

Evaluación de la contaminación por elementos traza en suelos agrícolas del suroeste de Guanajuato, México

Evaluation of trace elements contamination in agricultural soils in southwest of Guanajuato, Mexico

María Elena López-Pérez*, María Cristina Del Rincón-Castro*, Carolina Muñoz-Torres**, Graciela M. L. Ruiz-Aguilar*, Sara Solís-Valdez**, Gabriela A. Zanor*[‡]

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar la contaminación de 18 muestras de suelos de uso agrícola del suroeste del estado de Guanajuato mediante el análisis de las concentraciones totales de elementos traza (arsénico [As], cadmio [Cd], cromo [Cr], cobre [Cu], plomo [Pb] y zinc [Zn]) por Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente y el Índice de Geoacumulación (I_{geo}). Los rangos de concentración de As ($< 0.009 \text{ mg kg}^{-1}$ - 14.97 mg kg^{-1}), Cd (0.06 mg kg^{-1} - 0.76 mg kg^{-1}), Cr (11.31 mg kg^{-1} - 33.85 mg kg^{-1}), Cu ($< 0.004 \text{ mg kg}^{-1}$ - 99.98 mg kg^{-1}), Pb (4.87 mg kg^{-1} - 41.79 mg kg^{-1}) y Zn (21.98 mg kg^{-1} - $109.44 \text{ mg kg}^{-1}$) se encontraron por debajo de la concentración de referencia total de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. En cuanto al I_{geo} , el As, Cu, Pb y Zn presentaron concentraciones entre las categorías no contaminado a moderadamente contaminado (Clase 0, 1 y 2) mientras que los suelos resultaron no contaminados con Cr (Clase 0). Por su parte, el Cd presentó el I_{geo} más alto (Clase 3: moderado a fuertemente contaminado).

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the contamination index of 18 agricultural soil samples in the southwest of Guanajuato by carrying out an analysis of the total trace element concentrations (arsenic [As], cadmium [Cd], chromium [Cr], copper [Cu], lead [Pb] and zinc [Zn]) with the use of Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry and the geoaccumulation index (I_{geo}). The trace element concentration ranges of As ($< 0.009 \text{ mg kg}^{-1}$ - 14.97 mg kg^{-1}), Cd (0.06 mg kg^{-1} - 0.76 mg kg^{-1}), Cr (11.31 mg kg^{-1} - 33.85 mg kg^{-1}), Cu ($< 0.004 \text{ mg kg}^{-1}$ - 99.98 mg kg^{-1}), Pb (4.87 mg kg^{-1} - 41.79 mg kg^{-1}) and Zn (21.98 mg kg^{-1} - $109.44 \text{ mg kg}^{-1}$) were below the total reference concentration compared to the Mexican Official Norm NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (DOF, 2007). In regard to the I_{geo} , As, Cu, Pb and Zn presented concentrations ranging from uncontaminated to moderately contaminated categories (Class 0, 1 and 2) while the soils were uncontaminated by Cr (Class 0). On the other hand, the Cd showed the highest I_{geo} (Class 3: moderately to heavily contaminated).

Recibido: 24 de mayo del 2016

Aceptado: 15 de septiembre del 2017

Palabras Clave:

Suelos agrícolas; metales; Índice de Geoacumulación; propiedades físicas; propiedades químicas.

Keywords:

Agricultural soils; metals; geoaccumulation index; physical properties; chemical properties.

Cómo citar:

López-Pérez, M. E., Del Rincón-Castro, M. C., Muñoz-Torres, C., Ruiz-Aguilar, G. M. L., Solís-Valdez, S., & Zanor, G. A. (2017). Evaluación de la contaminación por elementos traza en suelos agrícolas del suroeste de Guanajuato, México. *Acta Universitaria*, 27(6), 10-21. doi: 10.15174/au.2017.1386

INTRODUCCIÓN

El suelo es un sistema altamente dinámico, producto de la alteración física y química de un material rocoso a lo largo del tiempo, bajo condiciones climáticas y topográficas determinadas y sometido a la actividad de organismos vivos que actúan en la transformación de sustancias y atenuación de los contaminantes (Lindbo, Kozłowski & Robinson, 2012; Porta, López-Acevedo & Poch, 2010).

* División de Ciencias de la Vida. Universidad de Guanajuato. Ex Hacienda El Copal Km. 9 11 Carretera Irapuato-Silao; A.P. 311; C.P. 36500 Irapuato, Guanajuato, México. Correo electrónico: gzanor@ugto.mx

** Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

‡ Autor de correspondencia.

El suelo hace posible la vida y la seguridad alimentaria a nivel mundial debido a que el 95% de nuestros alimentos está directa o indirectamente producido en los suelos (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO, por sus siglas en inglés], 2015). En las últimas décadas, el aumento de la población y consecuentemente el desarrollo urbano, industrial y agrícola han ocasionado que el suelo se convierta en un recurso natural en estado crítico. La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat, 2012) reportó que la degradación química (disminución de la fertilidad, polución, salinización/alcalinización y eutrofización) asociada a las actividades agrícolas fue el proceso de degradación del suelo más extendido en México en el año 2002, con alrededor de 34.04 millones de hectáreas afectadas (17.8% del territorio nacional). En el estado de Guanajuato se registró un 28.9% de suelo afectado por degradación química, mientras que un 2.5% del territorio del estado mostró algún tipo de degradación física (disminución de la capacidad para absorber y almacenar agua), conllevando a la pérdida de la función productiva de los terrenos.

Según Álvarez (2010), dentro de los nutrientes del suelo, los elementos traza (ET) juegan un papel primordial en el desarrollo de su biomasa, ya que en la solución acuosa del suelo proporcionan abastecimiento y absorción de compuestos químicos necesarios para el crecimiento y metabolismo de las plantas o cultivos. Los ET se pueden encontrar como especies solubles, disponibles, débil o fuertemente unidas a las partículas sólidas o precipitadas y su acumulación en el suelo es la suma de los elementos procedentes del material parental (fuente litológica) y los aportados por la actividad humana (Alloway, 2012). La disponibilidad de los ET en el suelo está regida por los parámetros edafológicos (pH, condiciones *redox*, capacidad de cambio), por su tendencia a reaccionar con las fases activas del suelo (arcilla y materia orgánica) y las reacciones fisicoquímicas que se producen entre la fase sólida y la solución del suelo (Kabata-Pendias, 2000).

