

Análisis geoestadístico de la distribución de metales pesados a partir de muestras de sedimento en las cartas Zacatecas y Guadalupe, escala 1:50,000, México

Edgar Omar Almeida-Miranda¹, Felipe de Jesús Escalona-Alcázar^{1*}, Jorge Bluhm-Gutiérrez¹,
Santiago Valle-Rodríguez¹, Josefina Huerta-García², Sayde María Teresa Reveles-Flores¹

¹Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas",
Calzada de la Universidad 108, Fracc. Progreso, C.P. 98058, Zacatecas, Zacatecas, México

²Unidad Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas",
Avenida Preparatoria S/N, Col Agronómica, C.P. 98066, Zacatecas, Zacatecas, México.

*fescalona@hotmail.com

Resumen

En este trabajo se presenta un modelo de distribución espacial de metales pesados de las cartas Zacatecas (F13B58) y Guadalupe (F13B68), escala 1:50,000, realizado con la base de datos de geoquímica de sedimentos activos que elaboró el Servicio Geológico Mexicano (SGM) en 1999. La base de datos es de 334 muestras georreferenciadas en las que se analizaron 28 elementos. El contenido de cada elemento se comparó con las Concentraciones de Referencia Totales definidas en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que define los límites permisibles para que el suelo sea utilizado en actividades agrícola/residencial/comercial o industrial. Las concentraciones superiores a las establecidas en la NOM se consideran tóxicas para la salud de la población y el ambiente, por ello se definió cuáles elementos las exceden y cómo se distribuyen para así establecer su posible proveniencia.

Los elementos cuyas concentraciones exceden los valores establecidos en la NOM para uso agrícola/residencial/comercial son el As, Cd, Cr y Pb. De cada uno de ellos se determinó el área de influencia utilizando el método de Kriging ordinario combinado con un semivariograma estable, cuyos parámetros variaron en el modelo de cada elemento. En la definición del área de influencia de cada muestra se tomaron en cuenta los valores reales y los estimados, así como el Error Medido (EM). De esta manera fue posible predecir los valores y realizar la interpolación.

Menos del 10% del total de muestras analizadas tienen valores que están sobre la NOM; de ellas el arsénico tiene 64 ppm y el plomo 10 ppm; el cadmio y el cromo solo tienen dos muestras que sobrepasan los valores establecidos en la NOM. A partir del coeficiente de correlación de Pearson se obtuvo una correlación positiva y mayor que 0.5 para el As y Pb. Ambos elementos tienen un área de influencia que es de forma irregular alrededor de las estructuras mineralizadas en la Sierra de Zacatecas y en las obras mineras (activas y antiguas). Esto es, el origen es natural pero la actividad minera pudo haberlos concentrado dando una componente antropogénica.

Palabras clave: Metales pesados, Zacatecas, geoestadística, distribución, As y Pb.

1. Introducción

La movilización y dispersión de contaminantes desde su ubicación original hacia la atmósfera, el suelo, la vegetación y el agua son unos de los impactos negativos más significativos de las actividades humanas en ecosistemas marinos y terrestres (Salemaa et al., 2001; Lin et al., 2002; Koptsik et al., 2003; Rodríguez et al., 2008). La minería, la industria del hierro y el acero, el transporte por carretera, la incineración de residuos, y el uso de fertilizantes y agroquímicos han sido identificados como las principales fuentes antropogénicas de contaminación del suelo, el agua y los ecosistemas superficiales por metales pesados (Hutton y de Meeûs, 2001; Hansen et al., 2002; Rodríguez et al., 2008).

Además, las emisiones volcánicas, el proceso de desgasificación en la corteza terrestre, los incendios forestales y la composición química del material primigenio son también importantes fuentes que incrementan la concentración de metales pesados en los suelos (Løkke et al., 1996; Palumbo et al., 2000; Rodríguez et al., 2008).

La tradición minera en Zacatecas inició a partir del descubrimiento de yacimientos de plata en 1546. Para 1548, los españoles comenzaron la producción de plata en tres minas. Albarrada en el sistema de vetas de Veta Grande, y san Bernabé y Los Tajos en el sistema de vetas Mala Noche. De acuerdo con Ponce y Clark (1988), el Servicio Geológico Mexicano (SGM) estimó que aproximadamente 23'236,499 kg de plata

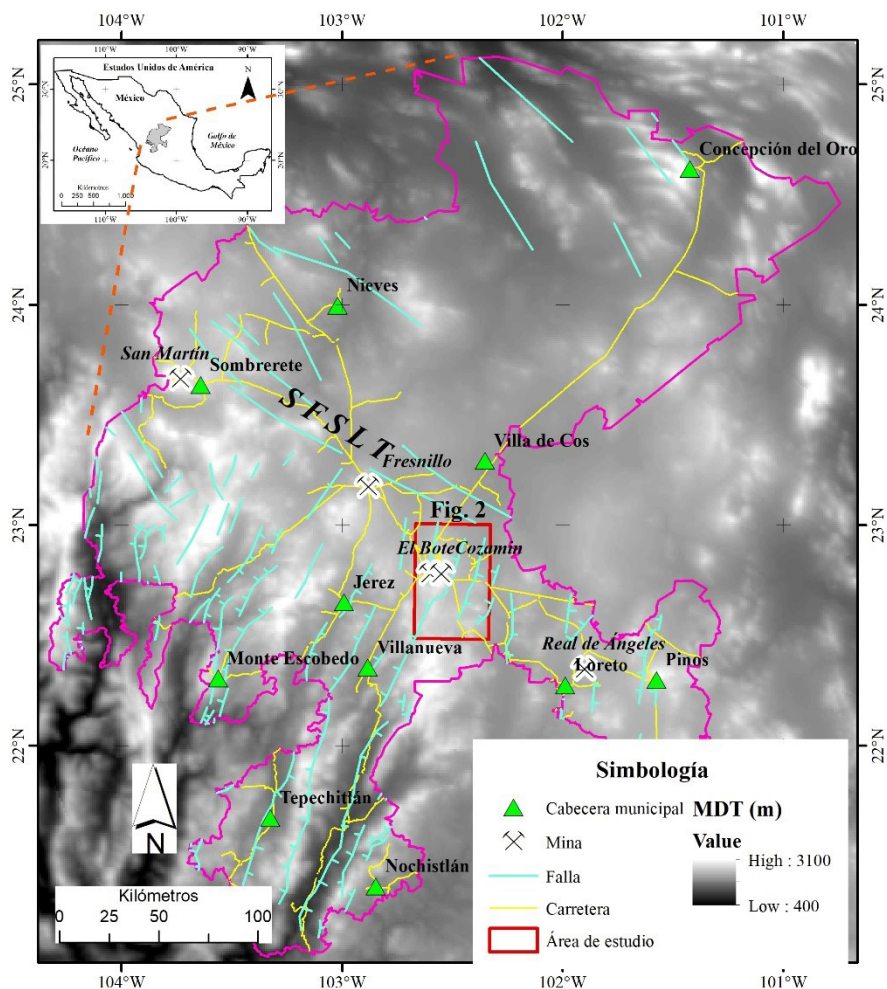


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio y de los estudios similares que se han realizado en sitios mineros el estado de Zacatecas ubicados a lo largo del Sistema de Fallas San Luis-Tepehuanes (SFSLT).

fueron extraídos del distrito minero Zacatecas entre 1548 y 1987. El distrito minero Zacatecas, ubicado en la porción norte de la Sierra de Zacatecas, contiene un número significativo de vetas mineralizadas, sobresaliendo las vetas La Cantera, Mala Noche, Veta Grande y Pánuco-Casa de Cedros.

El descubrimiento de este sistema de vetas mineralizadas se debió a su afloramiento; sin embargo, durante la formación de un yacimiento mineral hay percolación de fluidos en las rocas con elementos que no son de interés económico pero que pueden servir como guías de exploración (p. ejem. arsénico, antimonio). La abundancia de estos elementos en las rocas, el suelo y la

vegetación es normalmente menor al 1%, pero su concentración puede aumentar por procesos naturales y por actividades antropogénicas. En este trabajo se presenta el análisis geoestadístico del arsénico y plomo de las cartas geoquímicas Zacatecas (F13B58) y Guadalupe (F13B68), escala 1:50,000 (SGM, 1999) para realizar un modelo que permita visualizar la distribución geográfica de metales pesados en dichas cartas (Figuras. 1 y 2), y así, comparar los valores de dicha distribución con las concentraciones de referencia total (CRT) estipuladas en la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006) y poder asociar su origen y distribución con factores naturales y/o antropogénicos.

