

**“CUANTIFICACIÓN DE RIESGO PARA LA SALUD CANCERÍGENO Y NO CANCERÍGENO
PRODUCTO DE CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR METALES PESADOS ASOCIADOS A
TRANQUES DE RELAVE UBICADOS EN CATORCE COMUNAS DE LA REGIÓN DE VALPARAÍSO,
CHILE”**

Y. Águila Oyarzún¹, P. Tume Zapata², C. Correa Rogel³

RESUMEN: En la actualidad existe un interés especial y creciente en cuando al grado de contaminación que pueden presentar los suelos, sobre todo aquellos cercanos a sectores asociados a la industria minera. Este estudio se centra en la zona central de Chile, específicamente en la región de Valparaíso. Para ello se consideraron 222 muestras asociadas a depósitos de relaves activos e inactivos distribuidos en catorce comunas de la quinta región y se consideran como elemento de interés y análisis un total de diez los cuales son: Cobre (Cu), Vanadio (V), Estroncio (Sr), Plomo (Pb), Arsénico (As), Antimonio (Sb), Cadmio (Cd), Mercurio (Hg), Cobalto (Co) y Bario (Ba). La finalidad de este análisis es obtener el riesgo para la salud cancerígeno y no cancerígeno tanto en niños como en adultos, asociado a una posible contaminación de suelos; esto a través del uso de estadística univariada, multivariada y análisis geoestadístico. Dentro de las actividades realizadas se encuentra la distribución espacial de las concentraciones para cada elemento a través de Kriging y posterior a ello se obtuvieron los índices ecológicos utilizando valores de fondo para la corteza terrestre propuestos por McLennan en el año 2001, obteniendo así el índice de geo-acumulación, factor de enriquecimiento, factor de contaminación, grado de contaminación y el índice de contaminación integrado; con estos resultados es posible cuantificar el riesgo para la salud de interés. El elemento que presenta concentraciones más elevadas es el cobre, bario es el elemento que muestra una distribución espacial más homogénea, la mayor contaminación en el área de estudio es producto del antimonio seguido por el cobre, mientras cadmio y mercurio no suponen un riesgo de contaminación en la zona. En cuanto al riesgo para la salud gracias a los resultados obtenidos es posible indicar que los elementos As, Ba y Co traen consigo riesgo para la salud no cancerígenos en niños, ya que sus valores son superiores a 1; por otro lado, en base a los resultados obtenidos es posible afirmar que no existe riesgo cancerígeno y no cancerígeno en adultos.

PALABRAS CLAVES: Contaminación de suelos; metales pesados, riesgo en la salud.

ABSTRACT: Currently, there is a special and growing interest in the degree of contamination that soils may present, especially those near areas associated with the mining industry. This study focuses on the central region of Chile, specifically in the Valparaíso region. For this purpose, 222 samples associated with active and inactive tailings deposits distributed across fourteen communes in the fifth region were considered, and a total of ten elements of interest and analysis were identified: Copper (Cu), Vanadium (V), Strontium (Sr), Lead (Pb), Arsenic (As), Antimony (Sb), Cadmium (Cd), Mercury (Hg), Cobalt (Co), and Barium (Ba). The aim of this analysis is to assess the cancer and non-cancer health risks for both children and adults associated with potential soil contamination, using univariate and multivariate statistics as well as geostatistical analysis. Among the activities carried out is the spatial distribution of concentrations for each element through Kriging, and subsequently, ecological indices were obtained using background values for the Earth's crust proposed by McLennan in 2001, thus obtaining the geo-accumulation index, enrichment factor, contamination factor, degree of contamination, and integrated contamination index; with these results, it is possible to quantify the health risk of interest. The element with the highest concentrations is copper, while barium shows a more homogeneous spatial distribution. The greatest contamination in the study area is due to antimony, followed by copper, while cadmium and mercury do not pose a contamination risk in the area. Regarding health risks, based on the results obtained, it is possible to indicate that the elements As, Ba, and Co carry non-cancer health risks for children, as their values are above 1; on the other hand, based on the results obtained, it can be affirmed that there is no cancer or non-cancer risk for adults.

KEYWORDS: Soil contamination; heavy metals; health risk.

¹Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, yaguila@ing.ucsc.cl

²Profesor Guía, Depto. Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, ptume@ucsc.cl

³Profesor Informante, Depto. Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, claudiocorrea@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso vital que conforma el soporte físico sobre el cual se desarrollan los seres vivos. De igual forma, es la fuente primordial de materias primas y en él el hombre lleva a cabo todos los procesos de producción, como por ejemplo agricultura, industria, urbanización, entre otros. En el suelo es posible encontrar de forma natural diversos compuestos, siendo de interés para esta investigación los metales. (Jiménez, 2017; Solano, 2005)

Habitualmente el suelo se encuentra sometido a distintos procesos que dependiendo de las circunstancias permiten que este alcance su equilibrio, sin embargo, ante cualquier cambio se rompe esta condición ideal teniendo así un suelo alterado y produciendo la degradación del mismo. Cuando esta degradación se produce por concentraciones nocivas de elementos químicos o compuestos se habla de contaminación. (Galán y Romero, 2008)

Un suelo contaminado genera pérdida en el recurso natural, existiendo también la posibilidad de que los contaminantes interactúen y/o influyan en receptores como agua, aire, plantas y humanos; provocando así efectos negativos en estos receptores pudiendo significar incluso un riesgo para la salud en humanos. (Brizuela y Jiménez, 2012)

Existen actividades antrópicas e industriales que inciden en los cambios que presenta el suelo, entre ellas destaca la minería la cual gracias a la existencia de metales pesados presenta gran relevancia en esta investigación. En los depósitos de relave se deposita lo que en faena es considerado como desecho, estos desechos contienen metales pesados en distintas cantidades, lo cual puede influir directa e indirectamente en la salud de niños y adultos.