Guanajuato es una de las entidades agrícolas más importantes de México, cuenta con 1.2 millones de hectáreas dedicadas a la agricultura de las cuales poco más de 430 000 (36%) se cultivan bajo condiciones de riego y son muy dinámicas en cuanto a los cultivos establecidos –sorgo, maíz, trigo, cebada, avena, frijol, alfalfa y espárrago– (Paredes, Mandujano, Gámez & García, 2011). Los suelos de uso agrícola de Guanajuato pueden estar afectados por la acumulación de ET a través de la aplicación de fertilizantes, plaguicidas, derivados de petroquímicos como la gasolina

y pinturas, deposiciones atmosféricas procedentes de zonas industriales y urbanas, los vertidos de aguas residuales, riego procedente de aguas subterráneas, desechos de las minas, entre otros, ocasionando un riesgo significativo para el sistema edáfico y las cadenas tróficas involucradas (Alloway, 2012). Los ET como los metales pesados y metaloides constituyen un grupo de elementos químicos inorgánicos peligrosos siendo los dominantes en suelos contaminados, el plomo (Pb), cromo (Cr), arsénico (As), zinc (Zn), cadmio (Cd), cobre (Cu), mercurio (Hg) y níquel (Ni) (Wuana & Okieimen, 2011). Muchos metales como el Zn y el Cu, son esenciales para el crecimiento normal de las plantas y organismos vivos; sin embargo, en altas concentraciones llegan a ser tóxicos. El Pb o el Cr pueden también ser tolerables por el ecosistema en bajas concentraciones, pero muy perjudiciales en altas (Machender, Dhakate, Prasanna & Govil, 2011).

En la presente investigación se tiene como objetivo evaluar la contaminación de muestras superficiales de suelos agrícolas (0 cm - 20 cm) de la región suroeste de Guanajuato mediante la cuantificación de la concentración total de ET (As, Cd, Cr, Cu, Pb y Zn) y el Índice de Geoacumulación (I_{geo}) propuesto por Müller (1969), para discriminar entre fuentes de aporte naturales o antrópicas. Asimismo, las muestras de suelo se analizaron mediante propiedades físicas y químicas (humedad, clase textural, densidad aparente y real, porosidad, pH, materia orgánica, nitrógeno total), lo cual permitió efectuar una correlación integrada entre los contenidos de ET y los parámetros edáficos. Este estudio aportará información sobre el estado de contaminación actual de los suelos de un sector de uso agrícola del Bajío guanajuatense y el riesgo potencial de acumulación y enriquecimiento de elementos tóxicos en los suelos de esta zona de importancia económica para el estado de Guanajuato.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La zona de estudio se ubicó en los municipios de Irapuato, Silao, Abasolo, Cuerámaro y Salamanca, que corresponden a la parte suroeste del estado de Guanajuato, México (figura 1). El estado de Guanajuato cuenta con una extensión territorial de 30 608 km² que representa 1.6% del territorio nacional mexicano. De acuerdo a la información del Consejo de Recursos Minerales (1992), el área bajo estudio pertenece a la provincia fisiográfica conocida como Eje Neovolcánico, situada en la parte sur del estado de Guanajuato.

El contenido de humedad (H) de los suelos se determinó mediante el método gravimétrico, calculando la diferencia de peso entre la muestra de suelo húmeda y después de haberse secado en una estufa marca Binder a 105 °C durante 24 h.

La clase textural de los suelos se calculó por el método de Bouyoucos (1962), removiendo previamente la materia orgánica de los suelos con peróxido de hidrógeno al 30%. Luego, tres agentes dispersantes se agregaron, oxalato de sodio, metasilicato de sodio y hexametafosfato de sodio, para individualizar las partículas de arcilla y posteriormente se realizaron lecturas de la temperatura y del hidrómetro a 40 s y 2 h. La determinación de la clase textural se realizó con base en el triángulo de texturas del *United States Department of Agriculture* (USDA).

La densidad aparente (DA) se calculó por el método de la probeta a partir del conocimiento de la masa del suelo y el volumen total medido en probetas de 50 ml y 100 ml. La densidad real (DR) se determinó mediante el método del picnómetro, con la masa y el volumen total de suelo. La masa se determinó pesando directamente el suelo y el volumen de manera indirecta por el cálculo de la masa y la densidad del agua desplazada por la muestra de suelo. La porosidad total (Pt) de las muestras de suelo se calculó con base en la siguiente ecuación:

$$\% Pt = 1 - \left(\frac{DA}{DR} \right) 100 \quad (1)$$

Análisis químicos

El pH fue determinado por el método potenciométrico en una suspensión suelo-agua en una relación 1:2 usando un potenciómetro *Fisher Scientific* AB15, previamente calibrado con soluciones reguladoras a pH 4, 7 y 10.

Para la cuantificación del contenido de materia orgánica (MO) se utilizó la técnica de Pérdida por Ignición (PPI550; Heiri, Lotter & Lemcke, 2001), donde las muestras de suelo fueron calcinadas a una temperatura de 550 °C en una mufla marca Felisa durante tres horas y, por combustión húmeda, con la técnica de Walkley & Black (1934). Esta última se basa en la oxidación del carbono orgánico (CO) del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción que se genera al mezclarla con ácido sulfúrico concentrado. El dicromato de potasio residual se valoró con sulfato ferroso 6-hidratado. Para

calcular el porcentaje de MO se utilizó el factor de corrección de 1.724 (Factor de Van Bemelen).

La determinación de nitrógeno total (NT) se realizó siguiendo el método Micro-Kjeldahl. En una primera fase la muestra se digirió por calentamiento con ácido sulfúrico concentrado y una mezcla de sulfato de sodio y sulfato cúprico. En una segunda fase la muestra se expuso a hidróxido de sodio y agua destilada en un destilador marca Büchi modelo K-350. En la última fase se realizó la valoración del amoníaco recuperado en un volumen conocido de solución valorada de ácido bórico con ácido sulfúrico al 0.25 N (Ma & Zuazaga, 1942).

Análisis de elementos traza

El análisis de elementos traza (As, Cd, Cr, Cu, Pb y Zn) fue realizado en el Laboratorio de Geoquímica Ambiental del Centro de Geociencias-Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (Juriquilla, Querétaro), de acuerdo al método *Environmental Protection Agency* (EPA) (2001): “Trace elements in water, solids, and biosolids by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry”. La medición se realizó mediante Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente Thermo iCAP 6500 Duo, utilizando un patrón interno de itrio de 1 ppm para evaluar que la señal del instrumento se encontrara dentro de un margen de $\pm 10\%$ de error. Los estándares de calibración fueron preparados a partir de soluciones de referencias certificadas de 100 ppm en siete diferentes concentraciones. Los coeficientes de correlación para las curvas de calibración fueron mayores a 0.9990, los porcentajes de recuperación fueron mayores al 90% y evaluados mediante un Material de Referencia Estándar el cual corresponde al *National Institute of Standards & Technology* (NIST) de Estados Unidos con la clave 2710a.