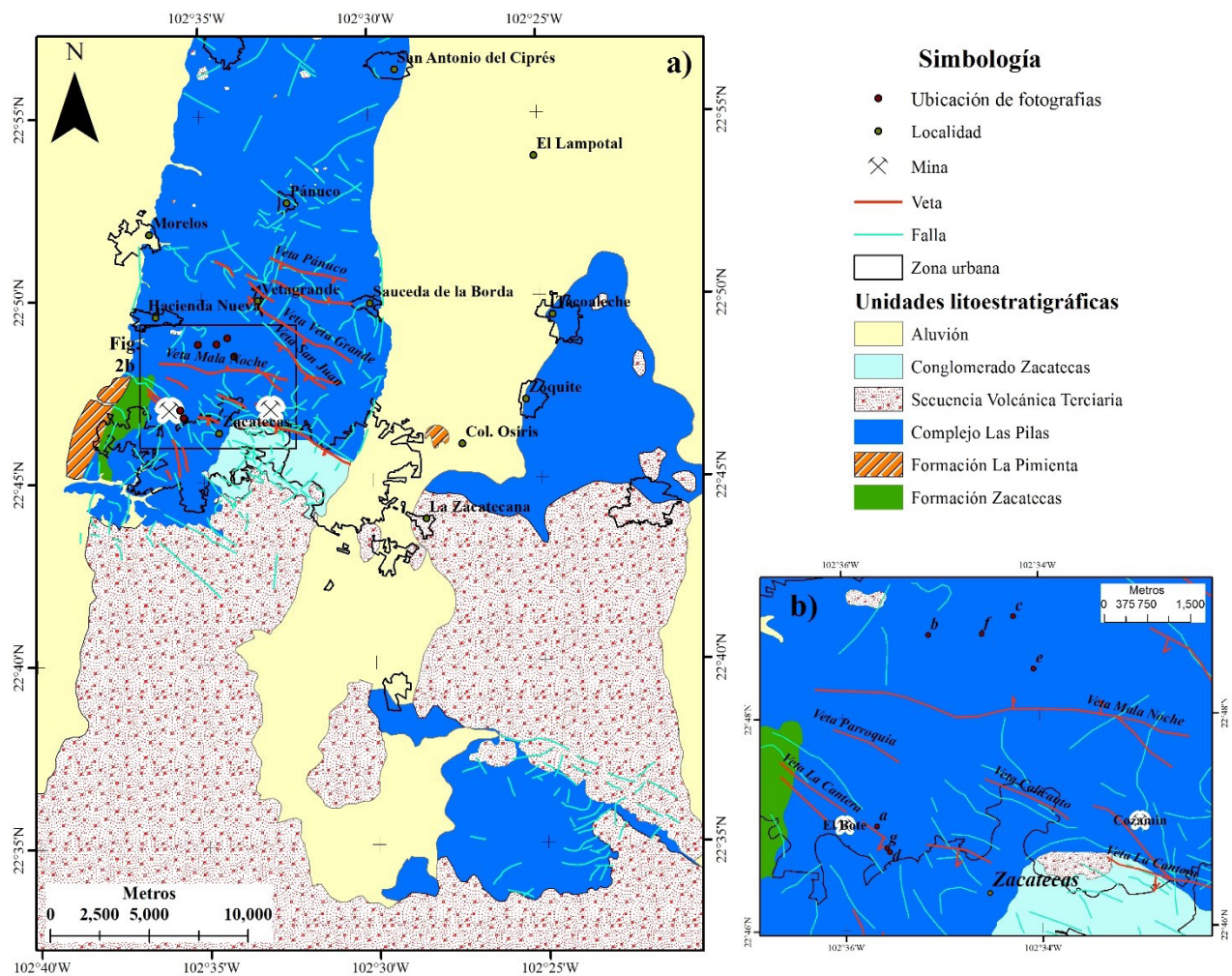


Figura 2. a) Mapa geológico simplificado de la zona de estudio (Modificado del SGM, 1997; Escalona-Alcázar et al., 2003, 2009, 2016; Ortega-Flores et al., 2016). b) El recuadro muestra el área en la que se realizó verificación de campo; las letras indican los incisos de la Fig. 8.

2. Trabajos previos

En materia ambiental, específicamente en concentraciones de metales pesados en suelos, no se encontraron trabajos que utilicen la información geoquímica disponible del Servicio Geológico Mexicano en el Estado de Zacatecas; sin embargo, sí se han publicado estudios que incluyen el muestreo de suelo y su análisis por metales pesados. Los trabajos fueron hechos en algunos sitios donde hay o hubo actividad minera y que están a lo largo del Sistema de Fallas San Luis-Tepehuanes (Figura 1). La ubicación de los trabajos que están fuera del área de estudio se presenta en la Figura 1; los que están en ella se presentan en la Figura 2. En la Tabla I se muestra una síntesis en la que se indican los elementos analizados, el enfoque del muestreo y si hay un modelo de distribución. Los resultados muestran que la concentración de los elementos como el arsénico, cadmio y plomo, entre otros, en la mayor parte de los casos, es superior a lo establecido en las Concentraciones de Referencia Total (CRT) establecidas por la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006) para el suelo.

De estos estudios, solamente tres incluyen un modelo de distribución (Manzanares-Acuña et al., 2005; Santos-Santos et al., 2006; Mayorga, 2012) y, son importantes porque son los únicos en los que las muestras están georeferenciadas, lo que permite la comparación espacial. En el resto de los trabajos solamente se presentan los resultados de los análisis, o bien, se incluyen muestras que no solo son de suelo, sino también de vegetación, montículos de almacenamiento, presas de jales, polvo en la calle o viviendas y en terrenos agrícolas o de agostadero.

3. Marco Geológico

La secuencia estratigráfica del área de estudio y su historia geológica han sido descritas con diferentes niveles de detalles a partir de

la cartografía y el uso de diversas técnicas analíticas. Con base en ello se han definido seis unidades litoestratigráficas que de la base a la cima son: Formación Zacatecas, Formación La Pimienta, Complejo Las Pilas, Filita La Escondida, Conglomerado Zacatecas y Secuencia Volcánica Terciaria. A continuación se describe de forma sucinta cada unidad.

La base de la secuencia estratigráfica es el Grupo Zacatecas, cuya unidad litológica más antigua son las cuarcitas y las filita de la Formación Zacatecas del Triásico Superior, que están cubiertas en discordancia por areniscas volcanoclasticas, limolitas y conglomerados de la Formación La Pimienta del Jurásico Inferior a Medio. El contacto de la Formación La Pimienta con el Complejo Las Pilas, del Jurásico Superior al Cretácico Inferior, es transicional. El Complejo Las Pilas está formado por derrames de lava de composición andesítica a basáltica, wackas y escasa caliza, toba y conglomerado; el conjunto está intrudido por lacolitos dioríticos. La parte superior de la secuencia mesozoica está formada por la Filita la Escondida del Cretácico Inferior.

El Grupo Zacatecas está cubierto de manera discordante por el Conglomerado Zacatecas del Paleoceno al Oligoceno Inferior (Escalona-Alcázar et al., 2016). El Conglomerado Zacatecas es polimítico y está formado por clastos de basalto, granito, lutita, cuarcita y riolita. Hacia la parte superior el Conglomerado Zacatecas está interestratificado con la Secuencia Volcánica Terciaria (Escalona-Alcázar et al., 2003, 2016). Toda la secuencia se encuentra cortada por diques, domos y derrames riolíticos (Escalona-Alcázar et al., 2003; Ortega-Martínez, 2016).

La deformación de las secuencias Mesozoica y Cenozoica está pobremente documentada. La secuencia Mesozoica tiene fallas inversas y pliegues cuyo origen es la acreción del arco de islas del Jurásico Tardío-Cretácico Temprano y la Orogenia Laramide (Ortega-Flores et al., 2016).

Tabla I. Síntesis de los trabajos realizados de geoquímica de suelos en el Estado de Zacatecas y su relación con la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006). La abreviatura NR significa No reportado. Por “Periferia” se entiende que es en los alrededores de los sitios de estudio. El asterisco a la derecha de la cita indica que el estudio presenta un modelo de distribución de los metales pesados.

Elementos	Intervalo de concentraciones (ppm)	Promedio de concentraciones (ppm)	Enfoque del muestreo	No. de muestras	Lugar	Autores
Cd	11 a 47	NR	Minas	70	Minas El Bote, San Martín y Noria de Ángeles	Carrillo-González y González-Chávez (2006)
Ni	19 a 26	NR				
Pb	232 a 695	NR				
Mn	1132 a 2400	NR				
Cu	134 a 189	NR				
Zn	116 a 827	NR				
Pb	73 a 84,238	NR	Planta recicladora de plomo	34	Fresnillo	Manzanares et al. (2006)
As	203.72 ± 37.30	NR	Localidad	NR	El Lampotal, Vetagrande	Ramírez - Ortiz y Núñez (2009)
Cd	33.63 ± 131	NR				
Pb	3480.99 ± 20.40	NR				
As	NR	109	Urbano-presas de jales	10	Zacatecas-Guadalupe, presas del Pedernalillo	Mireles et al. (2012)
Ba	NR	487				
Cr	NR	135				
Mn	NR	878				
Sb	NR	13.10				
V	NR	144				
Zn	NR	776				
Ag - Cd	20 a 50	NR	Montículo de planta de procesamiento	19	Tacoaleche	González-Manrique (2012)
As - Cr - Ni	150 a 250	NR				
Cu	600 a 700	NR				
Pb - Zn	2000 a 4000	NR				
Pb	8 a 7730	NR	Periferia	89	Vetagrande	Manzanares et al. (2005)*
As	NR	NR	Periferia	26	Zacatecana y colonia Osiris	Santos-Santos et al. (2006)*
Hg - Pb	NR	NR				
As, Pb, Hg, Cd, Cu, Zn y Mg	NR	NR	Periferia	222	Fresnillo	Mayorga (2012)*

Al finalizar la Orogenia Laramide, en el Eoceno, la relajación de los esfuerzos formó un sistema de fallas normales con orientación NW-SE, que se conoce como Sistema de Fallas San Luis-Teprehuanes (SFSLT) (Nieto-Samaniego et al., 2005; Loza-Aguirre et al., 2008). En la Sierra de Zacatecas, las fallas normales del SFSLT tienen mineralización económica; algunos ejemplos son las vetas La Cantera, Mala Noche, Veta Grande y Pánuco-Casa de Cedros (Figura 2) (Ponce y Clark, 1988; Nieto-Samaniego et al., 2005; Tristán-González et al., 2012). La deformación del Oligoceno al Reciente está asociada con el desarrollo de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras que son fallas normales con orientación preferente que varía de NNW a NNE (Aranda-Gómez et al., 2000).

