Evaluación de la contaminación y riesgo ecológico por elementos tóxicos en suelos mineros

Mario Lerín Fernández[1], Edmundo Escareño-Juárez[2], Estefanía Conde Vilda[1], Minerva Nathalie Escareño-Becerra[2] y Ana Barrado Olmedo[1]

[1]Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
[2]Universidad Autónoma de Zacatecas (México)

INTRODUCCIÓN

Cinco siglos de minería de plata han dejado extensos residuos metalíferos (jales) en torno a la ciudad de Zacatecas, México. Los elementos potencialmente tóxicos no son biodegradables: se acumulan en el suelo y se redistribuyen por el viento, la escorrentía y la cadena trófica, con riesgos para los ecosistemas y la salud humana. Sin embargo, la estructura espacial, la severidad y las fuentes de esta contaminación siguen poco cuantificadas.

Objetivo: cuantificar Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As y Pb en suelos de cuatro áreas con distinta influencia minera, graduar su contaminación y riesgo ecológico, e identificar sus fuentes.

MATERIALES Y MÉTODOS

- **Muestreo:** 40 suelos superficiales (0–20 cm), 10 por área: A1 jales de El Bote, A2 Vetagrande, A3 Ecoparque Centenario y A4 El Pedernalillo (Fig. 1); posiciones GPS (WGS84).
- **Análisis:** secado al aire, homogeneización y tamizado (UAZ); digestión por microondas con agua regia y determinación por Q-ICP-MS (iCAP Q, Thermo Fisher) en el CIEMAT; pH en H_2O y en $CaCl_2$ 0.01 M.
- **Índices:** geoacumulación (I_{geo}) frente a la Corteza Continental Superior (Rudnick y Gao, 2014), factor de contaminación, índice de carga contaminante (PLI) y riesgo ecológico potencial de Håkanson (RI).
- **Fuentes y normativa:** correlación de Spearman, ACP (bootstrap, 2000 remuestreos), agrupamiento jerárquico (Ward) y comparación con la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

40 suelos superficiales | **7** elementos traza | **4** áreas de estudio | **40/40** superan el límite de As

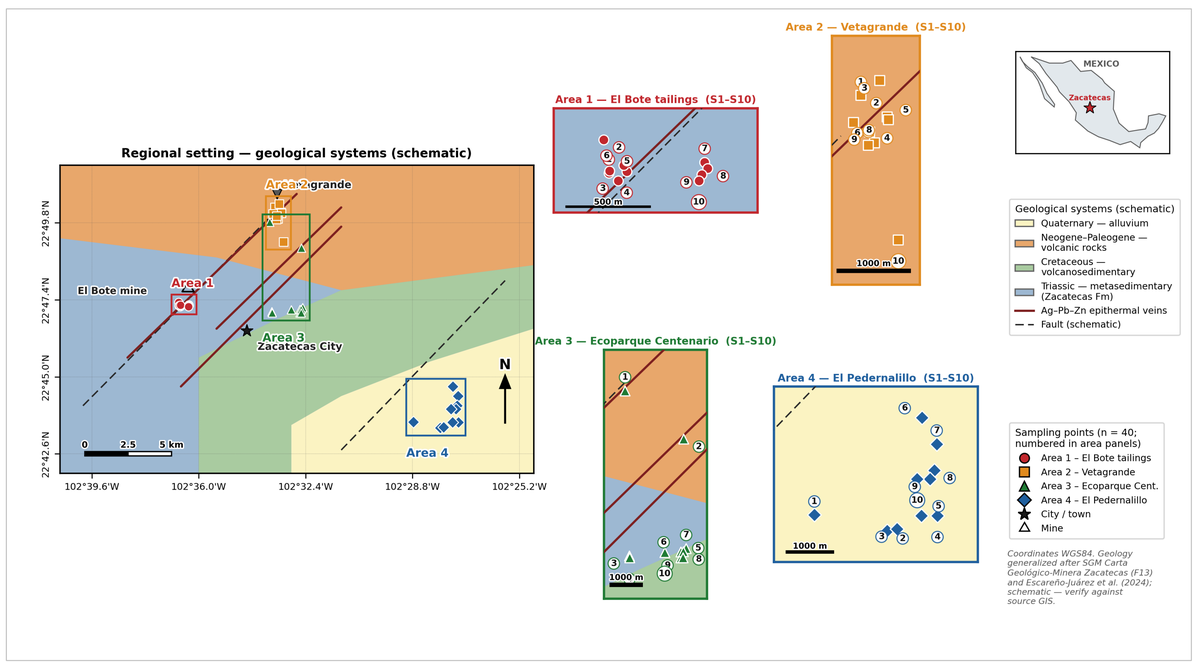


Fig. 1. Áreas de estudio y los 40 puntos de muestreo en el marco geológico del distrito minero de Zacatecas (geología generalizada del SGM, Carta F13; coordenadas WGS84).

