



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Modelo geoestadístico de la distribución espacial de arsénico y plomo en la superficie de depósitos de relaves abandonados en la comuna de Andacollo, región de Coquimbo – Chile

Keyla Manuela Alencar da Silva Alves¹, María Carolina Parodi Dávila², Andrés Sepúlveda Peñaloza³, Erik Zimmermann⁴, Jessica Chacón⁵

¹Dra. en Geografía, Académica del Departamento de Industria, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica Metropolitana, Av. José Pedro Alessandri, 1242, CP: 7750000, Santiago (Chile), keyla.dasilva@utem.cl (autor correspondente). ²Ms. en Medio Ambiente, Académica del Departamento de Industria, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica Metropolitana, Av. José Pedro Alessandri, 1242, CP: 7750000, Santiago (Chile), cparodi@utem.cl. ³Dr. en Física, Académico del Departamento de Física, Facultad de Ciencias Naturales, Matemática y Medio Ambiente, Universidad Tecnológica Metropolitana, Av. José Pedro Alessandri, 1242, CP: 7750000, Santiago (Chile), andres.sepulveda@utem.cl. ⁴Dr. en Ciencias de la Ingeniería, Académico del Departamento de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Av. Pellegrini 250, Rosario, Argentina, CP 2000. erikz@fceia.unr.edu.ar. ⁵Ingeniera Industrial, Departamento de Industria, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica Metropolitana, Av. José Pedro Alessandri, 1242, CP: 7750000, Santiago (Chile), Jessica.chacons@utem.cl.

Artigo recebido em 27/09/2021 e aceito em 04/04/2022

RESUMEN

La comuna de Andacollo se localiza en la región de Coquimbo al norte de Chile. Posee una superficie de 310 km², y una demografía de 11.044 habitantes. De acuerdo con el Catastro Nacional de Relaves de 2020 del Servicio Nacional de Geología y Minería, existen en Chile un total de 743 depósitos de relave, de los cuales 105 están ubicados en Andacollo. De acuerdo con lo mencionado anteriormente, según el Ministerio de Minería se definen como un residuo, mezcla de mineral molido con agua y otros compuestos, que quedan como resultado de la extracción de minerales sulfurados en el proceso de flotación. En los relaves visitados durante las campañas a terreno realizadas en 2019 y 2020, se realizaron colectas de muestras de sedimentos, y se pudo evidenciar a través de mediciones realizadas con un equipo XRF portátil, que varias de las muestras colectadas contenían concentraciones de metales pesados sobre la normativa de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Las fuentes de contaminación, es decir los depósitos de relaves abandonados, se encuentran expuestos a la propagación en el medio ambiente a través de la dinámica de diversos factores físicos. Dada la relevancia de estos fenómenos, es imprescindible contar con un conocimiento preciso de la concentración y distribución de elementos potencialmente perjudiciales para la salud de la población. Por lo anteriormente expuesto, en este estudio se presenta un modelo geoestadístico de la distribución espacial de arsénico y plomo en la superficie de los depósitos de relaves abandonados en Andacollo.

Palabras-claves: geoestadística, contaminación, XRF, minería, relaves.

Geostatistical model of the spatial distribution of arsenic and lead on the surface of abandoned tailings in the Andacollo city, Coquimbo region - Chile

ABSTRACT

The commune of Andacollo is located in the Coquimbo region in northern Chile. It has an area of 310 km² and a population of 11,044 inhabitants. According to the National Tailings Cadastre 2020 of the National Geology and Mining Service, there are a total of 743 tailings in Chile, of which 105 are located in Andacollo. As mentioned above, according to the Ministry of Mining, tailings are defined as a residue, a mixture of ground ore with water and other compounds, left over from the extraction of sulfide minerals in the flotation process. In the tailings visited during the field campaigns conducted in 2019 and 2020, sediment samples were collected, and it was evident through measurements made with portable XRF equipment, that several of the samples collected contained concentrations of heavy metals above the United States Environmental Protection Agency regulations. The sources of contamination, that is abandoned tailings deposits, are exposed to propagation in the environment through the dynamics of various physical factors. Given the relevance of these phenomena, it is essential to have a precise knowledge of the concentration and distribution of elements potentially harmful to the health of the population. Therefore, this study presents a geostatistical model of the spatial distribution of arsenic and lead on the surface of abandoned tailings deposits in Andacollo.

Keywords: geostatistics, contamination, XRF, mining, tailings.

Introducción

La comuna de Andacollo se localiza en la provincia del Elqui, región de Coquimbo al norte de Chile. Su territorio comprende una superficie de 310 km², con altitud promedio de 1.033m y una demografía de 11.044 habitantes (Pacheco et al., 2020). De acuerdo con el Catastro Nacional de Relaves presentado en 2020 por el Servicio Nacional de Geología y Minería, existen en Chile un total de 743 depósitos de relave, de los cuales 105 están ubicados en Andacollo, encontrándose 18 de estos abandonados, 5 activos, 80 no activos y el resto sin identificar (SERNAGEOMIN, 2020).

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, la comuna de Andacollo se encuentra rodeada de relaves mineros, que según el Ministerio de Minería se definen como un residuo, mezcla de mineral molido con agua y otros compuestos, que quedan como resultado de la extracción de minerales sulfurados en el proceso de flotación. La hipótesis levantada por este estudio es que una zona con numerosos depósitos de relaves en estado de abandono podría presentar niveles de concentración de metales pesados que sobrepasan lo seguro para la salud humana. Esta hipótesis se plantea considerando la ley 20551/2011, donde los criterios presentados en dicha ley solos son aplicados a los depósitos de relaves que estén en estado activo o inactivo (a partir del año de publicación de la ley). De esta forma, todos los depósitos de relaves que fueron inactivos anterior a 2011 no están regulados por la ley mencionada anteriormente. Siendo estos pasivos ambientales un potencial riesgo para población circundante y al medio ambiente. Pues la mayoría de estos depósitos se encuentran en estado avanzado de deterioro físico y completa inestabilidad química (Alencar et al., 2021). Teniendo en cuenta la hipótesis planteada, fueron realizadas campañas a terreno en 2019 y 2020 en diversos depósitos de relaves abandonados. Se realizaron colectas de muestras de sedimentos de varios relaves de interés, y a través de mediciones realizadas con un equipo XRF portátil. De acuerdo con los resultados obtenidos se evidenció que varias de las muestras colectadas contenían concentraciones de metales pesados sobre la normativa de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA, 2006).

Los pasivos ambientales mineros, de este caso de estudio, es decir, los depósitos de relaves abandonados se encuentran expuestos a la propagación en el medio ambiente a través de diversos factores como: precipitaciones, aluviones, flujos, escorrentías, filtraciones, licuefacción

provocados por movimientos sísmicos o movimientos en masa (Kostaschuk et al., 2021; Liu et al., 2021; Rodríguez-Zapata y Ruiz-Agudelo, 2021; De Castro et al., 2022). Estos factores mencionados son condicionantes para el colapso de los mismos depósitos, así como también del transporte de material particulado por medio de la erosión eólica e hídrica (Cruzado-Tafur et al., 2021; Sun et al., 2021; Hancock y Willgoose, 2021; Luo et al., 2022; Rima y Beier, 2022; Wen et al., 2022). Todos estos factores influyen a que los depósitos de relaves provoquen un gran impacto ambiental en la contaminación de las aguas, la contaminación de los suelos, en la flora y fauna de la zona, además de comprometer la salud de la población de la comuna de Andacollo (Lam et al., 2021; Quispe-Jofré et al., 2021).

La comunidad científica internacional y diversas autoridades a nivel mundial han reconocido la importancia del suelo como un recurso natural esencial y han planteado la necesidad de establecer indicadores de calidad del suelo para conservar o mejorar la productividad de la tierra protegiendo al mismo tiempo la calidad ambiental y de los alimentos, la salud humana y animal (Fang, 2021; Hadoro et al., 2021; Albaladejo et al., 2021; Jam et al., 2021, Marques et al., 2021). La evaluación de la calidad de suelo partió con una primera fase en la cual se deben identificar los indicadores en base del conocimiento local y técnico y por los diferentes niveles críticos para un sitio específico (Morita et al., 2021; Shokr et al., 2021; AbdelRahman et al., 2021).

A la fecha, Chile no cuenta con normativas legales propias para la regulación y protección del suelo. Mismo presentando zonas contaminadas por residuos mineros, aun no existe una norma que regule en su totalidad la contaminación de suelos, principalmente en el norte de Chile, donde se concentra la mayor cantidad de zonas afectadas por la contaminación por metales pesados (Urbina et al., 2021; López-Berenguer et al., 2021; Bonnail et al., 2022) Esto se debe al vacío jurídico normativo existente respecto a recursos naturales, ya que los suelos corresponden a la única área en la que no existen regulaciones que orienten y aseguren el manejo sustentable del recurso. Es por esta razón que este estudio optó por aplicar la normativa de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA, 2006), para suelos desagregados.

La aplicación de métodos geoestadísticos es ampliamente utilizada para la zonificación de contaminantes en el suelo y en determinación de patrones de variabilidad de la distribución espacial de tales sustancias (Yan et al., 2019; John et al.,

2021). El uso de métodos geoestadísticos tales como los métodos Kriging Bayesiano Empírico permiten simular la distribución de metales pesados en el suelo, considerando que son variables no estacionarias y que son susceptibles a transportes y filtraciones (Varghese et al., 2018; Afu et al., 2019).

Los depósitos de relaves estudiados fueron seleccionados estratégicamente por su alta concentración de metales pesados, la cercanía a viviendas y escuelas, y ubicación en áreas inundables. Se seleccionaron 8 depósitos de relaves abandonados: 6 por estar ubicados en un área inundable y por su cercanía a viviendas (distancia inferior a 3 km): Arizona, Palmiras 1 y 2, Miraflores, Jeraldo 1 y Jeraldo 2; 2 relaves fueron seleccionados por su cercanía a escuelas y viviendas (distancia inferior a 3 km): Indeys 1, 2 y 3, y Bellavista (MMA, 2012).

El presente estudio tiene como objetivo caracterizar y mensurar la distribución espacial de las concentraciones de arsénico y plomo por medio de la aplicación del método geoestadístico Kriging Bayesiano Empírico. Las concentraciones de los metales pesados fueron obtenidas mediante mediciones realizadas con un equipo portátil de fluorescencia de rayos X (XRF) en muestras de sedimentos colectadas en la superficie de los 8 depósitos de relaves abandonados seleccionados.