4. Metodología

En este trabajo se utilizaron los resultados de 334 muestras de sedimento activo de arroyo, 181 de la base de datos de la carta geoquímica F13B68 y 153 de la base de datos de la carta geoquímica F13B58 (SGM, 1999). El muestreo y medición de los elementos traza fueron hechos por el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 1999). Las muestras fueron analizadas por 28 elementos (Fe, Ga, Mg, Mn, Mo, Ni, Au, Ag, P, Pb, K, Se, Na, Sb, Sc, Sn, Sr, Ti, Te, Be, Bi, Ba, Ca, Co, Cu, Cr, W y Zn). El procedimiento de toma de las muestras, preparación y análisis por ICP fueron descritos por Caballero-Martínez (1999a, 1999b). En este trabajo solamente se utilizaron los resultados publicados por el Servicio Geológico Mexicano (<https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/> Fecha de consulta, octubre de 2017).

5. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del análisis geoestadístico de los elementos tóxicos en los suelos (As, Cd, Cr y Pb), así como su distribución espacial y las implicaciones de su origen.

5.1 Análisis geoestadístico

Se analizó la información del (SGM, 1999) y se cotejó con las Concentraciones de Referencia Totales (CRT) por tipo de uso de suelo establecidas en la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006) (Tabla II). Se verificó el número de muestras que sobrepasan las CRT, así como el porcentaje comparado con el total, la moda y el número de veces que se repite la moda para cada elemento, para analizar el comportamiento, distribución y posibles irregularidades en los datos. Dada las características de los datos (distribución no normal) se utilizó la mediana como medida de tendencia central para hacer el cálculo de la desviación estándar, al ser un estimador tolerante a la presencia de valores extremos. En la Tabla II, se observó que cuatro elementos (As, Cd, Cr y Pb) presentan muestras con concentraciones mayores a las CRT establecidas por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006).

A través de las concentraciones de las muestras objeto de este estudio y su ubicación, se realizaron modelos de iso-concentración a partir de un análisis geoestadístico. El objetivo fue realizar un modelo de distribución espacial de la posible área de influencia de los elementos utilizados en este trabajo y ver cómo están distribuidos en el área de estudio a partir de los valores definidos en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006) (Tabla II). De esta manera se pueden asociar con factores naturales y/o antropogénicos.

Para la realización de estos modelos, se requiere estimar concentraciones en puntos para los que no se tiene información (punto de estimación) (Figura 3), a partir de las concentraciones de los puntos para las que se tiene información (puntos muestreados). De esta manera, durante el proceso de interpolación, los puntos muestreados más cercanos a los puntos de estimación tienen mayor influencia sobre estos.

Tabla I. Síntesis de los trabajos realizados de geoquímica de suelos en el Estado de Zacatecas y su relación con la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006). La abreviatura NR significa No reportado. Por "Periferia" se entiende que es en los alrededores de los sitios de estudio. El asterisco a la derecha de la cita indica que el estudio presenta un modelo de distribución de los metales pesados.

Elemento	N	Min (ppm)	Max (ppm)	Media (ppm)	Me-diana (ppm)	Desviación Estándar (DE)	1CRT (ppm)	2CRT (ppm)	No. de muestras > 1CRT	% de muestras > 1CRT	Moda (ppm)	Repetición de la moda
As	334	1.90	893	26.60	9.96	91.03	22	260	64	19.20	1.90	43
Ba	334	24.94	786	201.60	182.54	98.78	5,400	67,000	0	0	100.30	2
Be	334	0.75	3	1.60	1.63	0.49	150	1,900	0	0	0.90	39
Cd	334	0.48	68	2.20	0.60	5.63	37	450	2	0.60	0.49	137
Cr	334	7.86	563	91.20	67.11	69.51	280	510	2	0.60	68.12	2
Ni	334	1	284	37.80	26.59	35.59	1,600	20,000	0	0	0.90	8
Ag	334	0.04	87	2.40	0.79	6.39	390	5,100	0	0	0.79	182
Pb	334	11.48	1,107	81.40	35.99	157.65	400	800	17	5.10	32.44	2
Se	334	59	39,000	1,155.80	69	4,415.39	390	5,100	62	18.60	69	232

La manera en que se determina la influencia de cada punto muestreado (factor de ponderación) para el cálculo de un punto de estimación, es lo que diferencia a los métodos de interpolación (Mayorga, 2012; Webster y Oliver, 2007).

El análisis geoestadístico se realizó con la herramienta Geostatistical Analyst de ArcGIS (ESRI 2003, 2010). Todos los modelos se elaboraron con el método Kriging ordinario, combinado con el modelo de semivariograma estable, diferenciándose cada modelo únicamente por la variación de algunos parámetros de acuerdo a las necesidades de cada uno.

En la elaboración de los modelos de distribución se utilizaron los parámetros mostrados en la Tabla III que son los valores obtenidos con la interpolación de cada elemento analizado. De manera general, la interpolación de los valores de concentración de metales pesados para los puntos de estimación obedece a la ecuación [1]:

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad \text{donde} \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad [1]$$

Donde $Z(s_0)$ es el valor de la concentración para el punto de estimación s_0 ; $Z(s_i)$ es el valor de la concentración para el i -ésimo punto muestreado s_i . A su vez λ_i es el factor de ponderación i -ésimo.

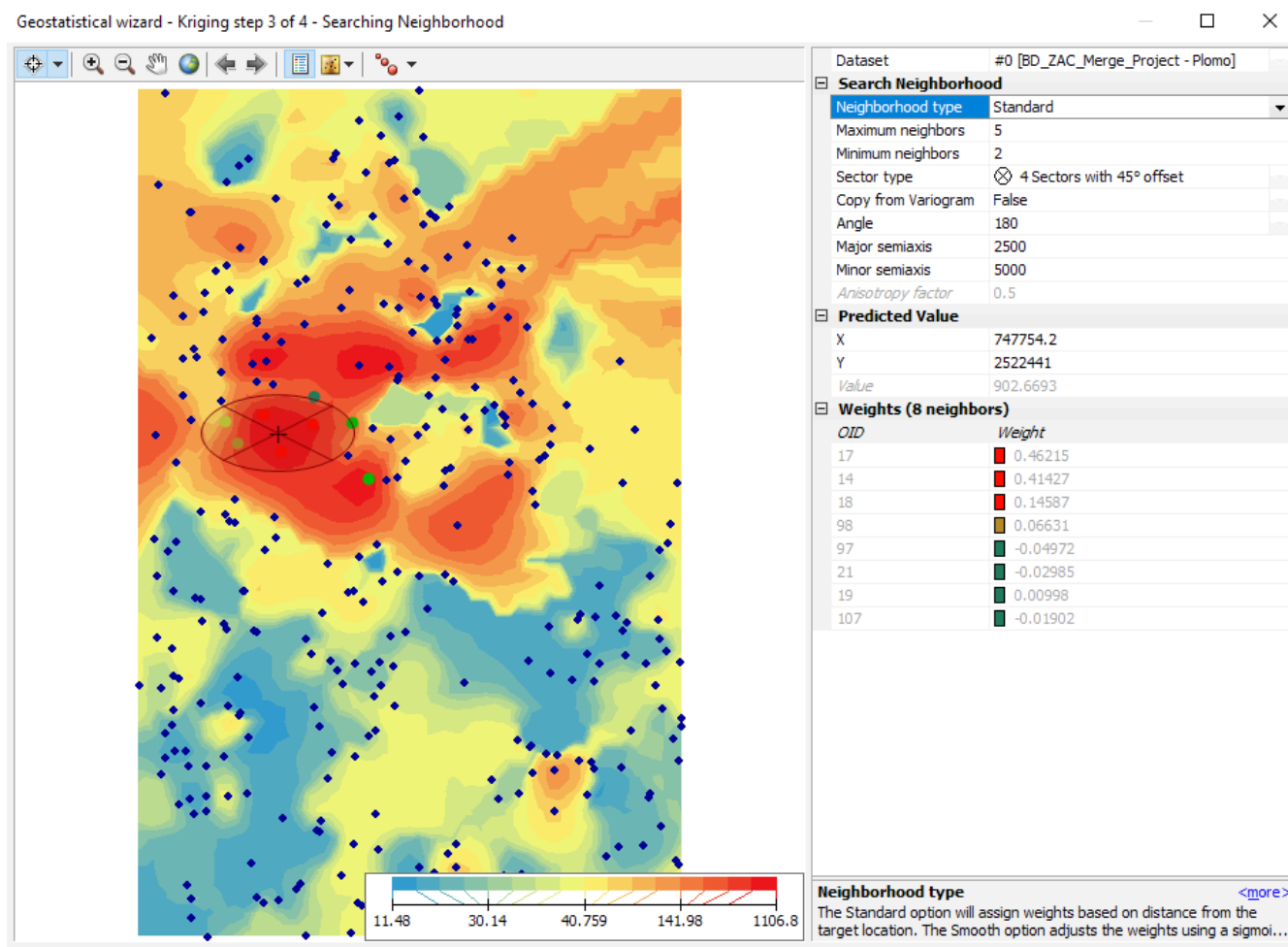


Figura 3. Parámetros para el cálculo de los puntos de estimación para modelar la distribución del plomo. Los puntos azules en el mapa son los sitios muestreados (SGM, 1999), la cruz es un punto de estimación, la elipse es el sector de búsqueda para ese punto, los puntos verdes, rojos y azul claro son los puntos utilizados para el cálculo del punto de estimación.

Tabla III. Parámetros de interpolación utilizados para cada elemento. El método de interpolación fue el de Kriging ordinario y semivariograma estable. El número mínimo de vecinos fue de dos y el máximo de cinco en cuatro sectores.