Cálculo del I_{geo}

Se calculó el I_{geo} para cada muestra de suelo con base en el indicador propuesto por Müller (1969) mediante la siguiente ecuación:

$$I_{geo} = \ln \left(\frac{C_n}{1.5 B_n} \right) \quad (2)$$

donde C_n es la concentración medida del elemento en el sedimento o suelo, B_n es el valor del elemento en la corteza continental. Los valores resultantes fueron contrastados con las clases correspondientes (tabla 1).

Tabla 1.
Clasificación de I_{geo} y grado de contaminación.

0	$I_{geo} < 0$	Prácticamente no contaminado
1	$0 < I_{geo} < 1$	No contaminado a moderadamente contaminado
2	$1 < I_{geo} < 2$	Moderadamente contaminado
3	$2 < I_{geo} < 3$	De moderado a fuertemente contaminado
4	$3 < I_{geo} < 4$	Fuertemente contaminado
5	$4 < I_{geo} < 5$	De fuertemente contaminado a extremadamente contaminado
6	$5 < I_{geo}$	Extremadamente contaminado

Fuente: Loska, Wiechula & Korus (2004).

Análisis estadísticos

La comparación entre sitios de muestreo para las variables dependientes (H, clase textural, DA, DR, Pt, pH, CO, MO, NT, C/N y PPI_{550}) fue realizada mediante un diseño de una vía (prueba de F) o la prueba H de Kruskal-Wallis, dependiendo del cumplimiento de los supuestos para el análisis paramétrico en cada caso. Adicionalmente se obtuvieron los coeficientes de

correlación (Pearson o Spearman) para determinar el grado de asociación entre los pares de variables (H, clase textural, DA, DR, Pt, pH, CO, MO, NT, relación C/N, PPI_{550} , As, Cd, Cr, Cu, Pb y Zn). Los análisis se ejecutaron con el paquete estadístico *Statistical Analysis System* (SAS, 2001).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis físicos

Las medianas de las propiedades físicas de las muestras de suelos se presentan en la tabla 2. A excepción de la DR (prueba F), las otras características (arena, limo, arcilla, H, DA y P) fueron analizadas con la prueba H de Kruskal-Wallis, mostrando en todos los casos diferencias altamente significativas; lo cual permitió concluir en cada variable dependiente que la mediana de un sitio de muestreo es diferente a las demás. Enseguida se aplicó una prueba de F a la variable generada con los rangos asignados por esta prueba no paramétrica, confirmando las diferencias significativas ahora con los promedios de los rangos asignados, a los cuales además se les realizó la prueba de Tukey ($p = 0.05$), observándose que en cada una de estas variables se presentaron alrededor de 13 grupos estadísticos (tabla 2).

Tabla 2.
Propiedades físicas de los suelos.

Muestra	Arena		Limo		Arcilla		Clase textural	H		DA		DR	
	(%)	ji	(%)	ed	(%)	e		(%)	e	($g\ cm^{-3}$)	fdec	($g\ cm^{-3}$)	d
MASE	13.32	ji	25.6	ed	60.76	e	Arcilla	6.77	e	1.07	fdec	1.97	d
MASFE	11.8	kj	26.34	ed	61.52	d	Arcilla	6.99	d	1	fg	2.22	bdac
MAJ	57.92	ba	29.92	bc	12.16	n	Franco Arenoso	1.52	ml	1.19	ba	2.55	a
MAC	23	edf	25.1	ef	51.9	i	Arcilla	6.76	e	1.11	bdac	2.33	bdac
MAA	12.26	kj	28.78	dc	58.96	fe	Arcilla	6.54	f	1.08	fdec	2.28	bdac
MASA	28.04	edc	13.78	kj	57.68	fg	Arcilla	6.37	gf	1.05	fddeg	2.35	bac
MASI	7.32	ml	40	a	50.68	ji	Arcillo Limosa	6.09	gh	1.07	fddeg	2.39	bac
MACJI	19.87	hgf	42.09	a	38.13	jk	Franco Arcillo Limosa	5.66	ij	1.08	bdec	2.41	ba
MACNA	8.7	kl	38.62	ba	53.68	h	Arcilla	5.99	ih	1.09	bdac	2.34	bdac
MASIM	45.32	bac	18	hig	35.68	lk	Franco Arcillo Arenosa	2.22	kl	1.18	bac	2.5	ba
IRA	34.92	bdc	34.28	bac	29.8	lm	Franco Arcillosa	3.86	kj	1.18	bac	2.27	bdac
IRP1	8.48	l	22	hfg	68.52	bc	Arcilla	9.5	ba	1.04	feg	2.23	bdac
IRP2	0.2	m	16	kij	83.8	a	Arcilla	10.96	a	1.05	fddeg	2.34	bdac
IRP3	14.3	hi	23.36	efg	61.52	d	Arcilla	8.62	c	1.02	feg	2.36	bac
IRP4	21.2	egf	17.28	hij	62.52	dc	Arcilla	8.15	c	0.98	g	2.03	dc
JUA2	73.2	a	13.28	k	13.52	nm	Franco Arenosa	1.32	m	1.32	a	2.36	bac
CUE3	6.2	ml	20.28	hig	73.52	ba	Arcilla	8.76	b	0.99	fg	2.15	bdc
ABA5	15.48	hgi	29.28	dc	54.52	hg	Arcilla	7.92	d	1.18	bac	2.15	bdc

Se muestran las medianas para cada variable y en el caso de la DR la media ($n = 3$). Los valores con diferentes letras son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$).

Fuente: Elaboración propia

El suelo con mayor porcentaje de H resultó ser la muestra IRP2, seguido de IRP1 y CUE3 (tabla 2 y figura 1). Estos 3 suelos tienen la particularidad de presentar los contenidos de arcilla más altos (máximo 83.80%; tabla 2), lo que les confiere una retención de humedad mayor (Jury, Gardner & Gardner, 1991). Por otra parte, los suelos JUA2, MAJ y MASIM (figura 1) presentaron contenidos de arena comparativamente más altos (> 45%) en relación con los contenidos de H más bajos (H máxima: 2.22%; tabla 2). De la misma manera, la matriz de correlación de Spearman (r_s ; tabla 3) evidenció una correlación fuertemente positiva ($r_s = 0.93753$, valor- $p = < 0.0001$) entre el % arcilla y la H, y contrariamente, una correlación negativa entre el % arena y la H ($r_s = -0.69659$, valor- $p = 0.0013$; tabla 3).