Material y métodos

La metodología propuesta en este estudio fue dividida en tres etapas: 1. Diseño del muestreo,

métodos y procedimientos para la toma de muestras. 2. Método de cuantificación elemental de metales pesados por medio de fluorescencia rayo X (XRF). 3. Método geoestadístico Kriging Bayesiano Empírico para análisis de distribución espacial de metales pesados.

Ubicación del área de estudio

El área urbana de la comuna de Andacollo se encuentra instalada en el sector donde predominan las bajas pendientes, entre 2,9° a 10° de inclinación. La altimetría también es bastante homogénea, variando entre 1.016m hasta 1.100 m en el área urbana. Estos aspectos físicos del terreno corroboran con el diseño de una red de drenaje detrítica de baja inclinación, lo que hace con que, en períodos de activación de los cauces, estos presenten baja velocidad de transporte, demostrando tendencia a la acumulación de agua (crecidas e inundaciones) (Zamarreño et al., 2020).

Dada la configuración topográfica, Andacollo se encuentra en la depresión de la cuenca del Arrayan, donde se deposita el material arrastrado y se acumula el agua (Cabello, 2021). También, durante las visitas a los depósitos seleccionados, se pudo identificar otros procesos erosivos hídricos, tales como cárcavas y socavones, lo que indica susceptibilidad de ocurrencia de transporte de los sedimentos contaminados a zonas aledañas del terreno donde están instalados los depósitos de relave abandonados (Figura 1).

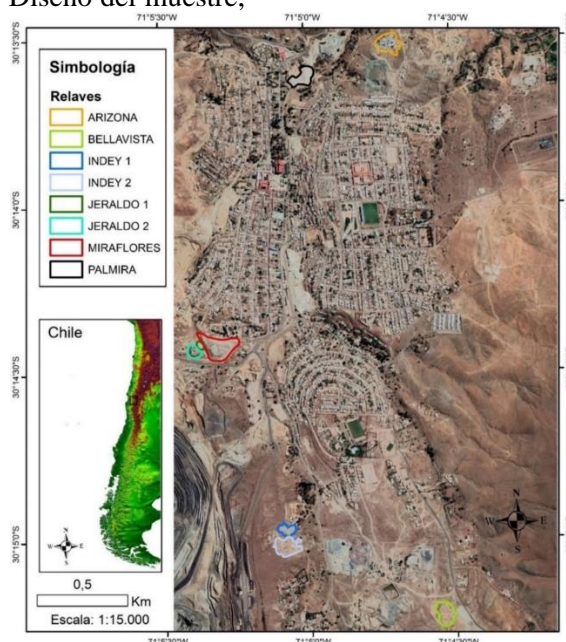


Figura 1. Ubicación geográfica de los depósitos de relave seleccionados para el estudio en el sector urbano de la comuna de Andacollo. Fuente: Elaboración propia.

Diseño del muestreo, métodos y procedimientos para la toma de muestras.

De acuerdo con el protocolo de toma de muestras establecido por el proyecto FONDEF ID18I10189, elaborado con base en la ISO 18400 y en el Protocolo de Seguridad para la Toma de Muestras en Depósitos de Relaves (SERNAGEOMIN), fueron colectadas muestras representativas de las superficies de los relaves seleccionados, aplicando el método sistemático no aleatorio. Fueron colectadas un total de 141 muestras a una profundidad promedio de 100 cm, con equidistancia entre puntos de colecta de 10 a 30 m. Fue aplicado el método de colorimetría de la Carta Munsell para complementar la caracterización de los sedimentos colectados.

Método de cuantificación elemental de metales pesados por medio de fluorescencia rayo X (XRF).

Los procedimientos presentados en esta etapa fueron realizados en su totalidad en el Laboratorio de Suelos y Medio Ambiente de la Universidad Tecnológica Metropolitana. Las muestras antes de ser sometidas al análisis elemental fueron procesadas cumpliendo las medidas de preparación establecidas por el Protocolo Tomas de Muestras de Suelo (SAG - CHILE) en cuanto a homogeneización, cuarteo y secado (el secado fue realizado en horno de secado a 60°C para no alterar la composición mineralógica de las muestras). Una vez preparadas, las muestras fueron tamizadas usando malla de 2mm y 250µm. El material pasante de la malla 250µm fue sometido a análisis elemental. Esta etapa de preparación de las muestras es fundamental para la obtención de resultados óptimos de medición, considerando que las muestras sólidas deben estar secas y homogenizadas, es decir todas las muestras deben tener partículas del mismo diámetro para que puedan ser comparables entre las mismas.

Los datos utilizados en la modelación geoestadística fueron obtenidos a partir del análisis elemental de las concentraciones másicas (en PPM) de las muestras, en particular, de las concentraciones de arsénico y plomo. En este proceso se utilizó un equipo XRF portátil marca Bruker, modelo S1 TITAN 600, que cuenta con un tubo de rayos X de 4W, que varía de 15 a 50kV, con un blanco de Rh y capacidad analítica para

cuantificar elementos desde el magnesio hasta el uranio (Hu et al., 2017; Caporale et al., 2018; Itabashi et al., 2019; Goff et al., 2020).

Fueron sometidas a medición con XRF las 141 muestras. Los valores elementales de las concentraciones másicas (en PPM) del arsénico y plomo de las muestras fueron calibrados utilizando los valores de las concentraciones de suelos de referencias mineralizados.

Las clasificaciones de los rangos de valores obtenidos a partir de la medición fueron determinadas como “en la norma” y “sobre la norma” de acuerdo con los criterios de contenidos máximos de metales pesados totales permitidos en suelos desagregados establecidos por la normativa de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA, 2006). Siendo los valores máximos establecidos por dicha norma: 40 ppm para arsénico y 400 ppm para plomo.

Método geoestadístico Kriging Bayesiano Empírico para análisis de distribución espacial de metales pesados

El método geoestadístico Kriging Bayesiano Empírico (*EBK, por sus siglas en inglés*) es un método de interpolación de tipo kriging, que tiene como ventaja la posibilidad de estimar múltiples variogramas. Esta técnica permite identificar el error introducido al estimar el modelo, evitando subestimación de errores estándares. Además, este método permite la interpolación de conjuntos de datos pequeños y de variables moderadamente no estacionarias, como metales pesados (arsénico y plomo) (Aelion, et al., 2009; Krivoruchko y Gribov, 2019; Gribov y Krivoruchko, 2020).

La modelación fue realizada utilizando la herramienta *Geoestatistical Analyst*, del software Arcgis 10 (Licenciado para la Universidad Tecnológica Metropolitana). Lo cual permite el ingreso de los parámetros necesarios para la ejecución del EBK, como también la creación y ajustes de los semivariogramas, entregando de esta manera resultado de la distribución espacial de los metales pesados en la superficie en los relaves estudiados. El método elegido para determinar el tipo de superficie de la salida fue el probabilístico. (Figura 2).

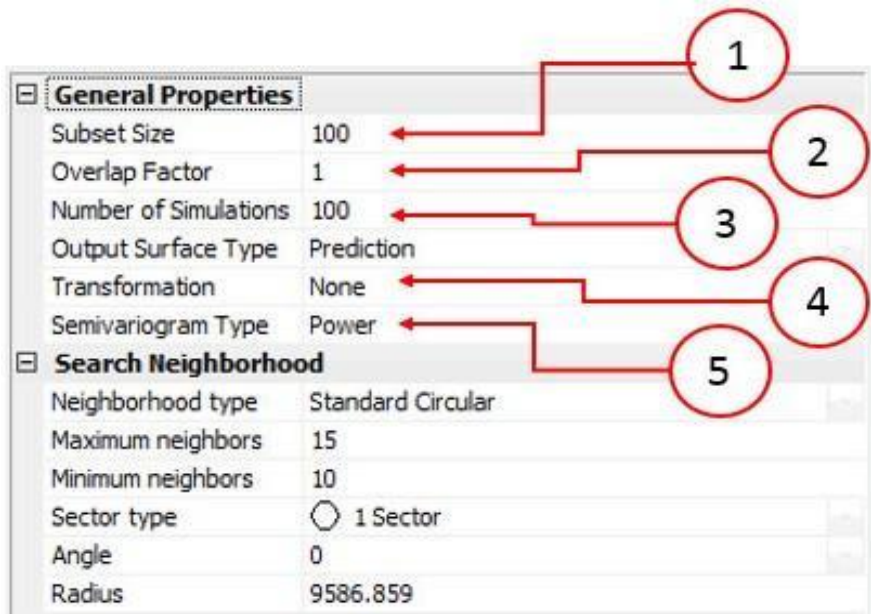


Figura 2. Parámetros de entrada de las propiedades del modelo geoestadístico EBK en software Arcgis 10. Fuente: elaboración propia.

- 1) Tamaño de subconjunto (Subset Size), especifica el número de datos que contendrá cada subconjunto.
- 2) Factor de superposición (Overlap Factor), permite controlar la superposición entre los subconjuntos.
- 3) Número de simulaciones (Number of Simulations), controla cuántos semivariogramas se simularán en cada subconjunto.
- 4) El Kriging bayesiano empírico ofrece la transformación (Normal Score Transformation) hacia una distribución gaussiana con las siguientes opciones: *Empirical* y *Log Empirical*

- 5) Permite ajustar el tipo de semivariograma (Semivariogram Type).

El proceso de validación cruzada es implementado por ArcGIS en los modelos geoestadísticos para estimar distintos errores de predicción, y así evaluar la variabilidad de la predicción. Este proceso de validación consiste en extraer un valor observado y predecirlo con los demás valores, una vez definido el valor extraído este es restablecido, este proceso se repite para cada valor observado. De las diferencias entre los valores observados y los valores preestablecidos se evalúan distintos errores de predicción, basados en las ecuaciones descritas:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i) \quad (1) \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (2) \quad ASE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma^2(y_i)} \quad (3)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i) / \sigma(y_i) \quad (4) \quad RMSSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(y_i - x_i) / \sigma(y_i)]^2} \quad (5)$$

Donde ME es el error medio (1), RMSE es el error cuadrático medio (2), ASE es el error estándar promedio (3), MSE es el error estándar estandarizado (4) y RMSSE es el error estándar cuadrático de raíz (5).