	Arsénico	Plomo
Eliminación de tendencia	Segundo orden	Ninguna
Tipo de sector	4 sectores	4 sectores con 45°
Eje vertical	11,450.060	2,500
Eje horizontal	11,450.060	50,000
Error medio (EM)	-0.736	-1.680
Error estándar medio (EEM)	-0.008	-0.005
Raíz cuadrada del error medio (RCM)	56.994	2.020

dado a cada punto muestreado s_i y N es el número de puntos muestreados que serán usados para calcular el punto de estimación. El cálculo del factor de ponderación λ obedece a la ecuación [2] que se deriva de la ecuación [3]:

$$\Gamma \begin{matrix} * \\ \lambda \end{matrix} = g \quad \text{ó} \quad \begin{pmatrix} \gamma_{11} & \dots & \gamma_{1N} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{N1} & \dots & \gamma_{NN} & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_N \\ m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{10} \\ \vdots \\ \gamma_{N0} \\ 1 \end{pmatrix} \quad [2]$$

Despejando λ de la ecuación [2] se tiene:

$$\lambda = \Gamma^{-1} * g \quad [3]$$

La matriz gama Γ contiene los valores del semivariograma modelado para cada par de puntos muestreados usados para calcular el punto de estimación, donde γ_{ij} es el valor del semivariograma modelado basado en el tipo modelo. El vector g contiene los valores del semivariograma modelado para cada punto muestreado y el punto de estimación.

Así pues, los valores γ_{ij} de la matriz Γ y los valores γ_{i0} del vector g se obtienen mediante la ecuación [4] para el método de semivariograma estable, ecuación [4].

$$\gamma(h, \theta) = \theta_s \left[1 - \exp \left(-3 \left(\frac{\|h\|}{\theta_r} \right)^{\theta_e} \right) \right] \quad \text{para todo } h \quad [4]$$

donde h es el vector formado por las coordenadas de cada pareja de puntos s_i y s_j , θ corresponde a los parámetros θ_s que corresponden al valor del sill o meseta y θ_r al valor del rango con $\theta_s \geq 0$ y $0 \leq \theta_e \leq 2$.

El método Kriging permite estimar la incertidumbre de interpolación, mostrando los errores generados por la variación del valor estimado con respecto al real. Los errores obtenidos son Error Medio (EM), Error Estándar Medio (EEM) y Raíz del Cuadrado del Error Medio (RCM). Lo que se busca en el caso del EM es un valor igual o lo más cercano a cero, ya que éste representa el promedio de las diferencias entre los valores estimados y los reales, por lo que, si se obtiene un valor mayor a cero, se estarían sobreestimando los valores que predijo, y, al obtener un resultado menor a cero, se subestimarían los valores de predicción. En cuanto al EEM, debe ser el valor más pequeño posible; el RCM, igual o lo más cercano a la unidad (Webster y Oliver, 2007) (Tabla III).

5.2 Comparación con la norma oficial mexicana

De los 28 elementos analizados en las cartas geoquímicas Zacatecas y Guadalupe (SGM, 1999) solamente ocho tienen completos sus análisis y, de ellos, solamente el arsénico, cadmio, cromo y plomo tienen valores superiores a las CR_T definidas en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006) (Fig. 4). El cromo y el cadmio sobrepasan las CR_T, aunque solamente en dos muestras (Figs. 4b y 4c).

La distribución espacial de las concentraciones de arsénico obtenida con el método de Kriging ordinario comparada con las CR_T recomendadas en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

(SEMARNAT, 2006) se muestra en la Fig. 5. Hay 60 muestras que tienen concentraciones mayores a las recomendadas en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para uso agrícola/residencial/comercial y 4 tienen concentraciones mayores a las recomendadas para uso industrial (Figura 4a). La concentración máxima de As es de 893 ppm (40 veces mayor a los 22 ppm establecidos en la norma para uso agrícola/residencial/comercial) (Tabla II). En el modelo (Figura 5) se observa que las concentraciones altas (> 22 ppm) están en la mitad norte de la zona de estudio. La distribución dada por este modelo muestra que las concentraciones por encima de los límites establecidos en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006)

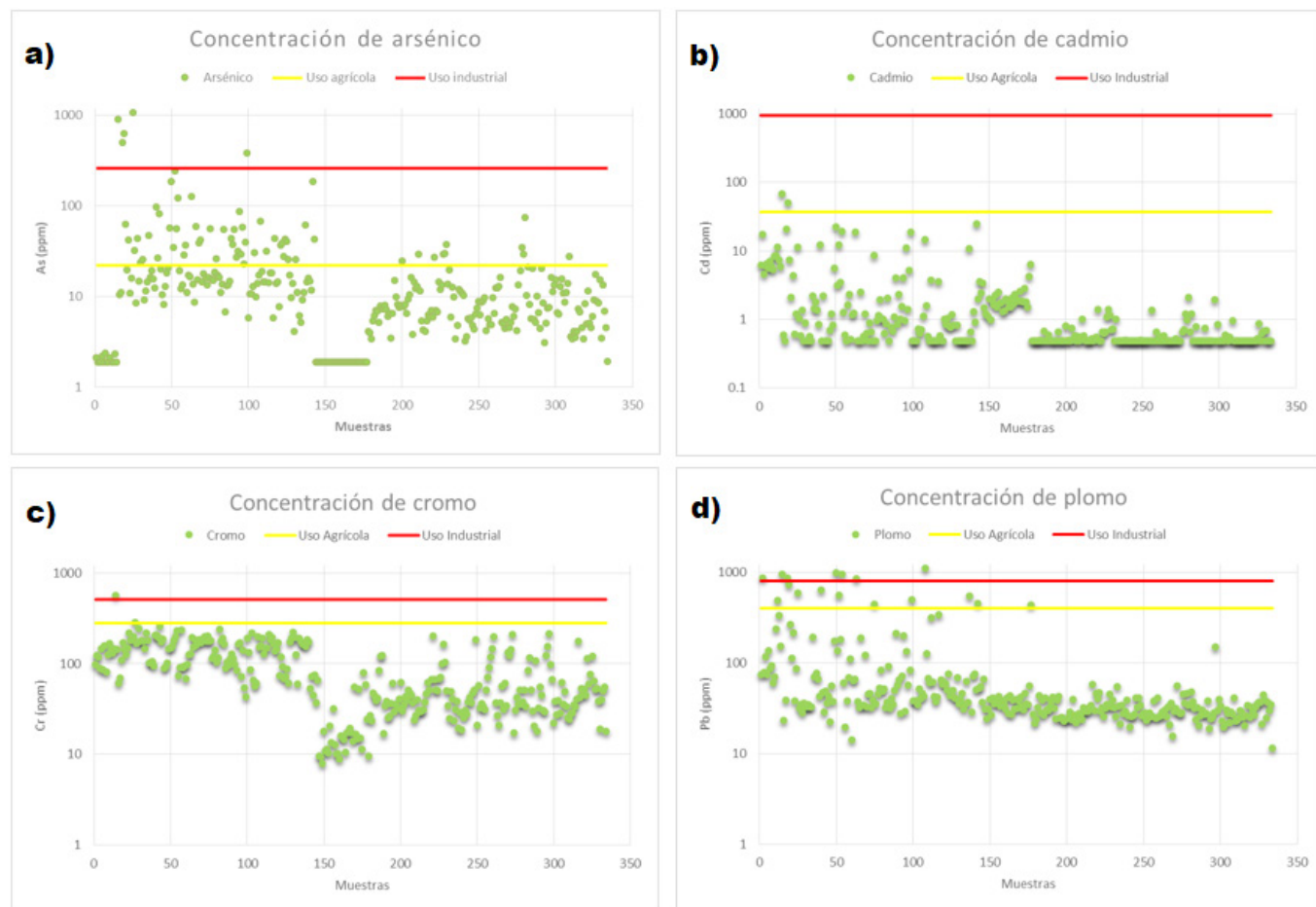


Figura 4. Dispersión de la concentración de los elementos que tienen muestras con valores superiores a los valores de CRT definidos por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006). La línea amarilla es el límite del uso agrícola/residencial/comercial y la roja es el límite para uso industrial.

para uso agrícola/residencial/comercial se encuentran en casi la totalidad de la ciudad de Zacatecas, parte de Guadalupe, Tacoaleche, San Antonio del Ciprés, Morelos, Zóquite, Hacienda Nueva, Saucedá de la Borda, Vetagrande y Pánuco. Las concentraciones más altas (> 260 ppm) se localizan desde la parte norte de la ciudad de Zacatecas hasta el sur de Hacienda Nueva, y coinciden con la localización de la mina Cozamin propiedad de Capstone Gold (Figura 5).

De las concentraciones de plomo analizadas en este trabajo, resultó que 10 muestras sobrepasaron las CRT recomendadas en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006) (Fig. 4d) para uso agrícola/residencial/comercial y 7 sobrepasaron los límites para uso industrial (Figura 4d). En el modelo de distribución del plomo (Figura 6) se observa que las concentraciones que exceden los límites de las CRT de acuerdo a lo establecido en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006)