CONCLUSIONES

1. La contaminación es severa y específica por elemento: Pb, As, Zn y Cu muestran una geoacumulación extrema de origen minero, mientras que Cr, Ni y Co reflejan el fondo litogénico.
2. Los jales de El Bote son el objetivo prioritario de intervención (PLI 33; RI 6938); su acidez exige una estabilización orientada al pH.
3. As y Pb concentran el 89 % del riesgo ecológico y deben ser objetivos explícitos del monitoreo y la remediación.
4. Ningún suelo cumple el límite de As de la NOM-147: sin remediación no son aptos para uso residencial o agrícola. El marco I_{geo}–RI–ACP es reproducible y transferible a otras regiones mineras

RESULTADOS

- **Contaminación extrema:** I_{geo} medio Pb (5.65) > As (5.44) > Zn (4.93) > Cu (4.46) > Ni (1.82) > Co (1.78) > Cr (1.27); Pb, As, Zn y Cu alcanzan la clase más alta de Müller (Fig. 2a).
- **Punto crítico:** los jales de El Bote (A1) presentan PLI = 33 y RI = 6938, con hasta 9 510 mg kg^{-1} de Pb y 8 531 mg kg^{-1} de As. A1, A2 y A4 tienen riesgo ecológico «muy alto» y A3 «considerable» (Fig. 2b).
- **El arsénico gobierna el riesgo:** aporta el 67.2 % del RI total, seguido del plomo (22.0 %).
- **Fuentes:** el ACP separa un factor antropogénico polimetálico Cu–Zn–As–Pb (51.8 % de la varianza), ligado a las menas sulfuradas, de un factor litogénico Cr–Ni–Co (30.8 %).
- **Normativa y acidez:** los 40 suelos superan el límite de As de la NOM-147 (22 mg kg^{-1}); la acidez de A1 (pH 3.5–6.3) incrementa la movilidad de los metales (Fig. 3).

