterránea presentan un gran contraste en sus valores. En la zona de descarga de los residuos, el contenido de SD en las aguas superficiales alcanza en promedio las 900 partes por millón (ppm), a medida que estas aguas se infiltran a través del subsuelo se enriquecen en solutos hasta un valor 20 veces mayor respecto al agua subterránea. Por su parte, las propiedades fisicoquímicas del suelo, medidas a partir del extracto de saturación, indican una acumulación considerable de solutos desde la superficie hasta los primeros 50 cm de profundidad. A profundidades mayores, se observa una disminución sensible del contenido de SD a excepción de los 150 cm de profundidad donde se aprecia un incremento de sólidos, pero lejos de alcanzar los niveles observados en los primeros 50 cm (Cuadro 1). Los valores de pH evidencian un suelo con características neutras a ligeramente alcalinas lo que favorece la retención de metales y cationes. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) en este perfil de suelo presenta los valores mas altos que se encuentran típicamente a los correspondientes a materiales arcillosos del tipo de la clorita y la mica. La textura del suelo en general corresponde a los tipos arcilloso y franco-arcilloso. En cuanto al contenido de materia orgánica, el suelo puede clasificarse como pobre, por lo que, el mayor contenido de materia orgánica en los primeros niveles de profundidad puede atribuirse tanto a la vegetación, así como a los residuos de tipo orgánico que se disponen en esta área. La mayor acumulación de solutos en el extracto de saturación ocurre en los extractos de suelo con los valores más altos de CIC, materia orgánica y arcilla. Es importante señalar que durante la toma de muestras se observó en un horizonte cercano a los 50 cm de profundidad en el que la apariencia del suelo básicamente consistió en una mezcla de suelo, cenizas y restos de residuos.

Análisis químico de agua. En el cuadro 2 se presentan los resultados obtenidos para el contenido de iones mayoritarios y elementos traza en agua superficial y subterránea, así como los resultados de cationes y aniones solubles en el extracto de saturación de suelo. En el caso de los iones mayoritarios, es evidente que el agua subterránea en el sitio de estudio ha recibido el impacto provocado por las actividades agrícolas y de disposición de residuos, los contenidos elevados de especies como Na, K, Cl,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{HCO}_3$ , así como varios metales pesados lo confirman. El alto contenido de iones cloruros puede explicarse como consecuencia del impacto del

basurero en tanto que la actividad agrícola constituye un aporte significativo de iones sulfatos al agua subterránea dado su mayor contenido durante la temporada de riego [12]. En el caso de las aguas superficiales, aunque poseen un contenido apreciable de iones mayoritarios, en general se encuentran dentro de los rangos propios de las aguas de tipo continental. Asimismo, las concentraciones de los elementos traza estuvieron dentro de los valores reportados por otros autores [5].

**Cuadro 1.** Parámetros fisicoquímicos medidos en agua y suelo – junio de 2017

Agua											
ID	Tipo	Temperatura (°C)	pH	OD (mg/L)	CE (mS/cm)	STD (ppm)					
RC	Superficial	27.1	7.2	7.8	1.75	878					
Canal	Superficial	26.8	7.4	8.1	1.82	913					
AS	Subterránea	25.4	6.9	3.2	37.7	18900					
Suelo											
ID	Profundidad (cm)	pH	CE (mS/cm)	STD (ppm)	CIC	% CaCO <sub>3</sub>	% MO	% arcilla	% limo	% arena	
Bas 1	0	7.7	41.2	20900	55.8	12.1	3.5	44.2	29.3	26.5	
Bas 2	50	7.9	23.1	11280	52.1	10.1	3.2	42.9	27.5	29.6	
Bas 3	100	7.4	4.45	2230	43.1	8.7	2.2	29.2	28.1	42.7	
Bas 4	150	8.4	5.34	2680	49.7	12.4	2.9	39.5	28.4	32.1	
Bas 5	200	8.1	3.84	1925	44.5	8.8	1.8	32.4	24.1	43.5	
Bas 6	250	7.5	2.48	1252	33.1	7.6	1.6	27.5	24.8	47.7	
Bas 7	300	7.6	1.18	594	35.6	8.1	1.4	25.4	28.3	46.3	
RC – Agua del Río Colorado Canal – Agua de canal usada para riego agrícola AS – Agua subterránea en la zona de la perforación			OD = oxígeno disuelto CE = Conductividad eléctrica STD = Sólidos totales disueltos				CIC = capacidad de intercambio catiónico (meq/100g) MO = Materia orgánica				