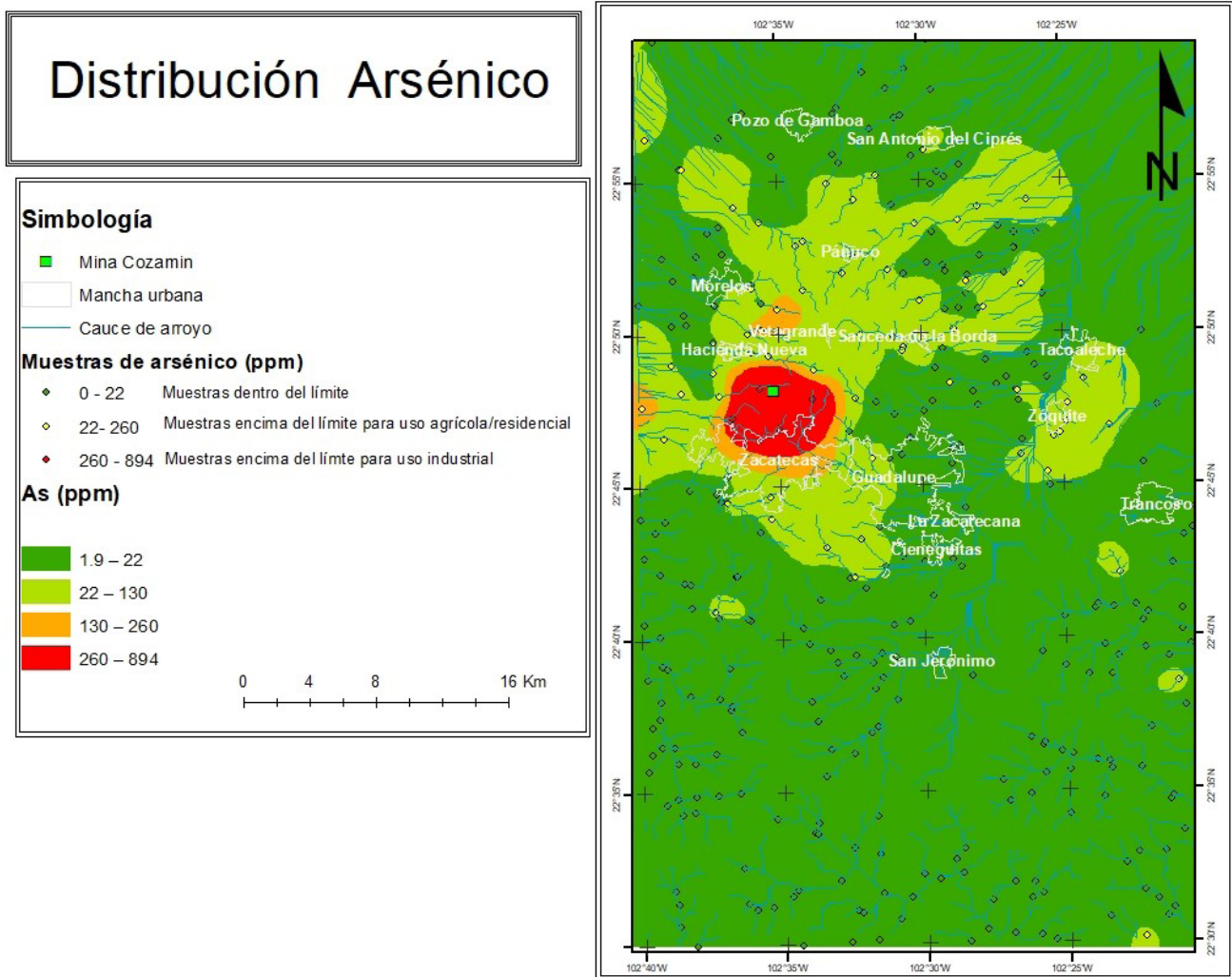


Figura 5. Modelo de distribución de Arsénico en la Sierra de Zacatecas, los puntos representan las muestras. Los parámetros de interpolación se muestran en la Tabla III. Las zonas en verde oscuro representan las zonas dentro de los límites, en verde claro y anaranjado las zonas que exceden los límites para uso agrícola/residencial/comercial y en rojo las zonas que exceden los límites para uso industrial establecidos en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006).

están en la mitad norte de la zona de estudio. El modelo de distribución del plomo (Figura 6) muestra tres zonas que contienen las mayores concentraciones: una está al norte de la ciudad de Zacatecas, otra en la ciudad de Guadalupe y la última entre Vetagrande y Saucedo de la Borda.

Se realizó un análisis para determinar el coeficiente de correlación de Pearson entre cada par de elementos, para determinar la relación que existe entre ellos. El coeficiente de correlación de Pearson es un valor entre -1 y 1 que indica la relación que existe entre dos

variables; si el valor es positivo se dice que existe una correlación positiva y si es negativo se dice que hay una correlación negativa; conforme el valor es más cercano a ± 1 la correlación de los valores es mejor y conforme es más cercano a 0 no hay correlación entre los datos (Cohen et al., 2003). En la Tabla IV se presentan los resultados del análisis de correlación entre los elementos objeto de este estudio, donde se encontró que existe una correlación positiva entre As-Cd-Pb y Cd-Pb. Esta correlación se debe a que el plomo está asociado con el As y Cd en la formación de yacimientos minerales.

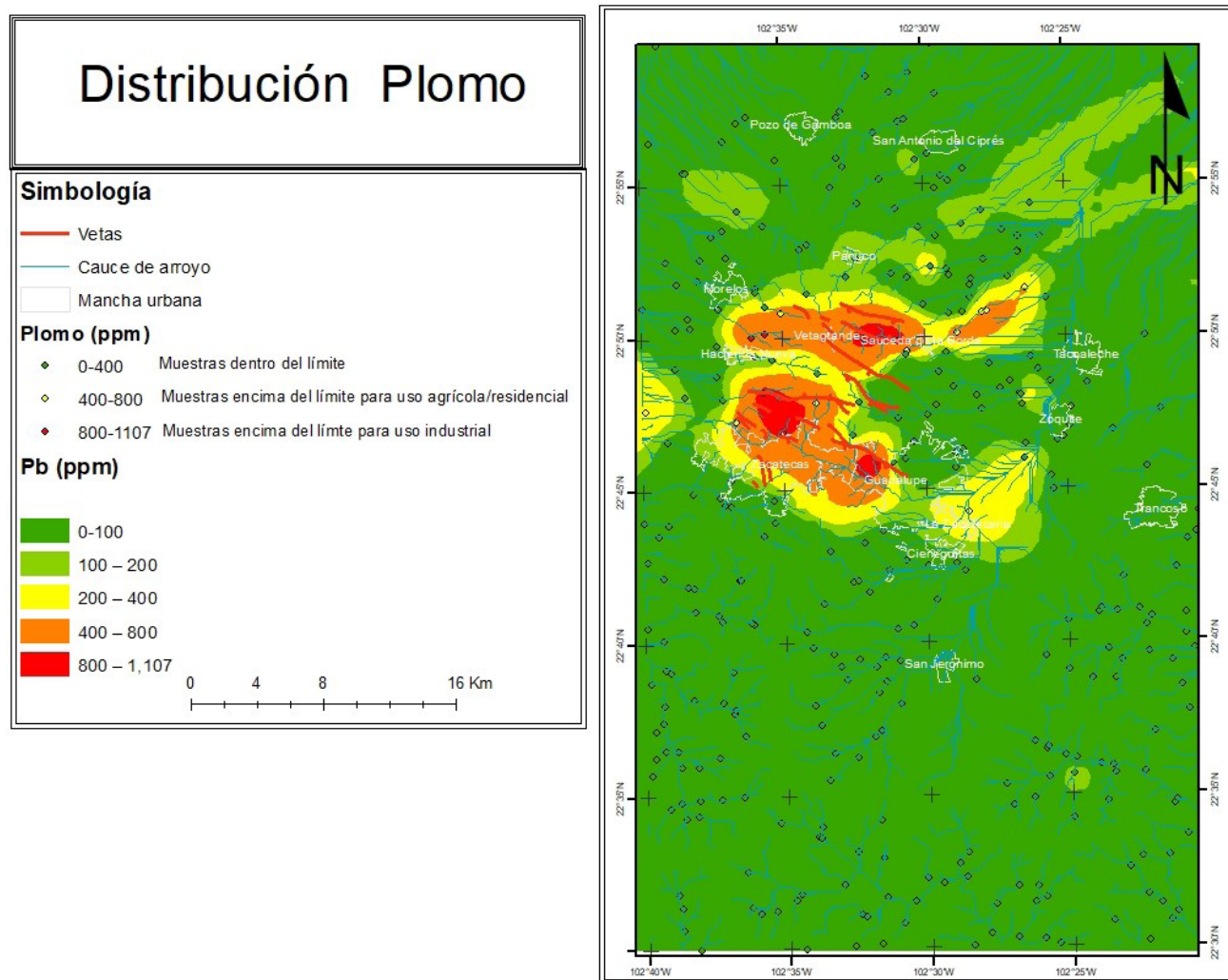


Figura 6. Modelo de distribución espacial del Plomo. La zona roja es la que rebasa el límite para uso de suelo industrial, y la zona de color naranja es la que rebasa el límite para el uso de suelo agrícola/residencial/comercial.

Tabla IV.- Tabla de correlación de concentración de elementos de 334 muestras de sedimento activo, en fondo amarillo se muestran las correlaciones más relevantes (> 0.5).

Elemento	As	Cd	Cr	Pb
As	1	0.889	0.152	0.648
Cd		1	0.174	0.805
Cr			1	0.264
Pb				1