Resultados y discusiones

De acuerdo con las simulaciones geoestadísticas obtenidas por medio de la ejecución del método Kriging Bayesiano Empírico,

se presentan en secuencia los resultados de la distribución espacial de las concentraciones de arsénico y plomo correspondiente a cada uno de los depósitos de relaves abandonados seleccionados para el estudio (Li et al., 2022; Nath y Rafizul,

2022). Las concentraciones de arsénico y plomo son resultantes del análisis realizado por medio de medición con XRF (Li et al., 2022; Tibane y Mamba, 2022). Se define como valor significativo de concentración cualquier resultado superior a 0 ppm. Los resultados no significativos son aquellos donde no fue posible definir la concentración, ya sea porque el elemento no se encuentra presente o porque su concentración está por debajo de los límites de detección del equipo (LOD por sus siglas en inglés) por lo cual se presentarán en las tablas como <LOD (Bhatia, et al., 2021; Sharma et al., 2022).

Relave Arizona

El depósito Arizona es relativamente uniforme según la colorimetría (2.5Y 8/1) y diámetro de las partículas en la superficie. Este relave posee una superficie total de 11.348 m², los sedimentos superficiales son muy finos, aparentemente limos o arenas finas/muy finas de color blanco y gris claro. El material superficial hasta los 50 cm de profundidad presenta baja humedad y poca cohesión. Este depósito no presentaba registros de procesos erosivos laminares, tales como socavones. Fueron constatadas en la visita que este relave ha sido usado como refugio de personas en situación de calle. Fue muestreada un área total de 10.323 m², y fueron colectadas 22 muestras (Figura 3).

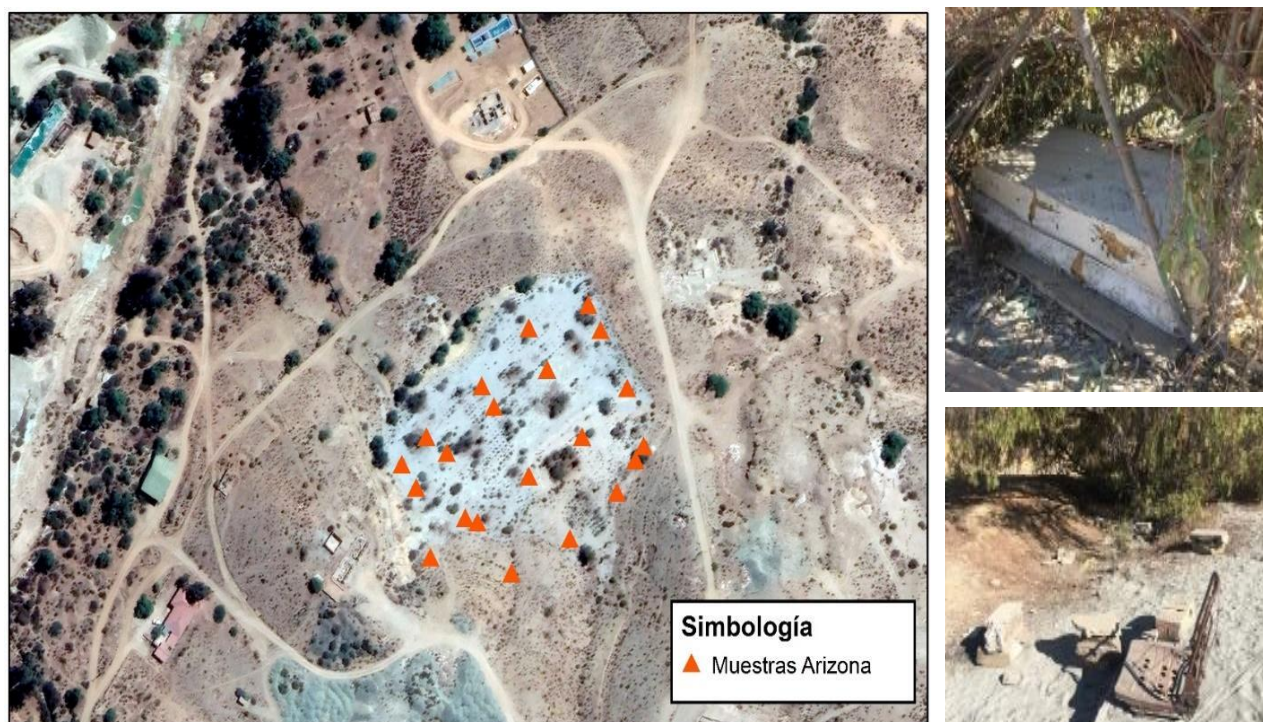


Figura 3. Vista de las muestras en la superficie del relave Arizona y fotografías del relave. Fuente: elaboración propia.

Las mediciones realizadas para identificar la concentración del plomo en las 22 muestras presentaron resultados demasiado bajos y no identificables en 18 de ellas. Lo que indica que la presencia del plomo en las 18 muestras no es un resultado significativo para la geoestadística. Solamente 4 muestras presentaron concentraciones significativas en ppm, pero el número de muestras fue insuficiente para realizar la geoestadística del plomo, ya que el modelo EBK exige un mínimo de 9 muestras para realizar la modelación espacial. Además, las 4 muestras que presentaron concentraciones de plomo contienen valores que están dentro de la normativa aplicada, no representando peligro de toxicidad.

Las mediciones para identificar las concentraciones de arsénico obtuvieron resultados significativos para todas las muestras analizadas en este relave. No obstante, del total de las 22 muestras analizadas, se observa que las más altas concentraciones de arsénico (superior o igual a 40 ppm) se encuentran en solamente 3 de las muestras (Tabla 1). De acuerdo con los resultados obtenidos del modelo geoestadístico de la distribución superficial probabilística, las muestras con concentraciones sobre la norma ocupan un área de 4.196 m², está área de mayor concentración de arsénico representa el 37% del área total del relave (Figura 4).

Tabla 1. Resultados de la medición con XRF y el error estándar asociado de las muestras del relave Arizona (concentraciones en ppm). Fuente: Elaboración propia.

Muestra	As	As Error estándar	Pb	Pb Error estándar	Muestra	As	As Error estándar	Pb	Pb Error estándar
A-21-22	13	3	< LOD	-	A-95	9	3	< LOD	-
A-85	23	4	< LOD	-	A-96	21	4	< LOD	-
A-86	8	3	< LOD	-	A-97	10	3	< LOD	-
A-87	11	2	9	7	A-98	13	3	< LOD	-
A-88	8	3	15	12	A-99	46	4	< LOD	-
A-89	24	3	< LOD	-	A-100	9	3	< LOD	-
A-90	15	3	< LOD	-	A-101	12	3	< LOD	-
A-91	12	3	< LOD	-	A-102	71	6	88	15
A-92	13	4	< LOD	-	A-103	51	5	39	14
A-93	9	3	< LOD	-	A-104	28	4	< LOD	-
A-94	9	3	< LOD	-					

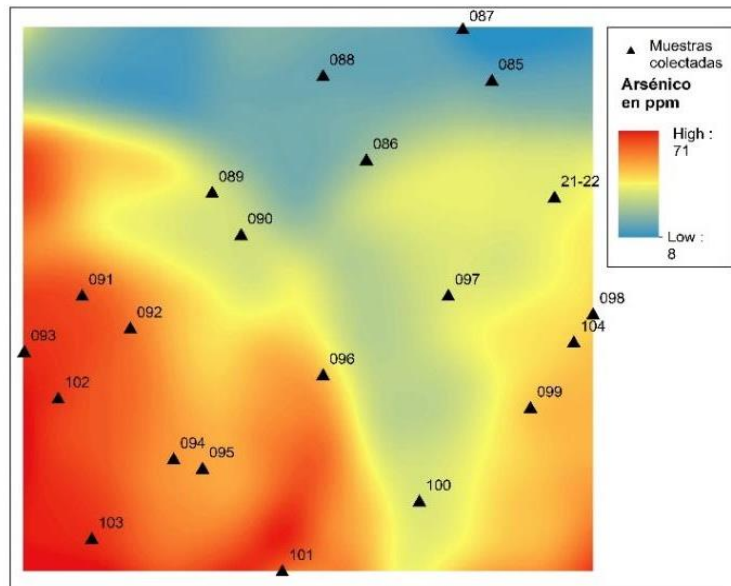


Figura 4. Distribución de las concentraciones arsénico en la superficie del relave Arizona. Fuente: Elaboración propia.

Relave Bellavista

Este relave presenta una gran cantidad de vegetación, que se caracterizaron por ser principalmente arbustos, con una altura promedio de aproximadamente 60 cm, el relave está compuesto por un material particulado fino, donde

se aprecian mayor cantidad de arcillas y limos, con una homogeneidad de color, el cual se clasifica como marrón claro a anaranjado claro (7.5YR 5/6). Este relave posee un área total de 5.259m². Fueron colectadas 9 muestras en la superficie del relave

Bellavista, cubriendo un área de 5.182 m² (Figura 5).



Figura 5. Vista de las muestras en la superficie del relave Bellavista y fotografías del relave. Fuente: elaboración propia.

La geoestadística fue realizada en base a los resultados de las concentraciones obtenidas por medio de la medición con XRF (Tabla 2). De acuerdo con los resultados, fue posible identificar concentraciones de plomo y arsénico en todas las muestras analizadas. Los resultados de las concentraciones demostraron que, del total de 9 muestras analizadas, 6 presentaron valores de arsénico que están sobre la norma permitida.

Las mediciones de concentración del plomo presentaron valores sobre la norma solamente en 1 muestra. No obstante, también fue

posible cuantificar las concentraciones de plomo en todas las muestras colectadas. De esta forma, fue posible realizar la modelación geoestadística de la distribución de ambos metales pesados. Según los resultados obtenidos de la geoestadística se pudo mensurar las áreas donde el arsénico y el plomo sobrepasan la norma (Figura 6). El plomo se concentra en un área de 533,09 m², esto representa el 10,13% del área total del relave. Por su parte, el arsénico se concentra en un área de 897,4 m², y esto representa el 17,06% del área total del relave.