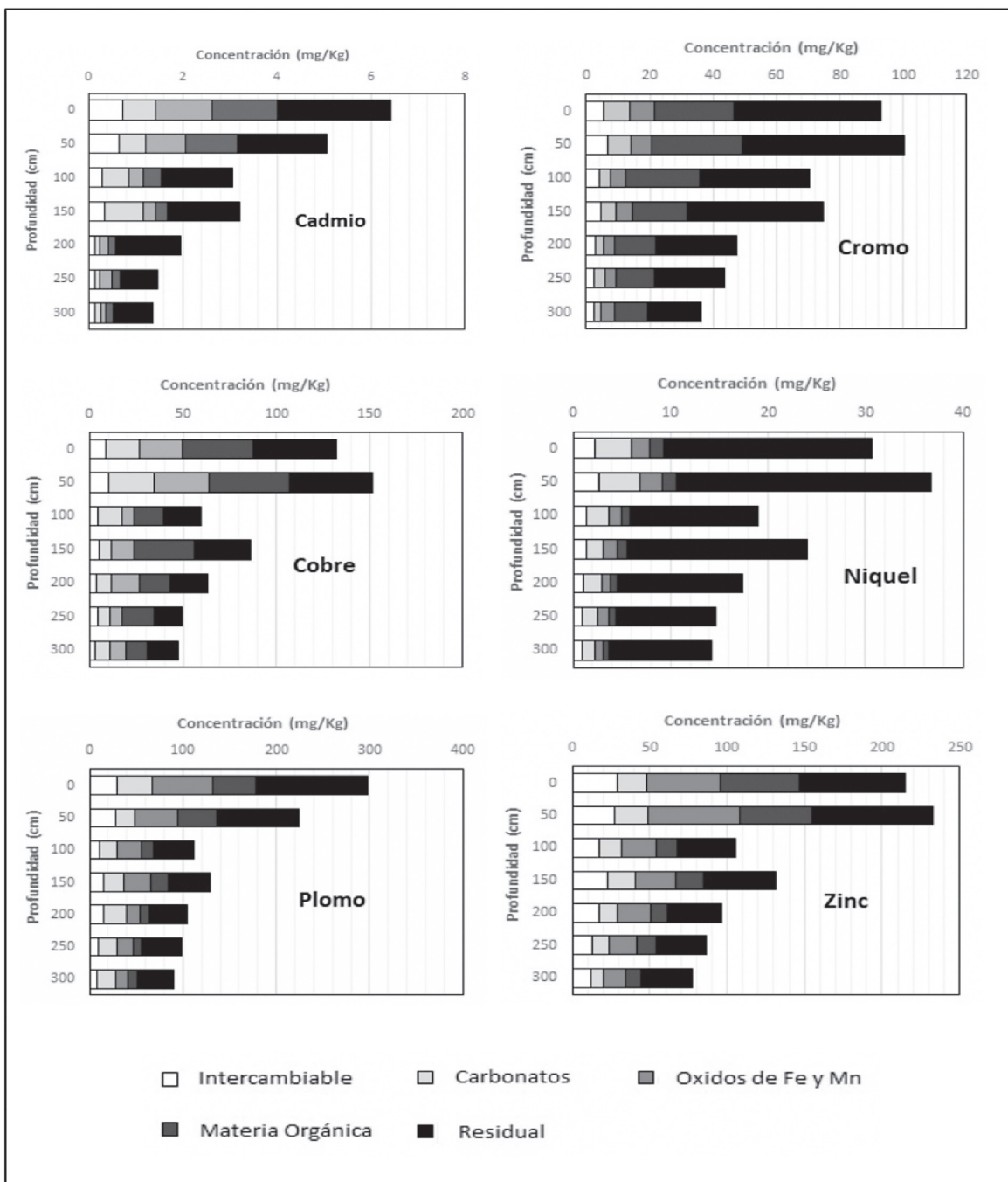
Partición química de metales pesados en suelo. La especiación química de metales llevada a cabo mediante la extracción secuencial es esencial para estimar su movilidad. El orden de movilidad de los metales considerando su abundancia en las fracciones es: intercambiable > unido a carbonato > unido a óxidos > unido a compuestos orgánicos > residual [13]. Tomando como referencia lo anterior, y de acuerdo con los resultados obtenidos (figura 2) puede afirmarse que el contenido de metales pesados tiende a predominar en las fracciones residual y materia orgánica lo que favorece su retención en el suelo limitando con ello su movilidad. Los óxidos que contienen metales traza se pueden movilizar en condiciones reductoras y ácidas. La fase orgánica es de naturaleza relativamente estable, pero puede mobilizarse en condiciones de oxidación fuerte debido a la degradación de la materia orgánica [14]. La quema a cielo abierto de los residuos sólidos, en el sitio, contribuye a la acumulación de metales en estas dos fracciones. En la figura 2, se aprecia que el mayor contenido de metales pesados se encuentra