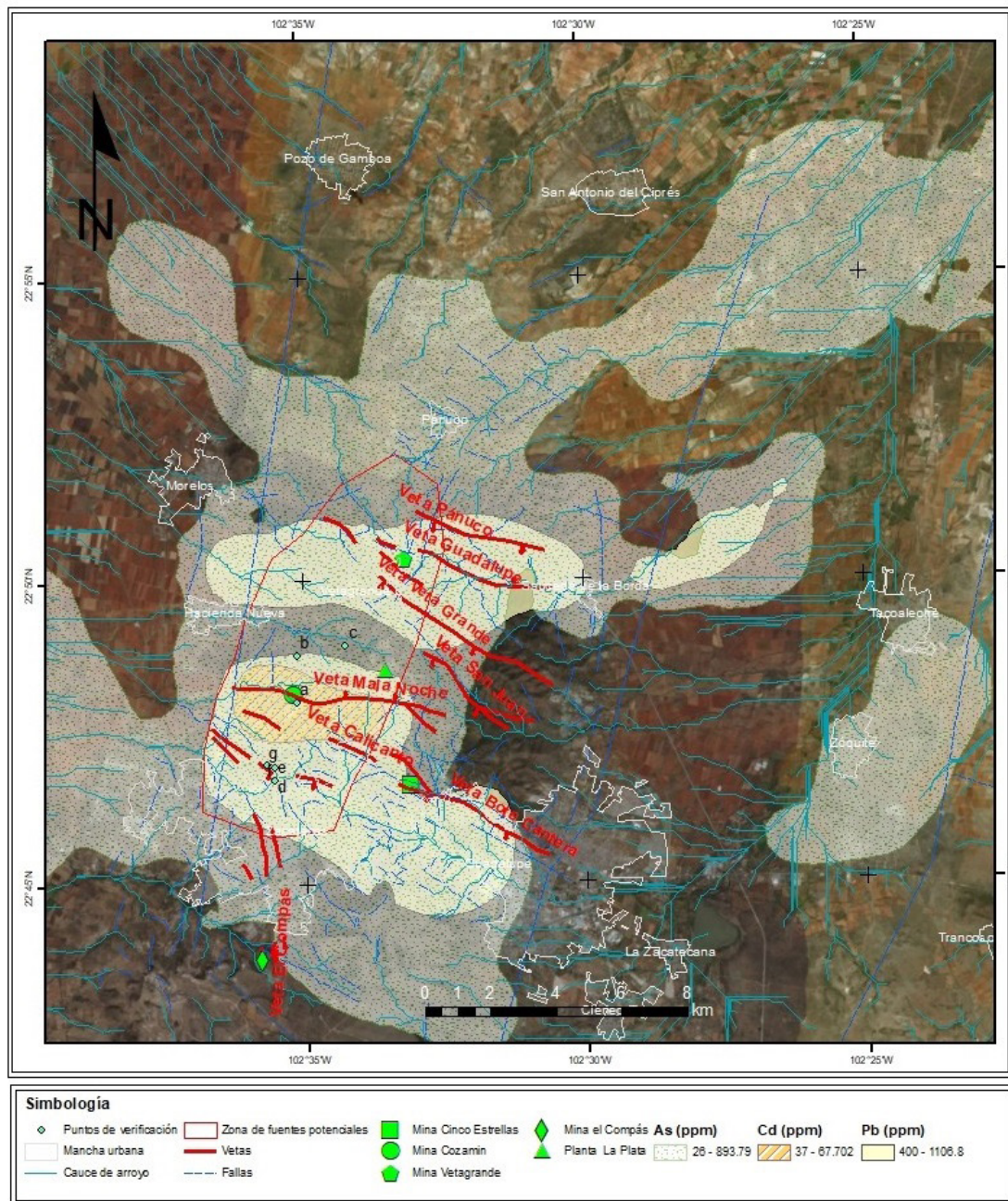


Figura 7. Plano de la zona de estudio con los principales objetos de interés para determinar las fuentes de contaminación (modificado de Bush et al., 2018).

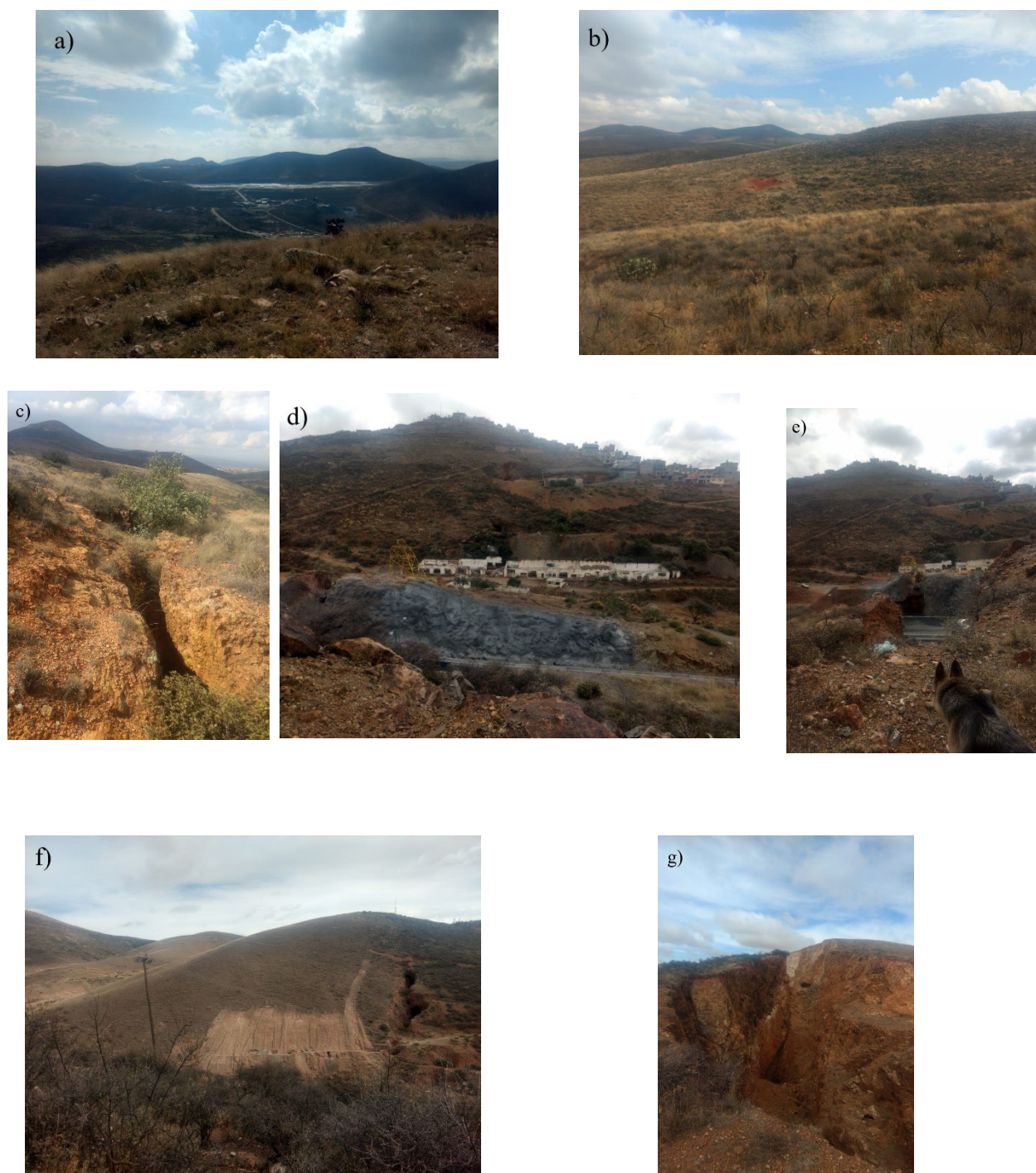


Figura 8. Sitios verificados en campo en donde hay altas concentraciones de metales pesados, los puntos “a” a “g” se muestran en la Figura 8 y el número entre paréntesis indica el sitio de verificación indicado en la Figura 2a: a) presa de jales de Cozamin (3); b) suelos oxidados y antiguas represas (7); c) veta minada (11); d) bancos de material y antiguas obras mineras (16), e) estructura minada y antiguas obras mineras; f) estructura minada y denudación; y g) estructura minada.

5.3 Distribución de los metales pesados

En la Figura 7 se muestran los resultados de los dos modelos (Figuras 5 y 6) correspondientes a los elementos con CR_T mayores a las establecidas en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006) y que tienen una correlación positiva (Tabla IV). La superficie que abarcan las concentraciones que superan las CR_T tiene un área de 395 km² para el As y para el Pb es de 84 km². En la Figura 7 se aprecia que la zona donde se observan concentraciones altas para los tres elementos (Cd, As y Pb) es la zona norte de la ciudad de Zacatecas, en los alrededores de la mina Cozamin (Figura 8a). En los alrededores de Vetagrande (Figuras 8b a 8g) también se observa un área con altas concentraciones para el As y Pb, en cuya parte central está la mina Veta Grande, propiedad de minera Santa Cruz. La Sierra de Zacatecas y valles adyacentes están en el distrito minero Zacatecas, cuyos yacimientos se caracterizan por vetas y cuerpos estratiformes y la mineralización se caracteriza por minerales de Ag, Pb, Zn y Cd (SGM, 2017). Basados en su orientación, edad y emplazamiento, las estructuras mineralizadas pueden ser divididas en tres tipos de sistemas de vetas: el sistema Ag-(Pb, Zn, Cu, Au), el sistema Au-Ag-(Se) y el sistema de vetas con contenidos de fluorita (Ponce y Clark, 1988). El sistema más largo y económicamente más importante es el sistema Ag-(Pb, Zn, Cu, Au) que tiene una orientación NW-SE. Este sistema ha sido explotado históricamente en los sistemas de vetas de Pánuco, Veta Grande, Mala Noche, Bote, La Cantera y San Rafael. Este sistema está formado por largas vetas con longitudes que varían de los 4 a los 16 km y un ancho que varía de 1 a 30 m (Bui y Giroux, 2017). En la actualidad existen cuatro minas que se encuentran activas y continúan con la explotación de yacimientos minerales con contenidos de oro, plata, cobre, plomo y zinc.

Se realizó una visita de campo para identificar posibles fuentes de contaminación e inferir

el origen de las altas concentraciones de metales pesados; así mismo, se visitó la zona comprendida entre la parte norte de la ciudad de Zacatecas y el sur de Hacienda Nueva, así como los alrededores de la cabecera municipal de Vetagrande, que fueron las zonas que mostraron mayor concentración de metales pesados en los modelos realizados (Figura 7). Se observó que esta zona está compuesta por tierras silvestres, sin indicios de actividad agrícola. En Vetagrande se encuentran la mina Veta Grande y su planta de procesamiento de mineral y presa de jales (Figura 8). Al sur de Vetagrande y sureste de Hacienda Nueva hay una planta procesadora de minerales denominada La Plata (Figura 7), propiedad de gobierno Estatal. En esta zona hay tiros de mina, bancos de materiales, construcciones en ruinas, afloramientos de rocas oxidadas, afloramiento de vetas previamente minadas; además de que en esta zona se localiza la mina Cozamin, propiedad actual de Capstone Gold con su respectiva planta de procesamiento de mineral y presa de jales (Figura 8a).