Tabla 2. Resultados de la medición con XRF y el error estándar asociado de las muestras del relave Bellavista (concentraciones en ppm). Fuente: Elaboración propia.

Muestra	As	As Error estándar	Pb	Pb Error estándar
B-186	50	5	24	14
B-188	22	5	53	14
B-187	54	5	59	15
B-185	39	5	60	15
B-191	23	4	76	14
B-189	33	5	111	16
B-192	47	7	249	20
B-190	41	7	277	19
B-193	69	9	448	22

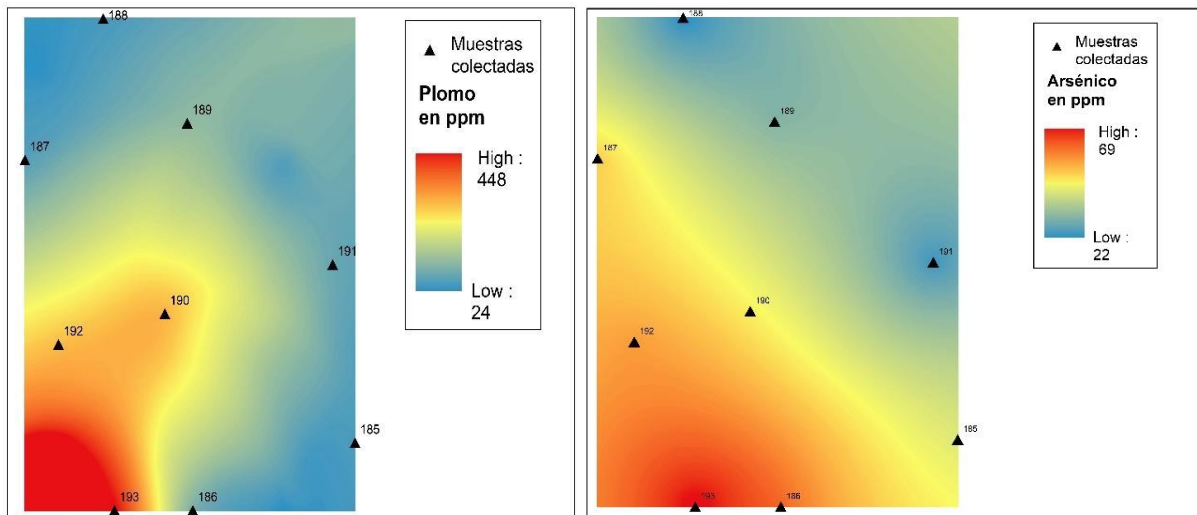


Figura 6. Distribución de las concentraciones de Plomo y Arsénico en la superficie del relave Bellavista.

Relaves Indey

Los relaves Indey son un conjunto de relaves fragmentados por la erosión hídrica y eólica, ubicados en el sector sur de la comuna. Estos relaves contienen material sedimentario superficial muy fino, tipo limo fino, en algunos sectores el material está muy compactado (Indey 1), y en otros está suelto y sin cohesión (Indey 2 y 3). Ambos relaves presentan color 2.5Y 5/6 según la carta Munsell es un color marrón-verde claro. Se destaca en estos depósitos la gran cantidad de cárcavas y socavones de diferentes tamaños y profundidades. La presencia de estos registros erosivos demuestra la exposición de los depósitos a procesos erosivos hídricos, y la susceptibilidad de transporte del material sedimentario contaminado, que a su vez presenta baja cohesión.

La erosión hídrica proporciona pérdida de material y transporte de estos depósitos, pero en este caso particular, lo que está siendo impactado no es precisamente el suelo, sino lo que está siendo transportado son sedimentos mineralizados compuestos de altas concentraciones de metales pesados, que a su vez produce la contaminación del suelo sobre el cual está instalado el relave, y los suelos aledaños.

El relave Indey 1 posee área de 1.729 m², mientras que los relaves Indey 2 y 3¹ posee área de 7.050 m². Fueron recolectadas 18 muestras en el relave Indey 1, cubriendo una cobertura de 1.627 m². Y en el relave Indey 2 y 3 fueron colectadas 19 muestras, cubriendo un área de 4.683 m².

¹ A pesar de estar registrado en el Catastro Nacional de Relaves (SERNAGEOMIN, 2020) como Indey 2 y 3,

Es importante mencionar que no fue posible realizar una toma de muestras que cubriera de forma homogénea la superficie del relave Indey 2 y 3, pues parte de este desmoronó, y los sectores inestables representaban un peligro a los técnicos/investigadores que realizaban la colecta de las muestras.

Considerando los aspectos evidenciados en terreno y mencionados anteriormente, constatarse que los relaves Indey – en comparación a los demás depósitos de relaves excepcionados en este estudio – son los que presentan estructura más inestable. Respecto a las evidencias de cicatrices de erosión identificadas en los respectivos depósitos visitados, se destacan dos socavones: el primero ubicado entre ambos depósitos con área de 1.456 m², longitud 72,52 m y de ancho 46,65 m. El segundo Socavón corta transversalmente el relave Indey 2 y 3, tiene área de 634,96 m², longitud 95,91 m y de ancho 11,90 m (Figura 7).

Es importante enfatizar en este aspecto, principalmente en los depósitos Indey 2 y 3, ya que estos presentan un estado avanzado de desprendimiento de la masa y presentó en las mediciones las mayores concentraciones de la distribución espacial de los metales. Los aspectos inestables de estos depósitos de relaves influyen directamente en la expansión de las áreas contaminadas debido a la distribución del material sedimentario con altas concentraciones de arsénico y plomo por medio de la erosión y deslizamientos del depósito.

este relave *in situ* es un solo depósito. Son relaves que están sobrepuestos.

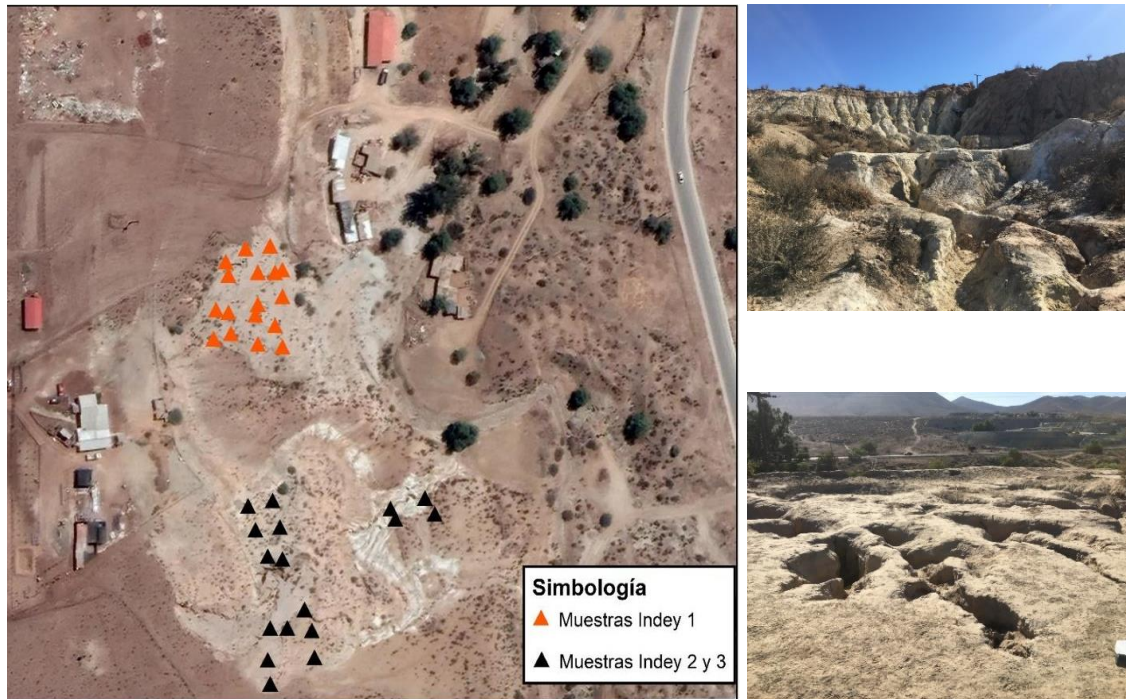


Figura 7. Vista de las muestras en la superficie de los relaves Índexs 1, 2 y 3, y fotografías del relave.

Los resultados obtenidos de la medición demostraron que de las 18 muestras colectadas en el relave Índex 1 todas presentaron resultados significativos y concentraciones de arsénico sobre la norma permitida (Tabla 3). De esta forma los resultados de la geoestadística indican que el área donde se encuentra distribuido el arsénico con concentraciones que sobrepasan los 40 ppm son 1.627 m², representa 94% del área total del relave Índex 1 (Figura 8). Siendo este relave el que obtuvo mayores concentraciones de arsénico sobre la norma permitida y distribuido en la mayor cantidad de área en la superficie de dicho relave, este fue clasificado como el relave de mayor potencial de toxicidad.

Las mediciones de las concentraciones de plomo en las mismas muestras del relave Índex 1, también presentaron valores significativos para todas las muestras, pero solamente 6 de las 18 muestras presentaron valores de concentraciones sobre la norma. De esta forma la distribución espacial del plomo, según los resultados de la geoestadística cubren un área de 553,04 m², que corresponde a 31,9% del área total del relave (Figura 8).

Con el mismo procedimiento mencionado anteriormente, fueron colectadas 19 muestras en la superficie del relave Índex 2 y 3. Todas las muestras presentaron valores significativos de concentraciones de arsénico, no obstante, solamente 7 muestras presentaron concentraciones

de arsénico superiores a la normativa (Tabla 3). Los resultados de la geoestadística indican que la distribución espacial de tales muestras es de 9,7% del área total de este relave, representando 573,79 m² (Figura 9).

Las mismas 19 muestras presentaron valores de concentraciones significativas de plomo, pero ninguna de las muestras presentó valores que sobrepasan la normativa. De esta forma, los resultados de la geoestadística fueron presentados, pero no fueron calculadas las medidas de las áreas de concentración ni tampoco los porcentajes de representación del área de concentración para el caso del plomo (Figura 9).