en las primeras capas del suelo y en concentraciones que superan los rangos típicos en suelos sin cultivar. Cadmio. Su contenido fluctuó entre 1.4 y 6.4 mg/kg, encontrándose los niveles más altos entre los primeros 50 cm de profundidad. A nivel mundial, el rango de Cd en suelos suele estar entre 0.01 y 1 mg/kg con valor promedio de 0.36 mg/kg [15], las muestras de suelo analizadas sobrepasaron estos niveles hasta los 150 cm de profundidad. En el área de estudio, la biodisponibilidad este elemento se ve limitada por el pH elevado del suelo (cuadro I) y el contenido relativamente alto de Ca promoviendo la retención de Cd preferentemente en forma de silicatos [16]. Por otro lado, el contenido elevado de Cl (cuadro I) en los primeros 50 cm de profundidad, favorece la movilidad debido a que el Cd tiende a formar complejos con Cl que tienden a acumularse en la fracción intercambiable facilitando el transporte de Cd hacia la fase acuosa [17]. A mayor profundidad, el menor contenido de cloruros provoca la acumulación de Cd en la fracción residual disminuyendo su movilidad.

**Cuadro 2.** Resultados de los análisis químicos de agua y extracto de saturación en suelo

Agua											
ID Tipo de agua		Iones mayoritarios									
		Na	K	Ca	Mg	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>			
RC	Superficial	161	3.9	104	37	163	280	195			
Canal	Superficial	175	3.4	125	42	182	297	188			
AS	Subterránea	6170	85	142	65	8962	4621	980			
ID	Tipo	Elementos traza									
		Al	Fe	Mn	Si	Zn	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb
RC	Superficial	0.01	0.03	0.01	0.05	0.47	0.01	15	130	0.02	0.03
Canal	Superficial	0.01	0.05	0.01	0.07	0.52	0.01	18	152	0.04	0.04
AS	Subterránea	0.74	1.1	0.42	1.8	2.3	1.2	103	208	235	237
Suelo (extracto de saturación)											
ID	Profundidad (cm)	Na	K	Ca	Mg	Cl	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>			
Bas 1	0	8450	397	2853	478	11456	2305	2025			
Bas 2	50	1153	285	2215	381	2127	421	1379			
Bas 3	100	542	210	1256	228	1620	391	684			
Bas 4	150	330	178	873	180	904	361	509			
Bas 5	200	310	175	756	115	542	421	514			
Bas 6	250	254	155	680	95	430	330	401			
Bas 7	300	285	169	821	65	443	301	364			
Concentraciones en mg/L (agua) y mg/kg (suelo)											
Elementos Cd, Cr, Cu, Ni, Pb concentraciones en ug/L											