Discusión

La distribución de concentraciones de metales pesados se clasificó en tres tipos, tomando en cuenta su origen: natural, natural-antropogénico y antropogénico. Se considera una distribución de concentraciones de origen natural cuando los elementos potencialmente tóxicos (EPT) son característicos de la región, es decir, los EPT se encuentran presentes en la litología, suelo y estructuras geológicas de la zona y su distribución espacial depende únicamente de los procesos geológicos asociados con el intemperismo y la erosión, así como agentes como la flora y la fauna de la región. La distribución de depósitos de oro de placer es un ejemplo de esa distribución, ya que obedece a un depósito mineral cuya distribución fue controlada principalmente por la erosión hídrica. La distribución de concentraciones de origen natural-antropogénico es aquella en que la distribución espacial de los EPT no

sólo depende de la dispersión ocasionada por procesos geológicos y naturales, sino que también es afectada por la intervención del hombre. Un ejemplo de esto es la explotación de recursos mineros, donde la extracción y procesamiento de minerales de interés acelera los procesos erosivos de manera selectiva, puesto que expone a la superficie elementos que, si bien son propios de la región, se encontraban en profundidades tales que los procesos erosivos tardarían millones de años en llegar a ellos. En cuanto al origen antropogénico se define como la distribución de concentraciones cuyos elementos no son originarios de la región, sino que son insertados al sistema por el hombre. Un ejemplo de esto es la distribución de mercurio en la Sierra de Zacatecas, elemento químico que en términos geológicos no es originario de la región y que fue traído de otras regiones para la recuperación de minerales económicos mediante el método de amalgamación (Olmos-Trujillo et al., 2013).

Los elementos As y Cd son usados en la fabricación de pesticidas y fertilizantes minerales (Martin y Griswold, 2009), por lo que la actividad agrícola podría ser una potencial fuente de altas concentraciones para estos elementos; sin embargo, en la visita realizada no se encontraron indicios de esta actividad en la zona con altas concentraciones, pero sí en el valle al oeste de Hacienda Nueva. Debido a que los modelos realizados en este trabajo no muestran altas concentraciones asociadas a la zona agrícola de la Sierra de Zacatecas, se descarta esta actividad como su posible fuente.

En la zona de estudio existen yacimientos minerales epitermales de baja sulfuración de cuyos minerales se extraen elementos como Au, Ag, Pb, Zn y Cu. En las Figuras 2 y 7, se aprecian las estructuras geológicas en las que están los minerales de interés económico, llamados mena (Au, Ag, Pb, Zn y Cu), que a su vez tienen minerales asociados que no son de interés económico y que se conocen como ganga. Los

minerales de ganga son parte del material que es extraído durante la explotación de las menas y que tienen pobre interés económico (As, Sb, Cd y Mg). La existencia de estructuras geológicas asociadas a concentraciones atípicas de metales pesados, específicamente a concentraciones de Pb, As y Cd en la Sierra de Zacatecas, indica que estos elementos son característicos de la región. Sin embargo, la distribución no corresponde a una distribución natural de los elementos por dos razones:

- 1) Existen estructuras con contenidos minerales en la Sierra de Zacatecas correspondientes a las vetas Pánuco (Figura 7) y las vetas San Juan y Veta Grande (Figuras 2 y 7) en zonas donde los modelos no muestran altas concentraciones de estos elementos.
- 2) Las zonas donde están establecidas plantas de procesamiento de minerales coinciden con las zonas que presentan mayores concentraciones de estos elementos según los modelos realizados, esto indica que los factores de dispersión son influenciados por la remoción y acumulación de residuos de minerales en presas de jales, después de ser procesados.

Los modelos realizados en este trabajo muestran una idea general de la distribución de metales pesados en la Sierra de Zacatecas y sus valles adyacentes. El análisis realizado determina que la actividad minera es una de las probables fuentes de altas concentraciones de los mismos; sin embargo, hay que tomar en cuenta que la densidad de muestreo es, en promedio, de una muestra por cada 5.7 km² y que las muestras no están equiespaciadas o formando una retícula. Resultaría idóneo un muestreo más detallado, para que los resultados obtenidos sean más precisos y se pueda conocer la distribución con mayor detalle. Otro aspecto a tomar en cuenta es que las muestras fueron tomadas en 1999, año en el cual la planta procesadora La Plata aun no existía y las compañías mineras Endeavour

Silver, Capstone Gold y Minera Santacruz que actualmente están presentes en la zona de estudio, aún no iniciaban actividades, siendo sólo la última la que mantiene un contrato con la minera local Contracuña. Debido a la fecha de toma de las muestras, este estudio no representa la condición actual del territorio, por lo que un remuestreo dará una idea del comportamiento de la distribución de las concentraciones y su movilidad ambiental.

Conclusiones

Con base en el análisis de los modelos realizados, la revisión bibliográfica, las visitas de campo y la identificación de zonas de interés, se mostró que la presencia de metales pesados está distribuida de forma irregular alrededor de las estructuras de rumbo NW-SE, que las concentraciones más altas se localizan en la mitad norte de la zona de estudio adyacentes a las principales estructuras geológicas mineralizadas que tienen también una tendencia preferente NW-SE. Los elementos cuyas concentraciones son superiores a lo establecido por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2006) son el arsénico, plomo y cadmio. Su concentración puede representar un riesgo para la salud de la población y de los ecosistemas ya que su distribución es de origen natural-antropogénico, relacionada con la explotación, transporte, proceso y acumulación de minerales producto del minado de estructuras geológicas mineralizadas en la Sierra de Zacatecas. En este trabajo se descartaron las actividades agrícolas como posibles fuentes de contaminación de As y Cd, al no haber evidencia de este tipo de prácticas en las zonas visitadas.

Agradecimientos

Los autores agradecen la corrección de estilo hecha por Azaret Zamudio que permitió mejorar la retórica y sintaxis del documento. Los

autores también agradecen el apoyo de la Dra. Patricia de Lira Gómez, Directora de la Unidad Académica de Ciencias de la Tierra de la UAZ, para la realización de este proyecto. Este trabajo forma parte del proyecto UAZ-2018-37580 bajo la responsabilidad de Felipe Escalona. Los autores agradecen las facilidades otorgadas por el Servicio Geológico Mexicano para utilizar los datos de las cartas geoquímicas Zacatecas y Guadalupe escala 1:50,000. Finalmente, el contenido de este documento fue mejorado con los comentarios y sugerencias hechos por Zayre Ivonne González Acevedo, Loic Peiffer, José García Elías y Luis Delgado.

Bibliografía

- Aranda-Gómez, J.J., Henry, C.D. y Luhr, J.F., 2000, Evolución tectonomagmática postpaleocénica de la Sierra Madre Occidental y la porción meridional de la provincial tectónica de Cuencas y Sierras, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 53, 59-71.
- Barboza-Gudino, J.R., Tristán-González, M. y Torres-Hernández, J.R., 1999, Tectonic setting of pre-Oxfordian units from central and northeastern Mexico: A review. In Bartolini, C., Wilson, J.L., Lawton, T.F. (eds.), Mesozoic Sedimentary and Tectonic History of North-Central Mexico: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Paper 340, 197-210.
- Bartolini, C., Lang, H., Cantú-Chapa, A. y Barboza-Gudiño, R., 2001, The Triassic Zacatecas Formation in central Mexico: Paleotectonic, paleogeographic, and paleobiogeographic implications. In Bartolini, C., Buffler, R.T., Cantú-Chapa, A. (eds.), The western Gulf of Mexico Basin: Tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems: American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Memoir, 75, 295-315.

- Bui, V.P. y Giroux, G.H., 2017, Technical Report Veta Grande Project Zacatecas State, Mexico. Vancouver, Canada, Santacruz Silver Mining Ltd., reporte técnico, 121 pp.
- Burckhardt, C., 1906, Sobre el descubrimiento del Triásico marino en Zacatecas. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 2, 43-45.
- Bush, G., Hardy, J., Kirkham, G., Martin, C., McLennan, V., Mohseni, P., Preciado, H., 2018, NI 43-101 Technical Report on the Cozamin Mine, Zacatecas, Mexico: Vancouver, Capstone Mining Corp., reporte técnico, 170 pp.
- Caballero-Martínez, J.A., 1999a, Informe final complementario a la cartografía geológico minera y geoquímica escala 1:50 000 carta Zacatecas, clave F13-B58 Estado de Zacatecas: Zacatecas, Zacatecas. Consejo de Recursos Minerales (CRM), Subdirección de Infraestructura Geológico-Minera, Informe final, 121 pp.
- Caballero-Martínez, J.A., 1999b, Informe final complementario a la cartografía geológico minera y geoquímica escala 1: 50 000 carta Guadalupe, clave F13-B68 Estado de Zacatecas: Zacatecas, Zacatecas. Consejo de Recursos Minerales (CRM), Subdirección de Infraestructura Geológico-Minera, Informe final, 71 pp.
- Carrillo-González, R. y González-Chávez, M., 2006, Metal accumulation in wild plants surrounding mining wastes. Environmental Pollution, 144, 84-92.
- Centeno-García, E. y Silva-Romo, G., 1997, Petrogenesis and tectonic evolution of central Mexico during Triassic-Jurassic time. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 14, 244-260.
- Cohen, J., Cohen, P., West. S.G. y Aiken, L.S., 2003, Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences. Mahwah, N.J. y Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, third edition, 736 pp.
- Consejo de Recursos Minerales (CRM), 1991, Monografía geológico-minera del Estado de Zacatecas. Pachuca, Hidalgo, Consejo de Recursos Minerales, informe, 154 pp.
- Environmental Protection Agency (EPA), 1993, Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge; Final Rules. USA, Environmental Protection Agency, Federal Register II 40 CFR Part 257, reglas y regulaciones, 176 pp.
- Environmental System Research Institute (ESRI), 2003, ArcGIS 9 Using ArcGIS Geostatistical Analyst. USA, Environmental System Research, tutorial, 300 pp.
- Environmental System Research Institute (ESRI), 2010, Geostatistical Analyst Tutorial. Environmental System Research Institute, tutorial, 57 pp.
- Escalona-Alcázar, F.J., Suárez-Plascencia, C., Pérez-Román, A.M., Ortiz-Acevedo, O. y Bañuelos-Álvarez, C., 2003, La secuencia volcánica Terciaria del Cerro La Virgen y los procesos geomorfológicos que generan riesgo en la zona conurbada Zacatecas-Guadalupe. GEOS, 23(1), 2-16.
- Escalona-Alcázar, F.J., Delgado-Argote, L.A., Weber, B., Núñez-Peña, E.P., Valencia, V.A. y Ortiz-Acevedo, O., 2009, Kinematics and U-Pb dating of detrital zircons from the Sierra de Zacatecas, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 26, 48-64.