Entretanto, considerando el estado físico particular en el cual se encuentra el relave Índex 2 y 3, y considerando que las muestras del depósito Índex 1 presentó valores de concentración del plomo que sobrepasan la norma, es coherente no descartar la posibilidad de que el material sedimentario con mayores concentraciones de plomo estén ubicadas en las zonas de los socavones, o que debido al intenso proceso erosivo al cual estos relaves están expuesto, el material de mayor concentración de plomo haya sido lixiviado, transportado y depositado en el fondo de los socavones. Esta hipótesis fue considerada en terreno, pero debido la peligrosidad del estado inestable de la superficie del depósito se optó por no realizarse colectas al interior de los socavones y cárcavas profundas.

Tabla 3. Resultados de la medición con XRF y el error estándar asociado de las muestras de los relaves Index 1, 2 y 3 (concentraciones en ppm).

Muestra	As	As Error estándar	Pb	Pb Error estándar	Muestra	As	As Error estándar	Pb	Pb Error estándar
I-31	111	12	630	27	I-136	0	3	0	12
I-105	59	7	253	17	I-137	0	3	0	10
I-106	68	8	230	19	I-138	44	5	33	12
I-107	58	7	233	17	I-139	39	5	33	13
I-108	90	9	219	22	I-140	30	6	136	18
I-109	70	7	199	18	I-141	143	9	233	18
I-110	59	8	227	20	I-165	14	4	0	15
I-111	91	8	256	18	I-168	58	6	124	16
I-112	67	8	418	20	I-169	18	4	0	13
I-113	74	8	340	20	I-170	12	4	0	13
I-114	109	11	585	23	I-171	37	6	83	18
I-115	99	10	567	22	I-172	67	6	54	13
I-116	100	11	879	25	I-173	49	6	57	16
I-117	84	8	322	20	I-174	40	6	62	15
I-118	87	9	458	21	I-175	38	5	93	15
I-119	85	9	354	20	I-176	31	4	29	13
I-120	74	8	308	19	I-177	149	9	232	19
I-121	45	7	175	18	I-178	9	4	0	14
I-135	15	4	23	12					

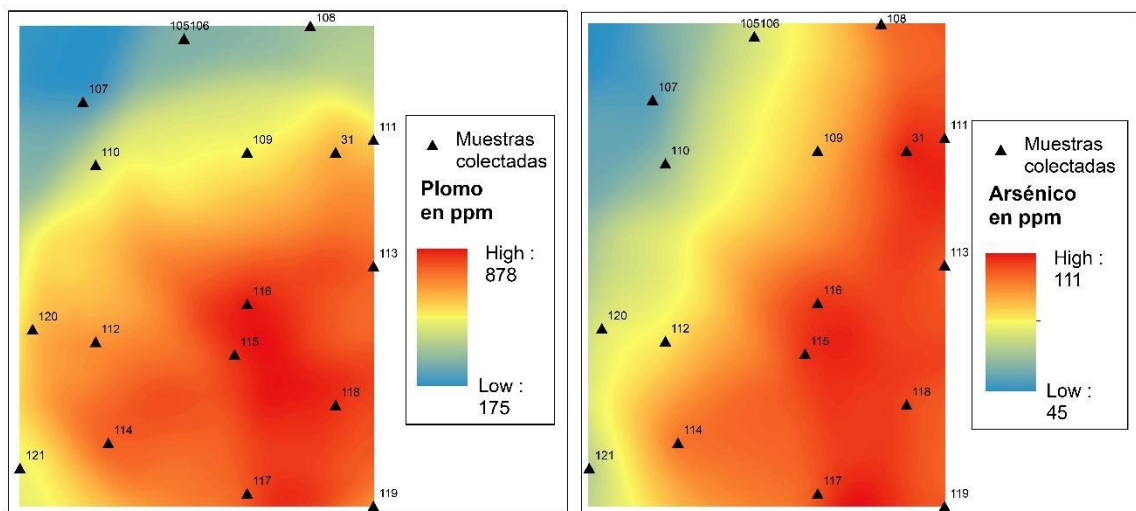


Figura 8. Distribución de las concentraciones de plomo y arsénico en la superficie del relave Index 1

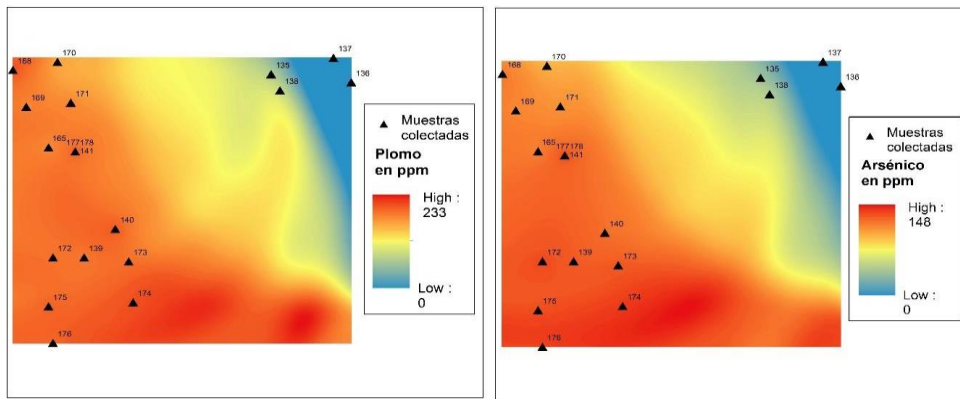


Figura 9. Distribución de las concentraciones de Plomo y Arsénico en la superficie del relave Indey 2 y 3

Relaves Jeraldo

El depósito de relave Jeraldo 1 posee colorimetría gris claro, con pequeñas manchas amarillas (2.5Y 7/4). El material superficial está compuesto de sedimentos finos y muy finos, probablemente limos y arenas finas mineralizadas. El relave Jeraldo 1 posee área total de 498 m², donde se muestreó un área de 290 m², y fueron colectadas 13 muestras. El relave Jeraldo 1 no presenta evidencias de procesos erosivos hídricos, tales como cárcavas o socavones.

El depósito Jeraldo 2 contiene material sedimentario de colorimetría marrón claro a anaranjado claro (7.5YR 5/8). La textura del material superficial es bastante más fina comparado con el material del depósito Jeraldo 1, probablemente limo fino y arcillas, y presenta marcas de erosión hídrica laminar, tales como pequeñas cárcavas de 30 cm de profundidad y 1 a 2 metros de largo, promedio.

Además, la vegetación del relave Jeraldo 2 es bastante más densa que los depósitos vecinos, lo que provoca agrietamiento de la superficie del suelo por las raíces. Vegetación formada por pequeños arbustos. Tampoco se sabe respecto al origen de la vegetación en estos depósitos, si es parte de algún proyecto de fitorremediación o si la vegetación es de origen natural.

El relave Jeraldo 2 posee área total de 1.765 m², fueron colectadas solamente 5 muestras, debido la complejidad de tener vegetación en la superficie y cierto grado de inestabilidad del depósito. Excepcionalmente en este relave fueron colectadas a una equidistancia de 50 m, a fin de poder cubrir la mayor cantidad de área superficial. De esta forma fue muestreada un área correspondiente a 1.332 m² (Figura 10).

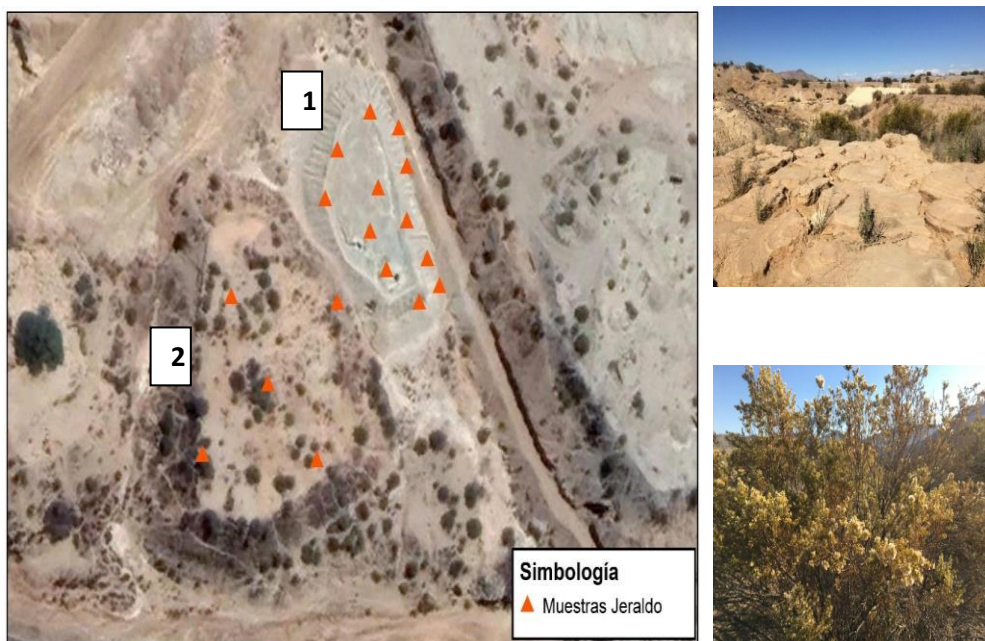


Figura 10. Vista de las muestras en la superficie de los relaves Jeraldo 1 y 2, y fotografías del relave.

Para la simulación geoestadística de este relave, los datos de los resultados del análisis con XRF fueron procesados en conjunto por dos razones:

1. En el relave Jeraldo 2 solo fueron colectadas 5 muestras, por lo que no sería posible generar la simulación geoestadística, ya que el umbral mínimo establecidos de muestras para una geoestadística óptima son de 9 muestras.
2. Los relaves Jeraldo 1 y 2 están muy cercanos, hay una distancia de 1.77 m entre ambos. Lo que permitió fácilmente la modelación unificada de los resultados del análisis de las muestras de ambos relaves.

Las 13 muestras colectadas en el depósito Jeraldo 1, todas presentaron resultados significativos en las concentraciones de arsénico, pero solamente 2 muestras presentaron valores que sobrepasan la normativa (Tabla 4). Según el resultado geoestadístico el área correspondiente a las concentraciones superiores a los 40 ppm de

arsénico es de 105m², esto representa 21% del área total del depósito Jeraldo 1 (Figura 11).

Los resultados del análisis de las mismas muestras para las concentraciones de plomo presentaron valores significativos, pero ninguna de las muestras analizadas presentó valores de concentraciones que sobrepasan la normativa.