Cromo. Hasta 150 cm de profundidad, este elemento se encontró en niveles superiores al rango promedio medido para suelos cultivados (15-70 mg/kg) [18]. El mayor contenido de Cr (47-57%) en las muestras de suelo se encontró en la fracción residual. Lo anterior es consistente con lo reportado en diversos estudios y puede atribuirse a la baja tendencia del Cr a formar los oxianiones cromato y dicromato [19]. La siguiente fracción en importancia fue la materia orgánica (23-33% del Cr total en suelo). Bajo las circunstancias anteriores, el cromo no representa un riesgo significativo para la biota y la vegetación en el área de estudio por su baja biodisponibilidad [20].



**Figura 2.** Partición química de metales pesados a través de la zona vadosa



*Cobre.* Su contenido promedio en suelos cultivados oscila entre 10 y 40 mg/kg [18]. El cobre junto con el zinc son micronutrientes, sin embargo, a medida que se vuelven abundantes sus efectos adversos son evidentes. El Cu no se bioacumula a través de la cadena alimenticia lo cual minimiza sus efectos tóxicos. Su origen en suelos cultivados en parte es promovido por el uso extensivo de fertilizantes, bactericidas y fungicidas. En el sitio de estudio se encontró que este metal supera el rango promedio para suelos cultivados a lo largo de la ZV, concentrándose en las fracciones residual y materia orgánica, aunque también se distribuye de manera significativa en las fracciones carbonatos y óxidos de Fe y Mn. El cobre tiende a formar complejos con materiales arcillosos, hidróxidos metálicos y materia orgánica [14]. En suelos de naturaleza calcárea es ampliamente reconocida su asociación y retención debido a su tendencia a acumularse en las fracciones residual y de óxidos [21].

*Níquel.* El rango de concentración de este metal para suelos cultivados se encuentra entre 2 y 18 mg/kg [18]. Los procesos de adsorción/desorción de Níquel son importantes en suelos no contaminados de pH bajo mientras que los procesos de precipitación/disolución son favorecidos en suelos con pH elevado y con cantidades apreciables del metal. El Níquel suele ser fuertemente absorbido en las formas  $Ni^{+2}$  y  $NiOH^+$ . La mayor parte del Níquel que es desechado al ambiente termina siendo adsorbido por la materia orgánica y diversos materiales arcillosos contenidos en el suelo favoreciendo su inmovilización [22]. En la zona de estudio, la distribución de Níquel a través de la ZV se concentró principalmente en la fracción residual (~70%), seguida de la fracción de carbonatos (~11%) mientras que en el resto de las fracciones el contenido osciló entre 4 y 7%.

*Plomo.* Los efectos nocivos de plomo en los cultivos incluyen reducción de la actividad fotosintética, inhibición del crecimiento, reducción de la absorción de agua y transpiración. En suelos cultivados, este metal se encuentra en un rango que oscila entre 3 y 27 mg/kg [18]. En el sitio de estudio, se encontró en cantidades muy superiores al rango señalado sobre todo en los primeros 50 cm de profundidad superando los 200 mg/kg, siendo la fracción dominante la residual seguida de la materia orgánica. Por lo anterior, la ocurrencia de este metal es atribuible a la disposición de los residuos sólidos ya que suele estar presente en materiales cerámicos, plásticos, aleaciones, pigmentos y vidrio. En el suelo, el Pb es relativamente inmóvil debido a la tendencia a ser transformado en compuestos de baja solubilidad como sulfatos y fosfatos además de que forma complejos con materia orgánica y arcillas. Finalmente, se ha investigado la adsorción de este metal por calcita encontrando una elevada velocidad de adsorción en la superficie del mineral a pocos segundos de su contacto, sin embargo, este proceso no es irreversible por lo que la liberación del plomo por desorción es posible [23].