La mayoría de los suelos mostraron valores de DA comprendidos entre 1.00 g cm^{-3} y 1.19 g cm^{-3} (tabla 2) y según la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002), estas DA son comunes en suelos minerales con textura arcilla. Los valores de DA de 1.00 g cm^{-3} a 1.19 g cm^{-3} indicarían que la mayor parte de los suelos agrícolas analizados no presentan problemas de compactación lo que conlleva a una buena capacidad de infiltración y aireación (Sumner, 1999). La muestra con la DA más alta fue JUA2 (1.32 g cm^{-3} ; figura 1) acorde con un suelo de clase textural francosa. De la misma manera, la DA mostró una correlación positiva con el % arena ($r_s = 0.61348$, valor- $p = 0.0068$) y negativa con el % arcilla ($r_s = -0.84967$, valor- $p = < 0.0001$).

Según la clasificación de DR, reportada por Porta, López-Acevedo & Roquero (2003), las muestras de suelo indicaron un predominio de minerales de arcilla (DR: 2.00 g cm^{-3} - 2.65 g cm^{-3}) dentro de las partículas inorgánicas del suelo, densidades comunes en suelos con contenidos altos de filosilicatos y tectosilicatos. Los suelos estudiados en este trabajo derivarían de la meteorización de rocas predominantemente basálticas, los cuales se caracterizan por el predominio de estos minerales silicatados ricos en Fe y Mg como componentes sólidos del suelo (Tarbuck & Lutgens, 2005).

Según Oades (1984), la estabilidad de los poros asociada a los macro y micro agregados es esencial para el crecimiento óptimo de las plantas donde su estructura se ve favorecida por cationes multivalentes que actúan como puentes entre los coloides orgánicos y arcillas. La dispersión de las partículas de arcilla de los microagregados se promueve por la adsorción de los ácidos orgánicos producidos por plantas, bacterias y hongos que aumentan su carga negativa. La capacidad de dispersión de la arcilla se compensa por la acción unificadora de polisacáridos (principalmente mucílagos producidos por las bacterias), las raíces de las plantas e hifas de los hongos. Los suelos agrícolas con una adecuada actividad biológica generalmente contienen el 60% de espacio poroso y es indicativo del grado de aireación del suelo, retención de humedad y enraizamiento. En este trabajo el valor más bajo encontrado de Pt fue de 44.05% (JUA2: clase franco arenosa) y el más alto de 58.09% (IRP3: clase arcilla; tabla 2 y figura 1).

Tabla 3.

Matriz de correlación de Spearman entre las variables analizadas.

	Arena	Limo	Arcilla	pH	CO	MO	NT	H	DA	Pt	As	Cd	Cu	Pb
	(%)	(%)	(%)		(%)	(%)	(%)	(%)	(g cm^{-3})	(%)				
Limo (%)	-0.13725													
Arcilla (%)	-0.73722 [†]	-0.38616												
pH	0.17665	0.21488	-0.31059											
CO	0.14662	0.01446	-0.04029	-0.51266 [†]										
MO (%)	0.15789	0.05057	-0.10532	-0.41426	0.98503 [†]									
NT (%)	0.21233	0.3304	-0.3114	-0.37066	0.67980 [†]	0.64009 [†]								
H (%)	-0.69659 [†]	-0.30237	0.93753 [†]	-0.22211	-0.0826	-0.13932	-0.26411							
DA (g cm^{-3})	0.61348 [†]	0.26218	-0.84967 [†]	0.3776	-0.1576	-0.08808	0.09048	-0.75130 [†]						
Pt (%)	-0.37049	0.13519	0.20547	-0.09917	0.14765	0.129	0.32004	0.16202	-0.48291 [†]					
As	-0.03616	-0.33678	0.14987	-0.41417	0.1447	0.11364	-0.16952	-0.02893	-0.17013	-0.21281				
Cd	-0.10766	-0.08075	0.20456	-0.2114	0.18022	0.14907	0.25299	0.37992	0.00572	-0.22878	0.07461			
Cu	0.27967	0.13519	-0.44295	-0.28616	0.19205	0.24665	0.1854	-0.47368	0.40726	-0.16615	0.31405	0.05694		
Pb	0.24252	-0.28999	-0.07124	-0.48244 [†]	0.04027	0.0031	0.03729	-0.07946	0.26218	-0.52941 [†]	0.51756 [†]	0.50828 [†]	0.60991 [†]	
Zn	0.10217	-0.1063	-0.04853	-0.27686	0.09396	0.08978	0.12532	0.05057	0.18964	-0.34985	0.40083	0.75673 [†]	0.57688 [†]	0.80392 [†]

[†] Denota diferencia estadística significativa.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis químicos

En la tabla 4 se muestran las medias o en su caso las medianas de las variables químicas en los sitios evaluados. A las variables: pH, CO, MO y NT se les aplicó la prueba H de Kruskal-Wallis, y a la relación C/N y PPI₅₅₀ la prueba de F.

De acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002), el pH en los diferentes suelos mostró una gran variabilidad de resultados, desde moderadamente ácido hasta fuertemente alcalino (6.37 - 8.69; tabla 4). Según Porta *et al.* (2010), este parámetro es un buen indicador de la presencia o ausencia de determinados constituyentes en el suelo, de los cationes que habrá en el complejo de cambio, de la disponibilidad de nutrientes para los cultivos y de la actividad biológica en el suelo. En general, se considera que el rango de pH obtenido para los suelos agrícolas resultaría adecuado para lograr una disponibilidad óptima de macro y micro elementos, sin sufrir deficiencias de nutrientes esenciales para los cultivos (Núñez, 1985).

Para el caso particular de las muestras de suelo localizadas en los municipios de Cuernavaca y Abasco (i.e., MACJI, MACNA, ABA5), las cuales presentaron pH relativamente más alcalinos (entre 8.14 y 8.69; tabla 4), los resultados probablemente se expliquen por la geología y topografía de esta zona. Los municipios

de Abasco y Cuernavaca actúan como cubetas que reciben las escorrentías y el lavado del material rocoso y edafológico de las zonas circundante más elevadas (Servicio Geológico Mexicano, 1999), confiriéndole a los suelos de ciertas partes de estos municipios una basicidad mayor.