- Escalona-Alcázar, F.J., Delgado-Argote, L.A., Nebel, O., Velasco-Tapia, F., Weber, B. y Núñez-Peña, E.P., 2014, Maturing Arc Signatures Monitored by Trace Element and Hf Isotope Systematics in the Early Cretaceous Zacatecas Volcanic Field, Mexico. *The Journal of Geology*, 122, 549-566.
- Escalona-Alcázar, F.J., Solari, L., García y Barragán, J.C., Carrillo-Castillo, C., Bluhm-Gutiérrez, J., García-Sandoval, P., Nieto-Samaniego, Á.F. y Núñez-Peña, E.P., 2016, The Palaeocene-early Oligocene Zacatecas conglomerate, México: sedimentology, detrital zircon U-Pb ages, and sandstone provenance. *International Geology Review*, 58, 826-848.
- González-Manrique, S., 2012, Determinación y movilidad de metales tóxicos en residuos del proceso de recuperación de restos mineros (jales) de Zacatecas (México). Valladolid, España, Universidad de Valladolid, trabajo fin de máster, 93 pp.
- Gutiérrez-Amador, A., 1908, Las capas Cárnicas de Zacatecas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, IV, 28-35.
- Hansen, E., Lassen, C., Stuer-Lauridsen, F. y Kjølholt, J., 2002, Heavy Metals in Waste. Denmark, European Commission Environment Directorate General, Final Report, 83 pp.
- Hutton, M. y de Meeûs, C., 2001, Analysis and conclusions from Member States assessment of the risk to health and the environment from cadmium in fertilizers. London, UK, European Commission Enterprise and Industry Directorate General, Final Report, 66 pp.
- Koptsik, S., Koptsik, G., Livantsova, S., Eruslankina, L., Zhmelkova, T. y Vologdina, Z., 2003, Heavy metals in soils near the nickel smelter: chemistry, spatial variation, and impacts on plant diversity. *Journal of Environmental Monitoring*, 5(3), 441-450.
- Lin, Y., Teng, T. y Chang, T., 2002, Multivariate analysis of soil heavy metal pollution and landscape pattern in Changhua county in Taiwan. *Landscape Urban Plan*, 62(1), 19-35.
- Løkke, H., Bak, J., Falkengren-Grerup, U., Finlay, R.D., Ilvesniemi, H., Nygaard, P.H. y Starr, M., 1996, Critical loads of acidic deposition for forest soils: is the current approach adequate? *Ambio*, 25(8), 510-516.
- Loza-Aguirre, I., Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A. e Iriondo, A., 2008, Relaciones estratigráfico-estructurales en la intersección del Sistema de Fallas San Luis-Teprehuanes y el graben de Aguascalientes, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25, 533-548.
- Manzanares-Acuña, E., Vega-Carrillo, H.R., Escobar-León, M.C., Letechipia-de León, C., Guzmán-Enríquez, L.J., Hernández-Dávila, V.M. y Salas-Luévano, M.A., 2005, Evaluación de Riesgos ambientales por plomo en la población de Vetagrande, Zacatecas. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad de Estudios Nucleares, Reporte final, 50 pp.
- Manzanares-Acuña, E., Vega-Carrillo, H.R., Salas-Luévano, M.Á., Hernández-Dávila, V.M., Letechipia-de León, C. y Bañuelos-Valenzuela, R., 2006, Niveles de plomo en la población de alto riesgo y su entorno en San Ignacio, Fresnillo, Zacatecas, México. *Salud Pública de México*, 48(3), 212-219.

- Martin, S. y Griswold, W., 2009, Human Health Effects of Heavy Metals. Environmental Science and Technology Briefs for Citizens, 1(15), 1-6.
- Mayorga, R., 2012, Evaluación de la contaminación por arsénico y metales pesados en el Distrito Minero de Fresnillo (Zacatecas, México): Fresnillo, Zacatecas, México. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, tesis de maestría, 161 pp.
- McGehee, R.V., 1976, Las rocas metamórficas del Arroyo de la Pimienta, Zacatecas., Zac.. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 37, 1-10.
- Mireles, F., Dávila, J., Pinedo, J., Reyes, E., Speakman, R. y Glascock, M., 2012, Assessing urban soil pollution in the cities of Zacatecas and Guadalupe, Mexico by instrumental neutron activation analysis. Microchemical Journal, 103, 158-164.
- Monod, O. y Calvet, P., 1992, Structural and stratigraphic re-interpretation of the Triassic units near Zacatecas (Zac.), Central Mexico: Evidence of a Laramide nappe pile. Zentralblatt für Geologie und Palaöntologie Teil, 6, 1533-1544.
- Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A. y Camprubí Í Cano, A., 2005, La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica Cenozoica. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 57, 285-318.
- Olmos-Trujillo, S., Bluhm-Gutiérrez, J., Escalona-Alcázar, F.J. y Núñez-Peña, E.P., 2013. Reseña histórica y situación actual de la minería en Zacatecas; aspectos sociales, económicos y ambientales. Segundo Congreso Latinoamericano de Ciencias Sociales "Las crisis en América Latina, diferentes perspectivas y posibles soluciones", p. 1-14.
- Ortega-Flores, B., Solari, L.A. y Escalona-Alcázar, F.J., 2016, The Mesozoic successions of western Sierra de Zacatecas, Central Mexico provenance and tectonic implications. Geological Magazine, 153(4), 696-717.
- Ortega-Martínez, E., 2016, Análisis petrográfico y geoquímico de la secuencia Mesozoica del arco de islas del Cretácico Temprano en Pánuco y la parte NW de la Sierra Fría: Zacatecas. Universidad Autónoma de Zacatecas, Tesis de Licenciatura, 63 pp.
- Palumbo, B., Angelone, M., Bellanca, A., Dazzi, C., Hauser, S., Neri, R. y Wilson, J., 2000, Influence of inheritance and pedogenesis on heavy metal distribution in soils of Sicily, Italy. Geoderma, 95, 247-266.
- Ponce, B.F. y Clark, K.F., 1988, The Zacatecas Mining District: a Tertiary caldera complex associated with precious and base metal mineralization. Economic Geology, 83, 1668-1682.
- Ramírez-Ortiz, J. y Núñez, J., 2009, Study of Soil Contaminated with Arsenic, Cadmium and Lead in Ancient Tailings in Zacatecas, México. International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering, 3(3), 95-99.
- Ransom, W., Fernández, L.A., Simmons, J.W. y Enciso-de la Vega, S., 1982, Petrology of the metamorphic rocks of Zacatecas, Zac., México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 42, 37-59.
- Rodríguez, L.L., Hengl, T. y Reuter, H.I., 2008, Heavy metals in European soils: A geostatistical analysis of the FOREGS Geochemical database. Geoderma, 148, 189-199.

- Salemaa, M., Vanha-Majamaa, I. y Derome, J., 2001, Understorey vegetation along a heavy-metal pollution gradient in SW Finland. *Environmental Pollution*, 112(3), 339–350.
- Santos-Santos, E., Yarto-Ramírez, M., Gavilán-García, I., Castro-Díaz, J., Gavilán-García, A., Rosiles, R., Suárez, S. y López-Villegas, T., 2006, Analysis of Arsenic, Lead and Mercury in Farming Areas with Mining. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 50(2), 51-63.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2006, Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece criterios para las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Ciudad de México, Distrito Federal, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Norma Oficial Mexicana, 69 pp.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 1997, Carta Geológico-Minera Zacatecas clave F13-6, Escala 1:250,000. Pachuca, Hgo., México, Servicio Geológico Mexicano, 1 mapa.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 1999, Cartas Geoquímicas Zacatecas y Guadalupe claves F13-B58 y F13-B68 Escala. 1:50,000. Pachuca, Hgo., México, Servicio Geológico Mexicano, 2 mapas.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2017, Panorama Minero del Estado de Zacatecas: Zacatecas, Zacatecas. Secretaría de Economía, informe, 56 pp.
- Silva-Romo, G., Arellano-Gil, C., Mendoza-Rosales, C. y Nieto-Obregón, J., 2000, A submarine fan in the Mesa Central, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 13, 429-442.
- Tristán-González, M., Torres-Hernández, J. R., Labarthe-Hernández, G., Aguilón-Flores, A. e Yza-Guzmán, R., 2012, Control estructural para el emplazamiento de vetas y domos félsicos en el distrito minero de Zacatecas, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64, 353-367.
- Webster, R. y Oliver, M. A., 2007, *Geostatistics for Environmental Scientists*. London, UK, John Wiley and Sons, Ltd., 315 pp.

Recibido: 23 de enero de 2019

Corregido por el autor: 22 de noviembre de 2019

Aceptación: 2 de diciembre de 2019