*Zinc.* Se encuentra en suelos cultivados en un rango promedio de concentración entre 37 y 68 mg/kg [18]. Su movilidad suele estar muy relacionada con el pH de los suelos, en general, el potencial de disolución disminuye drásticamente a valores de pH de 6 o superiores. La disminución de la solubilidad del zinc por el incremento del pH se debe a una mayor capacidad de adsorción de las superficies sólidas del suelo que incrementan sus cargas negativas atrayendo  $Zn^{+2}$  provocando a su vez la quimisorción en calcita y la coprecipitación en óxidos de Fe [24]. Por otro lado, el zinc tiende a formar complejos con la materia orgánica con relativa rapidez frenando la actividad del ion  $Zn^{+2}$  [25]. Los resultados de la partición química de este metal revelan que tiende a distribuirse preferentemente en las fracciones residual, materia orgánica y óxidos de Fe y Mn. El contenido de zinc superó el reportado en la literatura para suelos cultivados alcanzando concentraciones entre 100 y 230 mg/kg, esto hasta una profundidad de 200 cm.

## Conclusiones

El presente estudio demuestra la capacidad de impacto que poseen conjuntamente la actividad agrícola y la disposición de residuos sólidos tanto en suelo como en agua subterránea en sitios con escasa precipitación pluvial y nivel freático somero. Aunque las propiedades fisicoquímicas del suelo favorecen la retención de contaminantes, el riego agrícola y la variación del nivel freático a lo largo del año han contribuido a la contaminación del agua subterránea sobre todo en las épocas del riego en las que el nivel del agua se eleva hacia las capas menos profundas ocasionando el lavado y arrastre de solutos, entre ellos metales pesados, a pesar de la tendencia de estos a complejarse con las fracciones menos móviles del suelo. En general, el contenido de metales pesados (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn) se encontró en niveles que superan los rangos promedios encontrados en suelos cultivados preferentemente en los primeros 50 cm de profundidad.

## Referencias

- [1] I. N. de E. y G. INEGI, "Anuario estadístico y geográfico de Baja California 2017.", 2017. [En línea]. Disponible en: [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/anuarios\\_2017/702825094874.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825094874.pdf).
- [2] J. Ramirez-Hernández, *Una visión de la problemática ambiental de Mexicali y su valle: elementos para su gestión*. UABC, 2006.
- [3] G. Judkins y S. Myint, "Spatial Variation of Soil Salinity in the Mexicali Valley, Mexico: Application of a Practical Method for Agricultural Monitoring", *Environ. Manage.*, vol. 50, núm. 3, pp. 478–489, sep. 2012.
- [4] K. Adhikari y S. Pal, "Assessment of Pollution Potential of Soil and Groundwater in a Non-Engineered MSW Landfill Site", *Int. J. Environ. Sci. Dev.*, vol. 7, pp. 207–210, ene. 2016.
- [5] T. Christensen *et al.*, "Biogeochemistry of Landfill Leachate Plumes", *Appl. Geochem.*, vol. 16, pp. 659–718, jun. 2001.
- [6] A. Sungur, M. Soylak, E. Yilmaz, S. Yilmaz, y H. Ozcan, "Characterization of Heavy Metal Fractions in Agricultural Soils by Sequential Extraction Procedure: The Relationship Between Soil Properties and Heavy Metal Fractions", *Soil Sediment Contam. Int. J.*, vol. 24, núm. 1, pp. 1–15, ene. 2015.
- [7] A. Tessier, P. G. C. Campbell, y M. Bisson, "Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals", *Anal. Chem.*, vol. 51, núm. 7, pp. 844–851, jun. 1979.
- [8] C. A. J. Appelo y D. Postma, *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, 2a Ed. the Netherlands: A. A. Balkema Publishers, 2005.
- [9] C. W. Fetter, T. Boving, y D. Kremer, *Contaminant Hydrogeology: Third Edition*, 3a Ed. USA: Waveland Press, 2017.
- [10] S. I. de N. y E. de la C. SINEC, "NOM-021-SEMARNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis.", *SINEC*, s.f. [En línea]. Disponible en: <http://www.sinec.gob.mx:80/SINEC/Vista/Normalizacion/DetalleNorma.xhtml?pidn=N2lrSU9jS05YUm5oc2Y3L2FLd mxSZz09>. [Consultado: 29-jul-2019].
- [11] E. Remoundaki *et al.*, "Groundwater Deterioration: The Simultaneous Effects of Intense Agricultural Activity and Heavy Metals in Soil", *Procedia Eng.*, vol. 162, pp. 545–552, ene. 2016.
- [12] S. K. Maiti, S. De, T. Hazra, A. Debsarkar, y A. Dutta, "Characterization of Leachate and Its Impact on Surface and Groundwater Quality of a Closed Dumpsite – A Case Study at Dhapa, Kolkata, India", *Procedia Environ. Sci.*, vol. 35, pp. 391–399, ene. 2016.
- [13] M. Alan y D. Kara, "Comparison of a new sequential extraction method and the BCR sequential extraction method for mobility assessment of elements around boron mines in Turkey", *Talanta*, vol. 194, pp. 189–198, mar. 2019.
- [14] J. Huang, R. Huang, y J. J. Jiao, "Speciation and mobility of heavy metals in mud in coastal reclamation areas in Shenzhen, China", *Environ. Geol.*, vol. 53, pp. 221–228, 2007.
- [15] A. Kubier, R. T. Wilkin, y T. Pichler, "Cadmium in soils and groundwater: A review", *Appl. Geochem.*, vol. 108, p. 104388, sep. 2019.