En este estudio las muestras MASE, MASFE y MAC (figura 1) presentaron las concentraciones más altas de MO (6.68% - 14.39%; tabla 4), lo que indicaría suelos con una gran cantidad de sustancias húmicas y una alta reactividad debido a sus superficies específicas elevadas (Porta *et al.*, 2003; Sumner, 1999). Estos suelos particularmente fueron manejados mediante labranza de conservación con cubiertas de paja, restos de rastrojos y regados con lixiviados de lombricomposta. Asimismo, con base en lo propuesto por Oades (1984), los componentes orgánicos de las muestras analizadas les otorgarían estabilidad a los agregados del suelo, mejorando la estructura de los mismos y contribuyendo a la disminución del riesgo de sellado y encostramiento superficial. Otra ventaja de las partículas orgánicas del suelo, es que constituyen una fuente de alimentos y energía metabólica para los microorganismos, la meso y macro fauna del suelo, liberando nutrientes al mineralizarse y neoforzando sustancias húmicas al biodegradarse. Por otra parte, la muestra que presentó una categoría baja en MO fue la muestra IRP1 (0.88%; tabla 4 y figura 1), un suelo con manejo convencional y de temporal.

Tabla 4.
Propiedades químicas de los suelos.

Muestra	pH		CO		MO		NT		Relación C/N		PPI ₅₅₀	
			(%)		(%)		(%)					
MASE	6.37	j	4.53	ba	8.41	ba	0.37	bac	11.86	efd	4.54	kj
MASFE	6.79	hij	7.8	a	14.39	a	0.41	bac	19.18	b	7.45	b
MAJ	7.7	efd	2.92	bdc	5.17	bc	0.5	a	6.14	h	3.59	l
MAC	7.89	bcd	3.49	bac	6.68	ba	0.44	ba	8.5	gfh	5.68	fg
MAA	7.99	bc	2.23	feg	4.12	ed	0.07	h	29.06	a	4.96	ji
MASA	7.77	ecd	2.09	feg	3.78	efg	0.12	ef	17.94	cb	5.05	hi
MASI	7.54	hfg	2.68	fde	4.62	dc	0.21	ed	13.29	cefd	5.85	fe
MACJI	8.69	a	1.11	j	1.91	j	0.26	dc	4.45	h	4.51	k
MACNA	8.14	ba	2.09	fhg	3.71	efg	0.19	ef	13.29	cefd	5.99	fe
MASIM	6.42	ij	2.7	dec	4.63	dc	0.26	bdc	10.14	gef	5.42	hg
IRA	7.53	hfg	1.93	ihg	3.34	hi	0.19	ed	10.39	gef	5.26	hgi
IRP1	7.77	ecd	0.51	j	0.88	j	0.11	gf	4.56	h	6.25	de
IRP2	6.8	hij	1.7	ijh	2.56	ji	0.11	gf	15.05	cebd	6.88	c
IRP3	7.69	efg	3.42	bdac	5.89	bac	0.26	bdc	12.97	cefd	7.96	a
IRP4	7.4	hig	2.72	fdec	3.93	ef	0.11	gf	24.54	a	6.24	e
JUA2	8.12	ba	1.79	ijhg	3.46	hfg	0.1	gh	18.59	b	3.02	m
CUE3	7.61	efg	1.96	hg	3.38	hig	0.12	ef	16.7	cbd	6.67	dc
ABA5	8.2	ba	1.54	ij	2.66	ji	0.1	gh	16.18	cbd	4.54	kj

Se muestran las medianas para las variables pH, CO, MO y NT y en el caso de la C/N y PPI₅₅₀ la media (n = 3). Los valores con diferentes letras son estadísticamente diferentes (p < 0.05).

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.
 Concentraciones totales de ET (mg kg⁻¹) y clase de I_{geo} de las muestras de suelo analizadas.

Elemento traza:	As	Clase de	Cd	Clase de	Cr	Clase de	Cu	Clase de	Pb	Clase de	Zn	Clase de
Límite de Detección (mg kg ⁻¹):	0.0093	I _{geo}	0.001	I _{geo}	0.003	I _{geo}	0.004	I _{geo}	0.005	I _{geo}	0.002	I _{geo}
MASE	14.97	2	0.5	2	19.16	0	50.43	1	41.79	1	109.44	1
MASFE	1.91	0	0.1	0	11.49	0	7.87	0	6.3	0	25.18	0
MAJ	<I.c.	0	0.76	3	20.97	0	36.08	0	32.6	1	80.06	0
MAC	<I.c.	0	0.54	3	13.68	0	3.24	0	5.74	0	44.47	0
MAA	3.3	0	0.08	0	12.94	0	5.2	0	5.76	0	30.53	0
MASA	1.74	0	0.06	0	11.31	0	4.15	0	4.87	0	25.12	0
MASI	2.46	0	0.12	0	32.06	0	12.83	0	5.69	0	44.11	0
MACJI	1.58	0	0.08	0	15.17	0	3.59	0	5.05	0	21.98	0
MACNA	2.24	0	0.1	0	16.21	0	4.66	0	5.56	0	26.82	0
MASIM	2.54	0	0.08	0	23.48	0	9.23	0	24.64	0	36.01	0
IRA	8.33	1	0.16	1	22.19	0	99.98	2	33.98	1	101.22	1
IRP1	<I.c.	0	0.31	2	24.85	0	6.01	0	16.71	0	58.97	0
IRP2	7.86	1	0.44	2	32.9	0	4.95	0	17.24	0	47.8	0
IRP3	7.69	1	0.39	2	33.85	0	10.34	0	15.18	0	75.13	0
IRP4	8.12	1	0.21	1	30.59	0	3.29	0	15.61	0	42.35	0
JUA2	12	1	0.15	2	20.44	0	51.06	1	33.36	1	72.52	0
CUE3	9.52	1	0.43	2	20.14	0	<I.c.	0	16.03	0	48.44	0
ABA5	<I.c.	0	0.31	2	25.54	0	4.28	0	12.52	0	43.09	0
Bn	4.8		0.09		92		28		17		67	
*CRT	22		37		280		NR		400		*300	

El límite de detección para cada elemento es incluido. I.c.: Límite de cuantificación del instrumento. B_n: Concentración geoquímica del metal en la corteza terrestre. [†]Concentración de referencia total (CR_T), clasificación de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (DOF, 2007). *Concentración de referencia para riesgo ecológico (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente [Profepa], 2000). NR: datos no reportados.
 Fuente: Elaboración propia

Los suelos extremadamente ricos en NT fueron MAJ, MAC, MASFE, MASE, MASIM, MACJI e IRP3 (NT > 0.221%; tabla 4 y figura 1). Estos suelos se caracterizan por contener restos de paja en descomposición de sus cultivos anteriores incorporados al suelo. La matriz de correlación mostró que el CO tiene correlación positiva con el NT ($r_s = 0.67980$, valor- $p = 0.0019$). La paja al contener una alta proporción de C/N favorece el crecimiento y multiplicación de organismos en el suelo. Cuando la paja se descompone y la mayor parte de los materiales ricos en energía han sido utilizados, la actividad microbiana disminuye y el nitrógeno nuevamente se acumula en el suelo (Miller, Graves, Williams & Madson, 1989). Estos suelos se comportarían como reservas importantes de nitrógeno y como fuentes potenciales que favorecen la transformación de compuestos solubles o gaseosos de distintas formas nitrogenadas. La muestra MAA, (figura 1) con una concentración de NT de 0.07%, correspondió únicamente a la categoría medianamente pobre. Este es un suelo agrícola con 10 años de producción con dos temporadas de siembra por año con uso de fertilizantes químicos.