Los análisis de las 5 muestras colectadas en el depósito Jeraldo 2 presentaron valores de concentraciones de arsénico significativos y sobrepasan la normativa. Según los resultados obtenidos de la geoestadística el área correspondiente a la concentración de arsénico es de 1.320 m², esta área representa 74,7% del total del relave Jeraldo 2 (Figura 11).

Los resultados de los análisis de concentración de plomo para las mismas 5 muestras demuestran que los valores son significativos, pero ninguna de las muestras presentó concentraciones que sobrepasen la normativa.

Tabla 4. Resultados de la medición con XRF y el error estándar asociado de las muestras de los relaves Jeraldo 1 y 2 (concentraciones en ppm). Fuente: Elaboración propia

Muestra	As	As Error estándar	Pb	Pb Err	Muestra	As	As Error estándar	Pb	Pb Err
J-34	8	4	9	7	J-46	8	5	11	3
J-35	5	4	7	6	J-47	107	6	10	8
J-36	8	4	13	7	J-48	40	5	18	8
J-37	9	4	12	7	J-49	13	4	0	6
J-38	6	4	10	7	J-179	45	6	36	9
J-42	6	4	15	7	J-180	66	8	50	10
J-43	13	4	0	7	J-181	41	6	46	9
J-44	8	5	8	4	J-182	40	6	38	9
J-45	6	4	11	7	J-183	45	6	34	9

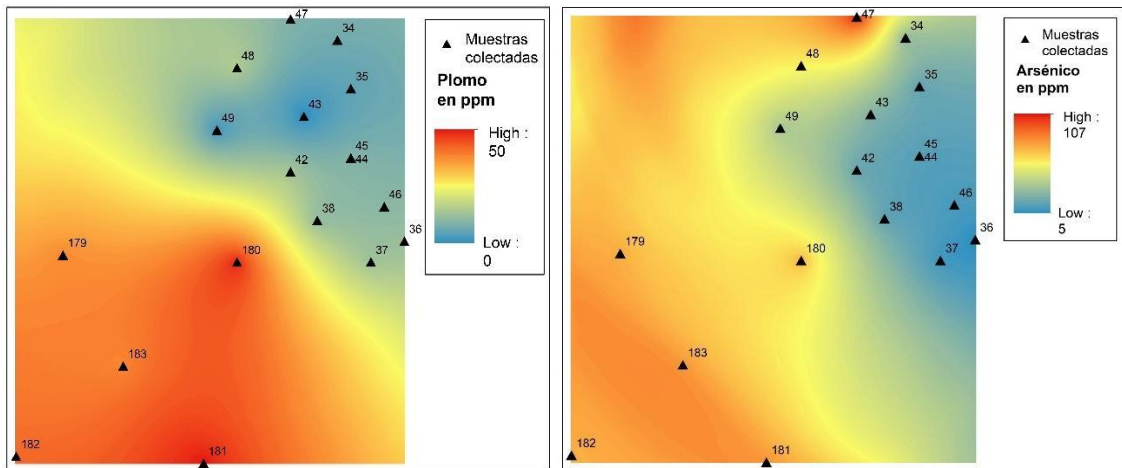


Figura 11. Distribución de las concentraciones de Plomo y Arsénico en la superficie de los relaves Jeraldo 1 y 2.

Relave Miraflores

El sedimento superficial del relave Miraflores presenta colorimetría marrón claro a anaranjado claro (7.5YR 5/8). Los sedimentos tienen textura más gruesa, tipo arena gruesa, y en los 50 cm de profundidad el material es más fino, tipo limo. La superficie de este depósito estaba cubierta por vegetación de pequeño porte - arbustos, con distancia entre ellos, lo que produce una baja densidad de la cobertura vegetal.

Parte del depósito presenta grietas profundas, típico de superficies arcillosas secas, que, al desecarse, forman una red poligonal de esas grietas de retracción. Este aspecto fue interpretado como indicador de que esta parte del depósito estaba compuesta mayormente por sedimentos arcillosos. Pero, por cuenta de la compactación del material, no fue posible la toma de muestras en este sector.

Las arcillas expansivas son aquellas que conforman los suelos arcillosos, donde el tamaño de las partículas es inferior a 2 micras, y se caracterizan por la capacidad de expansión (aumento de volumen) cuando absorben agua o retracción (disminución de volumen) cuando baja la humedad. El cambio de volumen en las arcillas expansivas no es uniforme y no es constante, además responden a las condiciones físicas, ambientales y esfuerzos que muchas veces no se puede predecir (Al-Mahbashi et al., 2021).

El relave Miraflores posee un área total de 2.988 m². En la figura x es posible observar que una parte de la superficie de este relave no fue muestreada por las razones mencionadas anteriormente. Fueron recolectadas 33 muestras, por lo cual fue muestreada un área de 1.992 m² (Figura 12).



Figura 12. Vista de las muestras en la superficie del relave Miraflores y fotografías del relave.

Los resultados obtenidos de la medición del arsénico muestran que todas las 33 muestras analizadas presentaron valores significativos, pero

26 muestras presentaron concentraciones de arsénico que sobrepasan la normativa establecida (Tabla 5). La geoestadística de este relave presenta

que las 26 muestras de concentraciones superior a 40 ppm están distribuidas en un área de 1.532 m², esto representa el 51,2% del área total del relave (Figura 13).

Los resultados correspondientes a la medición del plomo presentaron valores significativos para las 33 muestras, pero ninguna de ellas obtuvo valores que sobrepasan la normativa.

Tabla 5. Resultados de la medición con XRF y el error estándar asociado de las muestras del relave Miraflores (concentraciones en ppm).

Muestra	As	As Error estándar	Pb	Pb Error estándar	Muestra	As	As Error estándar	Pb	Pb Error estándar
M-50	74	6	53	8	M-66	19	5	0	8
M-51	94	8	61	9	M-67	13	5	0	8
M-52	133	9	83	9	M-68	76	6	64	9
M-53	154	9	74	10	M-69	25	5	18	8
M-54	134	9	91	9	M-70	25	5	0	8
M-55	85	8	59	9	M-71	48	6	16	8
M-56	89	8	64	9	M-72	32	5	18	8
M-57	71	6	61	9	M-73	56	6	27	9
M-58	101	8	60	9	M-74	245	10	84	9
M-59	85	8	67	9	M-75	142	9	92	9
M-60	83	8	57	8	M-76	89	8	86	9
M-61	124	8	89	9	M-77	140	9	83	9
M-62	98	8	94	9	M-78	84	7,00E-04	142	0
M-3	134	9	73	9	M-79	96	8	92	9
M-64	96	8	60	8	M-80	18	5	10	8
M-65	48	6	25	9	M-81	31	5	12	9
					M-82	94	8	51	9

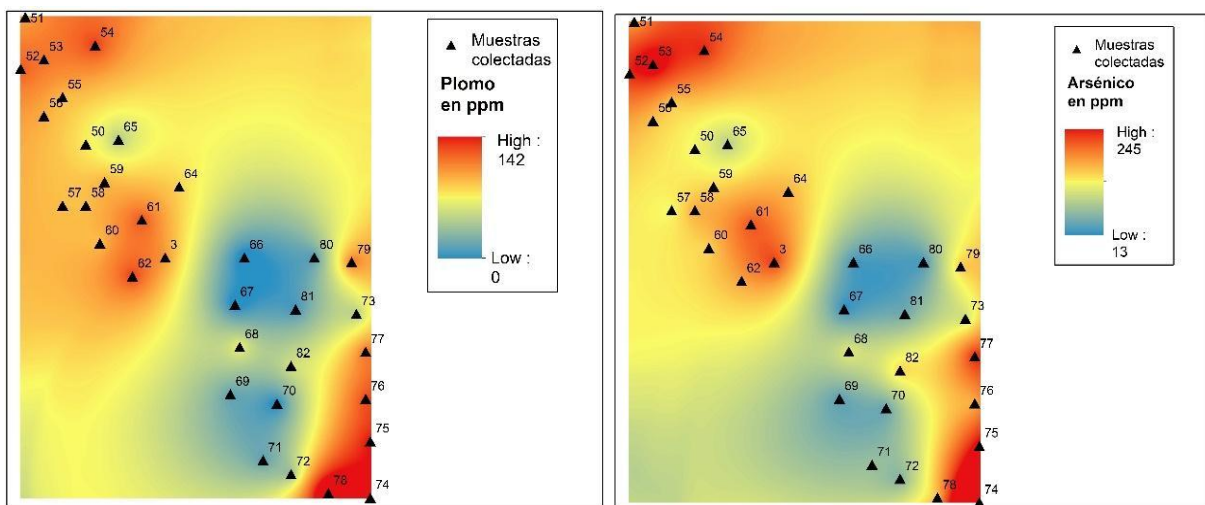


Figura 13. Distribución de las concentraciones de Plomo y Arsénico en la superficie del relave Miraflores.

Relaves Palmira

Los relaves Palmira se encuentran bastante intervenidos por las acciones de la actividad minera, tales como calicatas y remociones. Este relave predomina un color café pálido (2.5Y 7/3) con un material particulado superficial de grano mediano a fino y bastante homogéneo, el cual presenta una variación de color al aumentar la profundidad, donde se observan tonos más amarillos, grises y olivas, dependiendo de la zona

a excavar, es un relave predominantemente ácido. Es importante aclarar, que el relave Palmira 1 y 2², se encuentran sobrepuestos, y será visualizado en los planos como un solo depósito. Este relave posee un área total de 4.090 m². Durante la campaña de colecta de muestras fue muestreada una área correspondiente a 3.335 m², donde se colectaron 22 muestras (Figura 14).