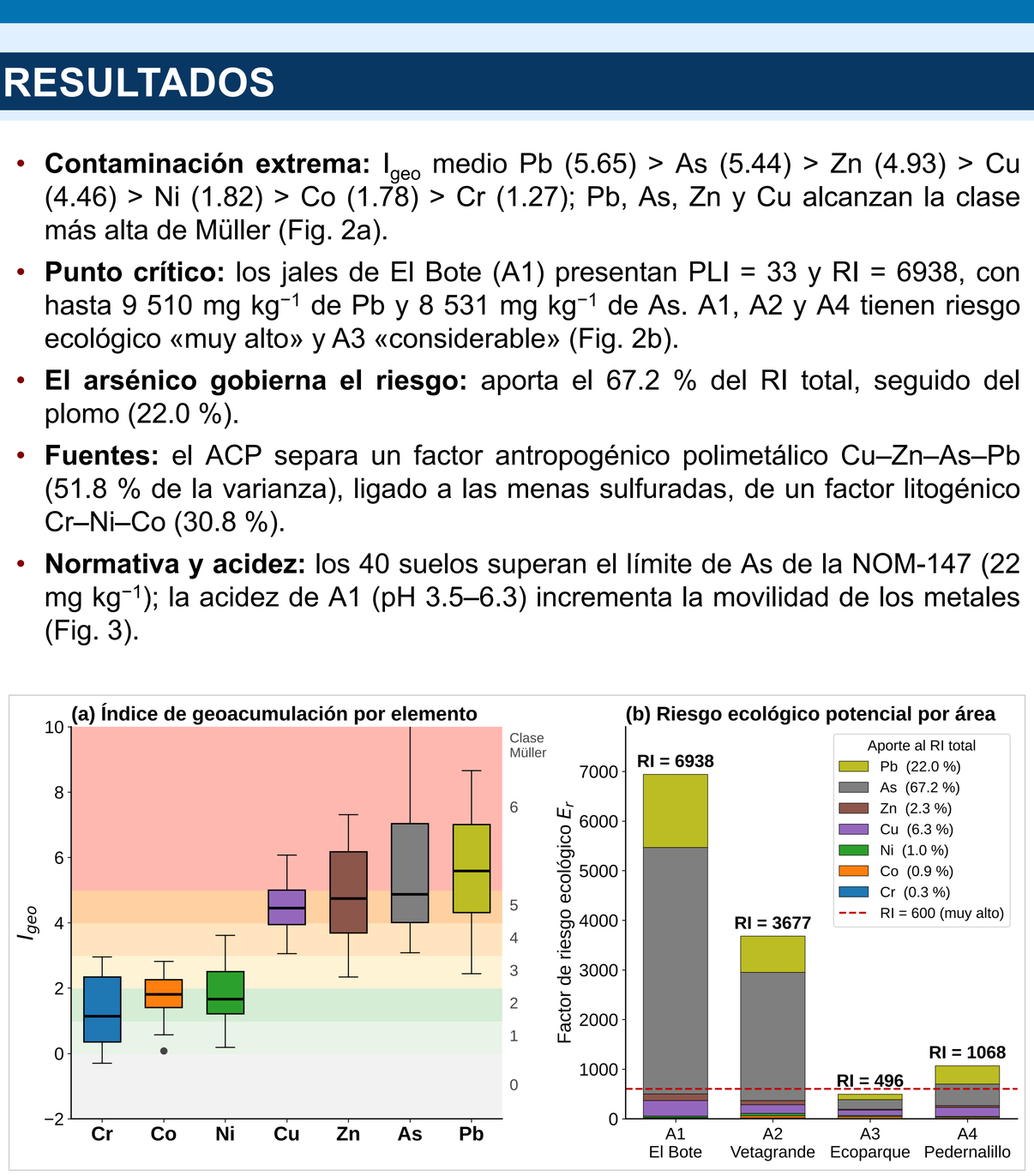


Fig. 2. (a) Índice de geoacumulación por elemento y clases de Müller; (b) factor de riesgo ecológico (E_r) acumulado por área y aporte de cada elemento al RI total.

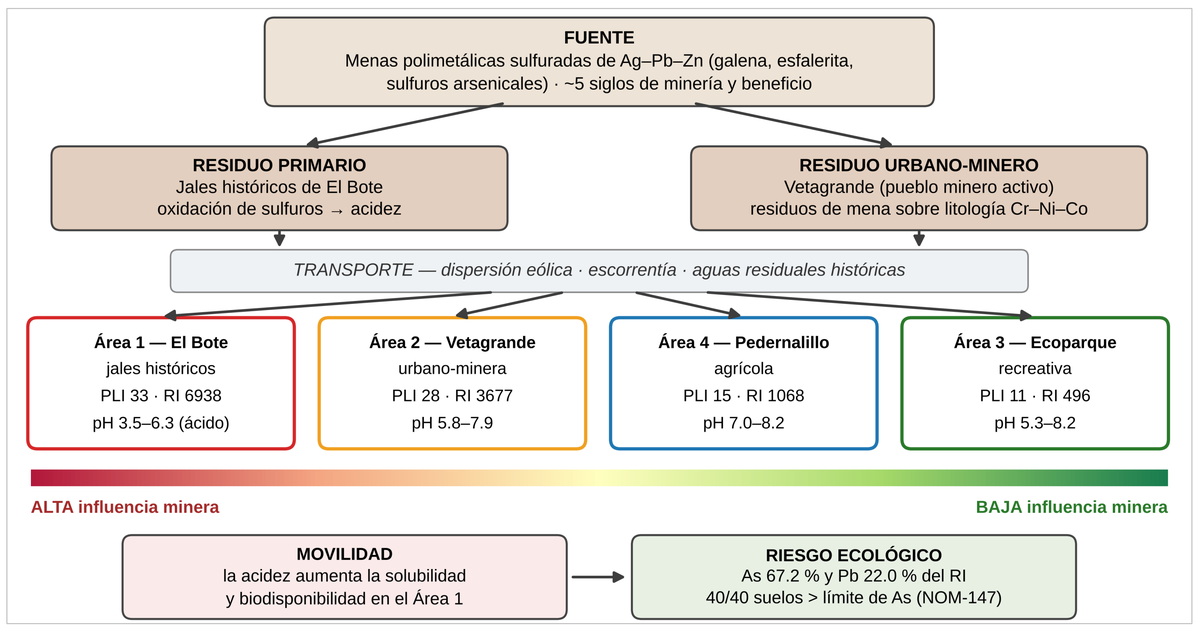


Fig. 3. Modelo conceptual del gradiente de influencia minera y de la cadena fuente → transporte → movilidad → riesgo.

BIBLIOGRAFÍA