Las muestras MASIM, IRA, MASE y MAC presentaron la relación C/N más aproximada a la recomendable para los suelos de uso agrícola (C/N = 10 - 12; Kass, 1996; tabla 4 y figura 1), logrando un equilibrio óptimo entre los procesos de descomposición, mineralización y humificación. La relación C/N del suelo MAA (C/N = 29.06; tabla 4) resultó más alta que el valor límite óptimo recomendable por la norma mexicana de suelos. Este valor de C/N indica que el aporte de los nutrientes al suelo como nitrógeno, fósforo y azufre, por la descomposición de la materia orgánica, es más lento. Además, la muestra agrícola MAA presentó un contenido bajo en NT total (0.07%), lo que indicaría una posible competencia del nitrógeno orgánico entre los microorganismos y los cultivos del suelo.

Análisis de elementos traza e I_{geo}

Rudnick & Gao (2003) reportaron las concentraciones de ET de la corteza continental (B_n; tabla 5). En este estudio se encontró que la concentración de As en los suelos analizados es superior al valor reportado para

la corteza (figura 2), principalmente en la muestra MASE (14.97 mg kg⁻¹), aunque no rebasa el valor de la norma mexicana de metales en suelos (tabla 5). En cuanto al I_{geo}, este suelo perteneció a la clase 2 (moderadamente contaminado; figura 3). Muchos factores ambientales, como el pH, potencial *redox* (Eh), la presencia de óxidos de Fe y Al, la textura, la capacidad de intercambio catiónico y la materia orgánica, controlan la concentración del As en los suelos (Chen, Ma & Harris, 1999; 2002). Según Varsányi & Kovács (2006) y García, Scracek, Fernández & Del Valle (2007), la movilidad del As se encuentra ligada fundamentalmente a los procesos de adsorción-desorción con los minerales de Fe, Mn y Al, y con la materia orgánica, ante condiciones de pH y Eh específicas.

En el caso especial del suelo MAC, ubicado en la comunidad de "El Copal" (municipio de Irapuato; figura 1), si bien ha sido regado en los últimos años con agua procedente de pozos profundos (más de 100 m) con concentraciones elevadas de As (0.33 mg L⁻¹; Rodríguez, Morales-Arredondo & Rodríguez, 2016) que superan la norma mexicana de aguas para consumo humano (0.025 mg L⁻¹; NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000)), este metaloide no fue detectado en la muestra de suelo (tabla 5). Es importante destacar que en el área de estudio (principalmente el noreste del municipio de Irapuato) existen rocas basálticas constituidas por silicatos de Al y Fe y óxidos de Fe, por lo que se esperaría la presencia de cantidades importantes de estos componentes inorgánicos en el suelo. Es probable que las fases portadoras fundamentales del metaloide en la muestra MAC lo constituyan los oxihidróxidos de Fe, que bajo condiciones oxidantes y de pH elevadas puedan ocasionar la desorción del elemento al medio. Esto sería avalado por la escasa o nula correlación encontrada

entre el As y la materia orgánica como así también, la correlación negativa entre el As y el pH (tabla 3).

Con base en la norma mexicana para suelos de uso agrícola, el elemento Cd se encontró en valores muy por debajo de la concentración de referencia total (CR_T) (tabla 5). Sin embargo, comparando los valores reportados en la corteza continental (figura 2) y las concentraciones cuantificadas de Cd para IRA e IRP4 (figuras 1 y 3), estos resultaron con clase de I_{geo} 1 (no contaminado a moderadamente contaminado). A los suelos agrícolas MASE, IRP1, IRP2, IRP3, JUA2, CUE3 y ABA5 les correspondió una clase de I_{geo} 2 mientras que MAJ y MAC resultaron con clase de I_{geo} 3 (de moderado a fuertemente contaminado; tabla 5; figuras 1 y 3). Esto indicaría que su acumulación procede de fuentes antropogénicas. Como fue reportado por Alloway (2012), la aplicación de biósólidos, estiércol y las partículas sólidas presentes en el humo de los incendios y las emisiones de diversas industrias son una fuente de aporte de este contaminante en los suelos.

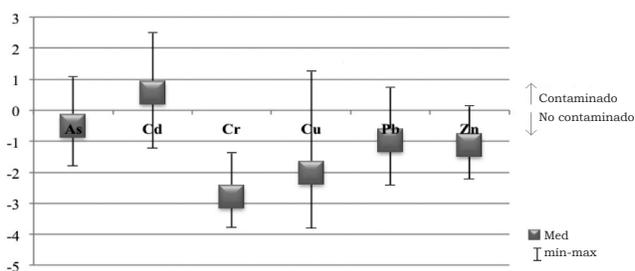


Figura 2. Índice de geoacumulación (I_{geo}) de los suelos analizados. Fuente: Elaboración propia.

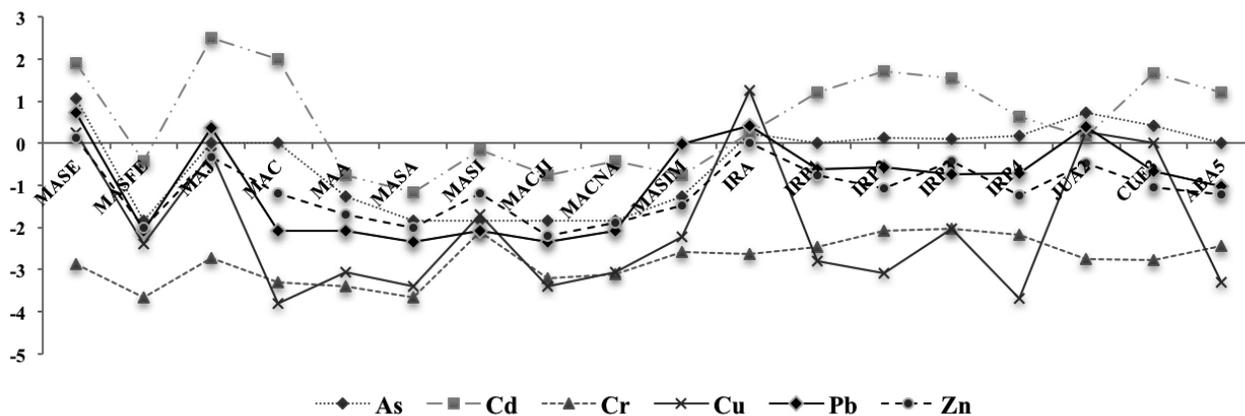


Figura 3. Índice de geoacumulación (I_{geo}) de los suelos analizados. Fuente: Elaboración propia.