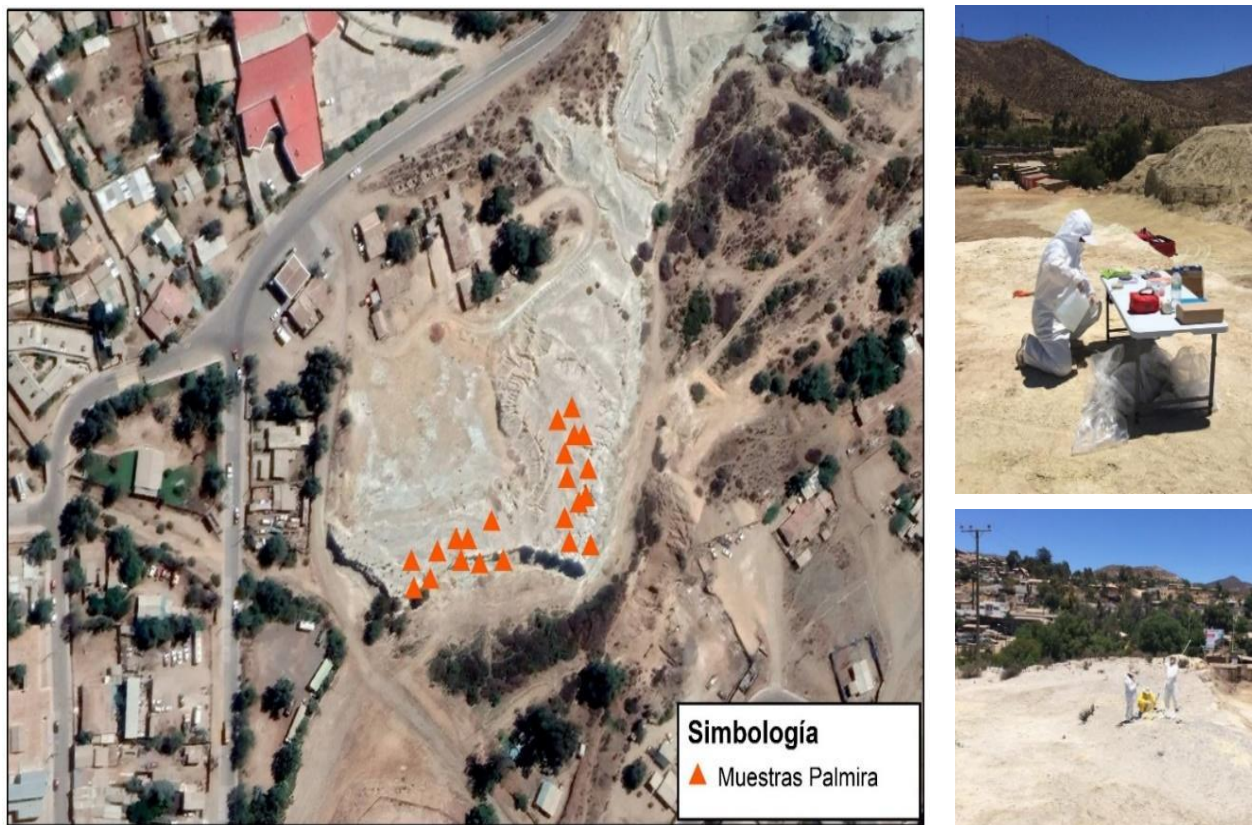


Figura 14. Vista de las muestras en la superficie del relave Palmira y fotografías del relave.

De acuerdo con los resultados obtenidos de la medición, los análisis de las 22 muestras presentaron que solamente 14 muestras obtuvieron valores significativos para las concentraciones de arsénico, y ninguna de las muestras presentaron valores que sobrepasan la normativa. La geoestadística de la distribución del arsénico fue realizada, pero considerando que ninguna muestra presentó valores que sobrepasan los 40 ppm, no se realizó el cálculo de las zonas críticas con altas concentraciones de arsénico en la superficie del relave.

Los resultados de las mediciones de las mismas muestras para el análisis de concentraciones de plomo presentaron que solamente 2 muestras presentaron valores significativos y ninguna sobrepasa la normativa (Tabla 6).

La geoestadística de las concentraciones de plomo no fue realizada considerando que solo fue posible identificar concentraciones en 2 muestras, siendo este número de muestras insuficiente para la realización de la simulación (Figura 15).

²A pesar de estar registrado en el Catastro Nacional de Relaves (SERNAGEOMIN, 2020) como Palmira 1 y 2,

este relave *in situ* es un solo depósito. Son relaves que están sobrepuestos.

Tabla 6. Resultados de la medición con XRF y el error estándar asociado de las muestras del relave Palmira 1 y 2 (concentraciones en ppm). Fuente: Elaboración propia.

Muestras	As	As Error estándar	Pb	Pb Error estándar	Muestras	As	As Error estándar	Pb	Pb Error estándar
P-231-232	4	3	< LOD	-	P-244	3	3	< LOD	-
P-233	7	3	< LOD	-	P-245	4	3	15	11
P-234	4	3	< LOD	-	P-246	3	3	< LOD	-
P-235	8	3	< LOD	-	P-247	< LOD	-	< LOD	-
P-236	4	3	< LOD	-	P-248	4	3	< LOD	-
P-237	9	3	< LOD	-	P-249	< LOD	-	< LOD	-
P-238	8	3	< LOD	-	P-250	< LOD	-	< LOD	-
P-239	4	3	16	12	P-251	< LOD	-	< LOD	-
P-240	9	3	< LOD	-	P-252	< LOD	-	< LOD	-
P-241	5	3	20	12	P-253	< LOD	-	< LOD	-
P-243	< LOD	-	13	11	P-254	< LOD	-	< LOD	-

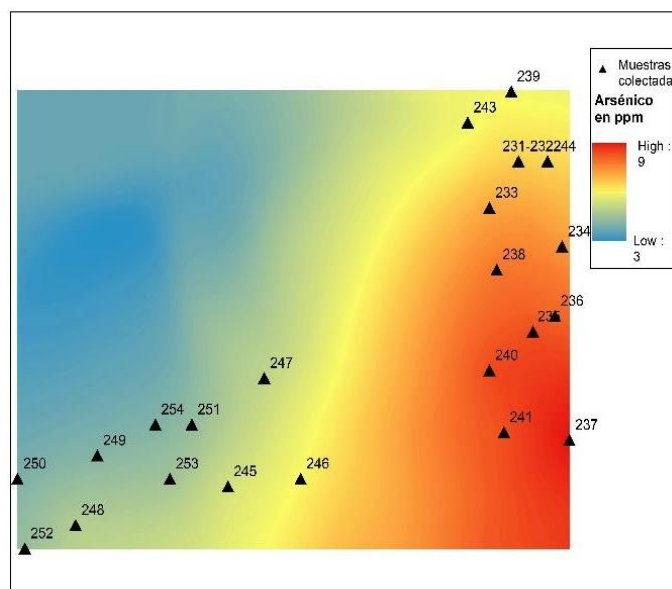


Figura 15. Distribución de las concentraciones de Arsénico en la superficie del relave Palmira. Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

1. La aplicación del método geoestadístico Kriging Bayesiano Empírico (EBK) resultó en

simulaciones de la distribución espacial de plomo y arsénico, lo que proporcionó la posibilidad de

identificar la ubicación de los sectores con concentraciones superiores al umbral permitido en la superficie de los depósitos de relaves. Como también, por medio de las simulaciones fue posible mensurar el área de los sectores donde el plomo y el arsénico sobrepasan los niveles aceptables establecidos por la normativa EPA. De esta forma la ejecución de método geoestadístico EBK cumplió con el objetivo propuesto por este estudio.

2. Las simulaciones fueron realizadas a partir de los resultados de los análisis de las concentraciones de plomo y arsénico medidas por XRF, (Valores observados) lo que permitió la simulación geoestadística EBK predecir valores para las áreas donde no fueron colectadas muestras. La validación de las diferencias entre los valores observados y los valores preestablecidos permitió validar la variabilidad de la predicción, esta validación se dio por medio del valor obtenido del error estándar (presentado en la ecuación 1). Los valores del error estándar estuvieron dentro del rango aceptable (0-10), lo que indica que la variabilidad de la predicción estuvo ajustada a los valores observados, lo que indica que las simulaciones fueron condecuentes con la realidad.

Agradecimientos

Iniciativa financiada por Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), por medio del “Primer Concurso IDeA de I+D del FONDO DE FOMENTO AL DESARROLLO CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO, FONDEF/CONYCIT, 2018 Fondef ID18I10189” y apoyada por la Municipalidad de Andacollo y por la Universidad Tecnológica Metropolitana

Referencias

AbdelRahman, M. A., Zakarya, Y. M., Metwaly, M. M., Koubouris, G., 2021. Deciphering Soil Spatial Variability through Geostatistics and Interpolation Techniques. *Sustainability*, 13(1), 194.

Aelion, C. M., Davis, H. T., Liu, Y., Lawson, A. B., McDermott, S., 2009. Validation of Bayesian kriging of arsenic, chromium, lead, and mercury surface soil concentrations based on internode sampling. *Environmental science & technology*, 43(12), 4432-4438.

Alencar da Silva Alves, K. M., Contreras Franco, C. B., Parodi Dávila, M. C. 2021. Modelación de áreas inundables en un sector minero de la cuenca Quebrada el Arrayán – Región de Coquimbo - Chile. *Cuadernos Del CURIHAM*,

3. También se pudo concluir que, de acuerdo con los resultados de concentraciones de arsénico y plomo superiores a la normativa, y las mediciones de las áreas donde se encuentra distribuidos estos metales, se pudo definir una jerarquía de los depósitos de relaves potencialmente peligrosos. De acuerdo con esta jerarquía, los tres depósitos de relaves potencialmente peligrosos según las concentraciones y mayor área de distribución de arsénico, en primer lugar, es el relave Indey 1, en segundo lugar, el relave Jeraldo, y tercero y último relave Miraflores. Los tres depósitos de relaves potencialmente peligrosos según las concentraciones y mayor área de distribución de plomo en primer lugar, relave Indey 1, en segundo lugar, relave Bellavista, y tercero lugar, relave Indey 2 y 3.

4. Por último, concluimos que el método geoestadístico EBK se presenta como una excelente herramienta de gestión de sitios contaminados, siendo un método fundamental para la gestión del peligro y monitoreo de la distribución de contaminantes presentes en suelo.

(UTEM) de Chile. Se agradece también al Laboratorio de Suelos y Medio Ambiente, dependiente del Departamento de Industria, Facultad de Ingeniería de la UTEM y al Consejo Nacional de Investigación y Técnicas (CONICET - ARGENTINA) por medio de la beca postdoctoral Latinoamérica 2020, por el apoyo en la ejecución del estudio.