- [16] X. Zhao y M. Saigusa, "Fractionation and solubility of cadmium in paddy soils amended with porous hydrated calcium silicate", *J. Environ. Sci.*, vol. 19, núm. 3, pp. 343–347, mar. 2007.
- [17] H. Li, Z. Li, M. A. Khaliq, T. Xie, Y. Chen, y G. Wang, "Chlorine weaken the immobilization of Cd in soil-rice systems by biochar", *Chemosphere*, vol. 235, pp. 1172–1179, nov. 2019.
- [18] F. R. Siegel, *Environmental Geochemistry of Potentially Toxic Metals*. Springer Science & Business Media, 2002.
- [19] C. M. A. Iwegbue, F. N. Emuh, N. O. Isirimah, y A. C. Egun, "Fractionation, characterization and speciation of heavy metals in composts and compost-amended soils", *Afr. J. Biotechnol.*, vol. 6, núm. 2, ene. 2007.
- [20] S. Raptis, D. Gasparatos, M. Economou-Eliopoulos, y A. Petridis, "Chromium uptake by lettuce as affected by the application of organic matter and Cr(VI)-irrigation water: Implications to the land use and water management", *Chemosphere*, vol. 210, pp. 597–606, nov. 2018.
- [21] E. Kelepertzis, F. Botsou, C. Patinha, A. Argyraki, y I. Massas, "Agricultural geochemistry in viticulture: An example of Cu accumulation and geochemical fractionation in Mediterranean calcareous soils (Nemea region, Greece)", *Appl. Geochem.*, vol. 88, pp. 23–39, ene. 2018.
- [22] W. Sun, X. Zhang, X. Sun, Y. Sun, y Y. Cen, "Predicting nickel concentration in soil using reflectance spectroscopy associated with organic matter and clay minerals", *Geoderma*, vol. 327, pp. 25–35, oct. 2018.
- [23] A. A. Rouff, R. J. Reeder, y N. S. Fisher, "Pb (II) Sorption with Calcite: A Radiotracer Study", *Aquat. Geochem.*, vol. 8, núm. 4, pp. 203–228, dic. 2002.
- [24] B. J. Alloway, "Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans", *Environ. Geochem. Health*, vol. 31, núm. 5, pp. 537–548, oct. 2009.
- [25] M. C. Hernandez-Soriano y J. C. Jimenez-Lopez, "Effects of soil water content and organic matter addition on the speciation and bioavailability of heavy metals", *Sci. Total Environ.*, vol. 423, pp. 55–61, abr. 2012.