El promedio del contenido de Cr en los suelos analizados fue de 21.50 mg kg^{-1} (tabla 5). En la corteza continental, el Cr alcanza los 92 mg kg^{-1} por lo que ninguna concentración de Cr cuantificada en este estudio supera la de la corteza (figura 2), lo cual sugiere que los suelos agrícolas no estarían contaminados por este metal.

Por su parte, el Cu se encuentra normalmente en el suelo en una concentración de 28 mg kg^{-1} - 30 mg kg^{-1} , acumulado normalmente en los horizontes superficiales. El Cu puede llegar a la superficie del suelo por la aplicación de fertilizantes foliares para el crecimiento y salud de las plantas, como un complemento a las deficiencias de este micronutriente esencial en el suelo (Machender *et al.*, 2011; Wuana & Okieimen, 2011). El valor más elevado de Cu se encontró en el suelo IRA, localizado en el área NE del municipio de Irapuato (figura 1) con un valor de 99.98 mg kg^{-1} (tabla 5). Este suelo es trabajado mediante agricultura convencional lo que implica una aplicación alta de agroquímicos que acumulan metales pesados en el suelo. La clase de I_{geo} para esta muestra de suelo resultó de 2 (moderadamente contaminado).

El contenido de Pb en el suelo se asocia principalmente con minerales de arcilla, óxidos de Mn, hidróxidos (Fe y Al) y con la materia orgánica. El contenido de Pb de los suelos superficiales a escala mundial se ha estimado en 25 mg kg^{-1} ; valores por encima de este indican una influencia antropogénica derivada de la emisión aérea de la combustión de gasolina con tetraetilo de plomo (Wuana & Okieimen, 2011). Los suelos agrícolas MASE, MAJ, IRA Y JUA2 mostraron una clase de I_{geo} 1 (no contaminado a moderadamente contaminado, figuras 1 y 3), todos ubicados en las adyacencias a zonas urbanas y/o a las carreteras. El Pb mostró correlación negativa estadística significativa con el pH ($r_s = -0.48244$, valor- $p = 0.0426$). El valor del pH desempeña un importante papel en la disponibilidad del Pb, cuanto menor sea el pH mayor cantidad de Pb se encontrará disponible en la solución del suelo. A pH alto es un elemento que precipita como hidróxido, fosfato y carbonato, o puede ligarse también a la materia orgánica. El Pb también mostró una correlación positiva con el As ($r_s = 0.51756$, valor- $p = 0.0278$), con el Cd ($r_s = 0.50828$ valor- $p = 0.0313$) y con el Cu ($r_s = 0.6099$, valor- $p = 0.0072$; tabla 3).

El Zn pertenece al grupo de elementos trazas esenciales para la vida y es muy peligroso en concentraciones altas, ya que influye negativamente en la actividad de los microorganismos y lombrices de tierra, retardando la descomposición de la materia orgánica (Wuana & Okieimen, 2011). Las fuentes principales de contaminación de Zn son las industrias, los lixiviados de

estiércol y compostas, fertilizantes y pesticidas (Gowd, Reddy & Govil, 2010). De esta manera, el suelo MASE regado con lixiviados de lombricomposta es que el presentó el contenido más alto de Zn de todos los suelos analizados ($109.44 \text{ mg kg}^{-1}$; tabla 5). En las rocas de la corteza continental se reportó una concentración de 67 mg kg^{-1} de Zn, resultando las muestras MASE e IRA en la categoría 1 de I_{geo} (no contaminado a moderadamente contaminado; figuras 1 y 3), ambos suelos sometidos a fertilización por agroquímicos.

En general, las correlaciones positivas del Pb, Cd, Cu y Zn concuerdan con lo reportado en el trabajo de Alloway (2012), donde se indica que estos elementos se encuentran asociados y su contaminación en los suelos proviene de los fertilizantes aplicados para dar crecimiento a los cultivos, así como de zonas urbanas, emisiones del tránsito vehicular, pinturas y muchas otras fuentes no específicas.

CONCLUSIONES

Las concentraciones totales de los elementos traza analizados en los suelos de un sector del suroeste del estado de Guanajuato no rebasaron las concentraciones de referencia total de la norma mexicana para suelos de uso agrícola. Sin embargo, el I_{geo} mostró clases desde no contaminadas (Cr) a moderadamente contaminadas en las muestras de suelos estudiadas (As, Cu, Pb, Zn y Cd), indicando para estos últimos un aporte fundamentalmente antrópico. La aplicación de agroquímicos, la eliminación a la atmósfera de los desechos de combustibles fósiles y las emisiones industriales se consideran fuentes importantes que conducen a su enriquecimiento en los suelos estudiados.

Los resultados alcanzados en este trabajo evidencian un riesgo potencial de acumulación progresiva de los elementos tóxicos analizados en los suelos de este sector del Bajío guanajuatense. Es necesario tomar medidas de control para evitar el aumento de la degradación de los suelos agrícolas del estado de Guanajuato considerando el rápido crecimiento urbano e industrial de esta área y no comprometer la seguridad alimentaria de su población.

AGRADECIMIENTOS

María Elena López Pérez agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca otorgada durante la realización del proyecto. Los autores agradecen el apoyo recibido al M. C. Oscar Alejandro Martínez Jaime en los análisis estadísticos y a la M. B. Ingrid Zanella Sainz por el apoyo en la confección de

mapas. Un agradecimiento especial a Osmar Benjamín Granados Tinoco por la aportación de muestras de suelo.