27, 59–68.
<https://doi.org/10.35305/curiham.v27i.170>

Afu, S. M., Isong, I. A., Awaogu, C. E., 2019. Agricultural potentials of floodplain soils with contrasting parent material in Cross River State, Nigeria. *Global Journal of Pure and Applied Sciences*, 25(1), 13-22.

Albaladejo, J., Diaz-Pereira, E., de Vente, J., 2021. Eco-Holistic Soil Conservation to support Land Degradation Neutrality and the Sustainable Development Goals. *Catena*, 196, 104823.

Al-Mahbashi, A. M., Al-Shamrani, M. A., Abbas, M. F., 2021. Hydromechanical behavior of unsaturated expansive clay under repetitive loading. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.

- Cabello, J., 2021. Gold deposits in Chile. *Andean Geology*, 48(1), 1-23.
- Bhatia, M., Specht, A. J., Ramya, V., Sulaiman, D., Konda, M., Balcom, P., Qureshi, A. 2021. Portable X-ray Fluorescence as a Rapid Determination Tool to Detect Parts per Million Levels of Ni, Zn, As, Se, and Pb in Human Toenails: A South India Case Study. *Environmental Science & Technology*, 55(19), 13113-13121.
- Bonnail, E., Díaz-García, A., Cruces, E., García, A., Borrero-Santiago, A. R. 2022. Coastal uses and contaminant spread in the desert coastal region of Atacama. *Chemosphere*, 288, 132519.
- Caporale, A. G., Adamo, P., Capozzi, F., Langella, G., Terribile, F., Vingiani, S., 2018. Monitoring metal pollution in soils using portable-XRF and conventional laboratory-based techniques: Evaluation of the performance and limitations according to metal properties and sources. *Science of the Total Environment*, 643, 516-526.
- Cruzado-Tafur, E., Torró, L., Bierla, K., Szpunar, J., Tauler, E., 2021. Heavy metal contents in soils and native flora inventory at mining environmental liabilities in the Peruvian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 106, 103107.
- Fang, H., 2021. Impacts of rainfall and soil conservation measures on soil, SOC, and TN losses on slopes in the black soil region, northeastern China. *Ecological Indicators*, 129, 108016.
- De Castro Paes, É., Veloso, G. V., da Fonseca, A. A., Fernandes Filho, E. I., Ferreira, M. P., Soares, E. M. B. 2022. Predictive modeling of contents of potentially toxic elements using morphometric data, proximal sensing, and chemical and physical properties of soils under mining influence. *Science of The Total Environment*, 152972.
- Goff, K., Schaetzl, R. J., Chakraborty, S., Weindorf, D. C., Kasmerchak, C., & Bettis III, E. A., 2020. Impact of sample preparation methods for characterizing the geochemistry of soils and sediments by portable X-ray fluorescence. *Soil Science Society of America Journal*, 84(1), 131-143.
- Gribov, A., Krivoruchko, K., 2020. Empirical Bayesian kriging implementation and usage. *Science of The Total Environment*, 137290.
- MMA. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, 2012. Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes.
- Hadaro, M., Ayele, T., Parshotam Datt, S., Teshome, R., 2021. Soil Properties as Affected by Soil Conservation Practices and Soil Depths in Uwite Watershed, Hadaro Tunto District, Southern Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science*, 2021.
- Hancock, G. R., Willgoose, G. R. 2021. Predicting gully erosion using landform evolution models: Insights from mining landforms. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(15), 3271-3290.
- Hu, B., Chen, S., Hu, J., Xia, F., Xu, J., Li, Y., Shi, Z., 2017. Application of portable XRF and VNIR sensors for rapid assessment of soil heavy metal pollution. *PLoS One*, 12(2), e0172438.
- Itabashi, T., Li, J., Hashimoto, Y., Ueshima, M., Sakanakura, H., Yasutaka, T., Hosomi, M., 2019. Speciation and fractionation of soil arsenic from natural and anthropogenic sources: chemical extraction, scanning electron microscopy, and Micro-XRF/XAFS investigation. *Environmental science & technology*, 53(24), 14186-14193.
- Jam, A. S., Mosaffaie, J., Tabatabaei, M. R., 2021. Assessment of comprehensiveness of soil conservation measures using the DPSIR framework. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(1), 1-19.
- John, K., Afu, S. M., Isong, I. A., Aki, E. E., Kebonye, N. M., Ayito, E. O., Penížek, V., 2021. Mapping soil properties with soil-environmental covariates using geostatistics and multivariate statistics. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-16.
- Kostaschuk, R., Aden, A., Desloges, J. R., 2021. Erosion, deposition and contamination by high-magnitude subaqueous debris flows and turbidity currents: Insights from the failure of a tailings dam near Quesnel Lake, British Columbia. *Sedimentology*.
- Krivoruchko, K., Gribov, A., 2019. Evaluation of empirical Bayesian kriging. *Spatial Statistics*, 32, 100368.
- Lam, E. J., Montofré, Í. L., Ramírez, Y., 2021. Mine tailings phytoremediation in arid and semiarid environments. In *Phytoremediation of Abandoned Mining and Oil Drilling Sites* (pp. 115-166). Elsevier.
- Li, F., Zhang, X., Lu, A., Xu, L., Ren, D., You, T. 2022. Estimation of metal elements content in soil using x-ray fluorescence based on multilayer perceptron. *Environmental monitoring and assessment*, 194(2), 1-12.
- Liu, K., Cai, H., Jing, X., Chen, Y., Li, L., Wu, S., Wang, W., 2021. Study on Hydraulic Incipient

- Motion Model of Reinforced Tailings. *Water*, 13(15), 2033.
- Li, Z., Tao, H., Zhao, D., Li, H. 2022. Three-dimensional empirical Bayesian kriging for soil PAHs interpolation considering the vertical soil lithology. *CATENA*, 212, 106098.
- López-Berenguer, G., Pérez-García, J. M., García-Fernández, A. J., Martínez-López, E. 2021. High levels of heavy metals detected in feathers of an avian scavenger warn of a high pollution risk in the Atacama Desert (Chile). *Archives of environmental contamination and toxicology*, 81(2), 227-235.
- Luo, C., Routh, J., Luo, D., Wei, L., Liu, Y. 2021. Arsenic in the Pearl River Delta and its related waterbody, South China: occurrence and sources, a review. *Geoscience Letters*, 8(1), 1-13.
- Marques, R. F. D. P. V., da Silva, A. M., dos Santos Rodrigues, L., Mendes, L. F., de Oliveira, A. S., 2021. Impactos da disposição de resíduos sólidos urbanos no solo em municípios de Minas Gerais–Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(03), 1382-1392.
- Morita, A. K., Ibelli-Bianco, C., Anache, J. A., Coutinho, J. V., Pelinson, N. S., Nobrega, J., ... Wendland, E., 2021. Pollution threat to water and soil quality by dumpsites and non-sanitary landfills in Brazil: A review. *Waste Management*, 131, 163-176.
- Nath, H., Rafizul, I. M. 2022. Spatial Variability of Metal Elements in Soils of a Waste Disposal Site in Khulna: A Geostatistical Study. In *Advances in Civil Engineering* (pp. 25-36). Springer, Singapore.
- Pacheco, P. R., Parodi, M. C., Mera, E. M., Salini, G. A., 2020. Variables meteorológicas y niveles de concentración de material particulado de 10 µm en Andacollo, Chile: un estudio de dispersión y entropías. *Información tecnológica*, 31(6), 171-182.
- Quispe-Jofré, A., Philimon, P. P., Alfaro-Lira, S., 2021. Socio-environmental conflict over abandoned mining waste in Copaquilla, Chile. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-19.
- Rima, U. S., Beier, N. A. 2022. Effects of seasonal weathering on dewatering and strength of an oil sands tailings deposit. *Canadian Geotechnical Journal*, 59(3), 447-457.
- Rodríguez-Zapata, M. A., Ruiz-Agudelo, C. A. 2021. Environmental liabilities in Colombia: A critical review of current status and challenges for a megadiverse country. *Environmental Challenges*, 5, 100377.
- SERNAGEOMIN. SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA, 2020. Catastro Nacional Depósito de relaves. Disponible desde internet en: <https://www.sernageomin.cl/deposito-de-relaves/> (con acceso el 13/06/2021).
- Sharma, A., Guinness, J., Muyskens, A., Polizzotto, M. L., Fuentes, M., Hesterberg, D. 2022. Spatial statistical modeling of arsenic accumulation in microsites of diverse soils. *Geoderma*, 411, 115697.
- Shokr, M. S., Abdellatif, M., El Baroudy, A. A., Elnashar, A., Ali, E. F., Belal, A. A., Kheir, A., 2021. Development of a spatial model for soil quality assessment under arid and semi-arid conditions. *Sustainability*, 13(5), 2893.
- Sun, Y., Gu, X., Xu, X., 2021. Experimental Study on Hydraulic Erosion Characteristics of Ecological Slope of Tailings Reservoir under Rainfall. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 1-11.
- Tibane, L. V., Mamba, D. 2022. Dataset on enrichment of selected trace metals in the soil from designated abandoned historical gold mine solid waste dump sites near residential areas, Witwatersrand Basin, South Africa. *Data in Brief*, 41, 107895.
- Urbina, M. A., Guerrero, P. C., Jerez, V., Lisón, F., Luna-Jorquera, G., Matus-Olivares, C., Gomez-Uchida, D. 2021. Extractivist policies hurt Chile's ecosystems. *Science*, 373(6560), 1208-1209.
- Varghese, T. I., Nagesh Rao, P. T., Raghavendramurthy, N., Ramasamy, N., 2018. Sediment geochemistry of coastal environments, southern Kerala, India: implication for provenance. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(3), 1-14.
- Wen, Q., Yang, X., Yan, X., Yang, L. 2022. Evaluation of arsenic mineralogy and geochemistry in gold mine-impacted matrices: Speciation, transformation, and potential associated risks. *Journal of Environmental Management*, 308, 114619.
- Yan, P., Peng, H., Yan, L., Lin, K., 2019. Spatial variability of soil physical properties based on GIS and geo-statistical methods in the red beds of the Nanxiong Basin, China. *Pol. J. Environ. Stud*, 28, 2961-2972.
- Zamarreño, R., Cabana, R., Vergara, K., Cortez, S., 2020. Desplazamiento de elementos metálicos en el estero El Culebrón, por la presencia de un relave minero abandonado, Coquimbo-Chile. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 23(2).