REFERENCIAS

- Alloway, B. J. (2012). Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability (Third edition). *Environmental Pollution*, 22. Whiteknights, Reading, UK: Springer. doi: 10.1007/978-94-007-4470-7_2
- Álvarez, M. D. (2010). El Suelo, Regulador Físicoquímico de Elementos Traza Para Las Plantas. En J. L. González Rebollar & A. Chueca Sancho (Eds.). *Características generales y uso en programas de desarrollo de tierras áridas y semiáridas: Homenaje al Dr. Julio López Gorgé* (pp. 129-142). Granada: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analyses of Soils. *Agronomy Journal*, 54(5), 464-465. doi: 10.2134/agronj1962.00021962005400050028x.
- Chen, M., Ma, L. Q., & Harris, W. G. (1999). Baseline concentrations of 15 trace elements in Florida surface soils. *Journal of Environmental Quality*, 28(4), 1173-1181.
- Chen, M., Ma, L. Q., & Harris, W. G. (2002). Arsenic Concentrations in Florida Surface Soils: Influence of Soil Type and Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 632-640. doi: 10.2136/sssaj2002.6320
- Consejo de Recursos Minerales. (1992). *Monografía Geológico-Minera del estado de Guanajuato*. Pachuca: Secretaría de Energía, Minas e Industria Parastatal, Subsecretaría de Minas e Industria Básica.
- Diario oficial de la Federación (DOF). (22 de noviembre de 2000). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, salud ambiental.
- Diario Oficial de la federación (DOF). (31 de diciembre de 2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2 de diciembre de 2007). Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
- García, E. (1973). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. México: Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.
- García, M. G., Scracek, O., Fernández, D. S., & Del Valle Hidalgo, M. (2007). Factors affecting arsenic concentration in groundwaters from Northwestern Chaco-Pampean Plain, Argentina. *Environmental Geology*, 52(7), 1261-1275. doi: 10.1007/s00254-006-0564-y
- Gowd, S. S., Reddy, R. M., & Govil, P. K. (2010). Assessment of heavily metal contamination in soils at Jajmau (Kanpur) and Unnao industrial areas of the Ganga Plain, Uttar Pradesh, India. *Journal Hazardous Materials*, 174(1-3), 113-121. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.09.024
- Heiri, O., Lotter, A. F., & Lemcke, G. (2001). Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Paleolimnology*, 25(1), 101-110. doi:10.1023/A:1008119611481.
- Jury, W. A., Gardner, W. R., & Gardner, W. H. (1991). *Soil Physics*. New York: John Wiley and Sons Inc.
- Kabata-Pendias, A. (2000). *Trace elements in soils and plants*. Florida: Press Boca Raton.
- Kass, D. C. L. (1996). *Fertilidad de suelos*. Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia (EUNED).
- Lindbo, D. L., Kozlowski, D. A., & Robinson, C. (2012). *Know soil, know life*. Madison, WI: Soil Science Society of America.
- Loska, K., Wiechula, D., & Korus, I. (2004). Metal contamination of farming soils affected by industry. *Environment International*, 30(2), 159-165. doi:10.1016/S0160-4120(03)00157-0.
- Ma, T., & Zuazaga, G. (1942). Micro-Kjeldahl Determination of Nitrogen. A New Indicator and An Improved Rapid Method. *Industrial & Engineering Chemistry*, 14(3), 280-282. doi: 10.1021/i560103a035.
- Machender, G., Dhakate, R., Prasanna, L., & Govil, P. K. (2011). Assessment of heavy metal contamination in soils around Balanagar industrial area, Hyderabad, India. *Environmental Earth Sciences*, 63(5). doi:10.1007/s12665-010-0763-4.
- Miller, P. R., Graves, W. L., Williams, W. A., & Madson, B. A. (1989). Cover crops for California agriculture. Oakland: University of California Division of Agriculture and Natural Resources Publication 21471.
- Müller, G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *GeoJournal*, 2(3), 108-118.
- Núñez, S. J. (1985). Fundamentos de edafología. Costa Rica: Editorial de la Universidad Estatal a Distancia.
- Oades, J. M. (1984). Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, 76(1), 319-337. doi:10.1007/BF02205590.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2015). *¿Cuánto sabes sobre los suelos? 2015 Año internacional de los suelos*. Recuperado el 17 de febrero de 2016 de <http://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/317398/>
- Paredes, M. R., Mandujano, B. A., Gámez, V. A. J., & García, N. H. (2011). Actualización del mapa de uso del suelo agrícola en el estado de Guanajuato. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(1), 85-96.
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Poch, M. R. (2010). *Introducción a la Edafología, Uso y protección de suelos*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Roquero de Laburu, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (Profepa). (2000). Disposiciones y procedimientos para la caracterización y restauración de suelos contaminados: México, D.F., Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Subprocuraduría de Auditoría Ambiental, Dirección General de Emergencias Ambientales.
- Rodríguez, R., Morales-Arredondo, I., & Rodríguez, I. (2016). Geological Differentiation of Groundwater Threshold Concentrations of Arsenic, Vanadium and Fluorine in El Bajío Guanajuatense, Mexico. *Geofísica Internacional*, 55(1), 5-15.

- Rudnick, R. L., & Gao, S. (2003). Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, 3, 1-64. doi:10.1016/B0-08-043751-6/03016-4.
- Statistical Analysis System (SAS). (2001). SAS User's Guide, Version 8, SAS Institute Inc. Cary, N.C. U.S.A.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (Semarnat). (2012). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental*. Recuperado el 30 de marzo de 2016 de http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap0_docs_previos.pdf:382.
- Secretaría de Programación y Presupuesto (SSP). (1980). *Carta estatal de suelos. Escala 1:500,000. Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática. México*.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). (1999). *Carta geológico-minera Querétaro F14-10 Qro., Gto., Mich., Jal., y Edo. Méx. Escala 1: 250,000*. Recuperado de http://portal.sgm.gob.mx/cartas_impresas/productos/cartas/cartas250/geologia/pdf/77_F14-10_GM.pdf. Consultado: 26 de abril de 2016.
- Sumner, M. E. (1999). *Handbook of soil science*. Boca Ratón, Florida: CRC press.
- Tarback, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra, una introducción a la geología física*. Madrid: Editorial Pearson.
- US Environmental Protection Agency (EPA). (2001). *Trace elements in water, solids, and biosolids by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry Revision 5.0*. EPA, Washington D.C.
- Varsányi, I., & Kovács, L. O. (2006). Arsenic, iron and organic matter in sediments and groundwater in the Pannonian Basin, Hungary. *Applied Geochemistry*, 21(6), 949-963.
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38.
- Wuana, R. A., & Okieimen, F. E. (2011). Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *International Scholarly Research Notices Ecology*, 402647. doi:10.5402/2011/402647.