La emisión de contaminantes al medio ambiente en su mayoría es resultado de procesos antropogénicos y los metales pesados son los contaminantes que más perduran en el tiempo y complejos de subsanar en la naturaleza. Estos metales tienen la facultad de degradar la calidad de la atmósfera, cuerpos de agua y cultivos de alimentos; junto con ello, amenazan la salud y bienestar de los seres vivos. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Rodríguez, McLaughlin y Pennock, 2019; Bautista, 1999)

La tabla periódica que se utiliza en la actualidad posee 118 elementos, de ellos 70 pertenecen al grupo de los metales y 59 de ellos son considerados metales pesados. Al hablar de metales pesados se hace referencia a metales y metaloides de masa relativamente alta ($>4,5 \text{ g/cm}^3$). Es importante destacar que existen no metales considerados como metales pesados, como el arsénico y antimonio, es por ello que en ocasiones se utiliza el término “elementos traza” para incluir metales y no metales. (Tejión, 2020; Galán y Romero, 2008; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Rodríguez, McLaughlin y Pennock, 2019)

La presencia de metales en suelo fuera del rango permitido, produce lo que se conoce como contaminación de suelo por metales pesados. Lo anterior ocurre principalmente como consecuencia de actividades humanas, entre estas se tiene la minería y actividades ligadas a operaciones de explotación mineral como principal fuente de contaminación en los suelos. A su vez, la minería se asocia cada vez más al riesgo hídrico, tanto en términos de acceso al agua como calidad de agua circundante. En esta área los agentes contaminantes son los metales pesados en sí, el polvo fugitivo y la percolación de soluciones ácidas. (Soto, Rodríguez, Olivera, Arostegui, Colina y Garate, 2020; Thomashausen, Maenling y Mebratu-Tsegaye, 2018; Torres, 2020)

Hoy en día en Chile se admiten 3 posibles estados para los tranques de relave: abandonado, activo e inactivo. Estos son considerados como principales Pasivos Ambientales Mineros (PAM), constituyendo un riesgo significativo para salud de las personas y el medioambiente. Además, con el paso del tiempo debido a la disminución de ley mineral la cantidad de desechos en minería aumenta. (Kotthoff, 2020; Torres, 2020; Ramírez, 2007)

Para un análisis más detallado se hace uso de métodos geoestadísticos, para los cuales es necesario contar con concentraciones de metales de interés. Con esta finalidad se recogen del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) datos correspondientes a la comuna de Valparaíso, específicamente de 14

comunas. A continuación, en la Figura 1 se presenta la ubicación de los puntos muestreados, los cuales se encuentran señalados por los puntos rojos de la imagen.

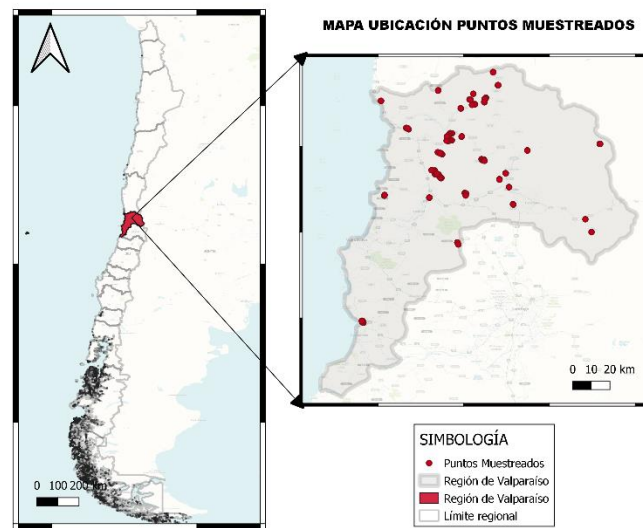


Figura 1: Mapa localización de puntos muestreados con vista satélite.

El objetivo principal de este trabajo es cuantificar el riesgo para la salud cancerígeno y no cancerígeno para niños y adultos, producto de metales pesados asociados a depósitos de relave en catorce comunas de la región de Valparaíso.

2. MARCO TEÓRICO

El SERNAGEOMIN, en el marco de control de relaves, periódicamente realiza muestreos y ensayos con la finalidad de caracterizar los depósitos de relaves en Chile. Dichos datos son de acceso público y se encuentran disponibles en el sitio web de este organismo.

Para este trabajo se utilizaron los datos disponibles para la región de Valparaíso, según un muestreo realizado por el laboratorio de SERNAGEOMIN en el año 2020. La base de datos considera 222 puntos muestreados y para cada uno de ellos se entregan sus respectivas coordenadas y concentraciones de elementos y compuestos, dichas concentraciones se encuentran en partes por millón (ppm). Sin embargo, en esta ocasión se trabaja solo con los datos correspondientes a metales pesados para cumplir con el objetivo antes detallado. Por consiguiente, los elementos seleccionados son: Cobre, Vanadio, Estroncio, Plomo, Arsénico, Antimonio, Cadmio, Mercurio, Cobalto y Bario.

A modo resumen, en la Tabla 1 se expone el conteo de cada variable disponible para los 222 puntos.

Tabla 1
Resumen información disponible en base de datos

	Cantidad
Puntos muestreados	222
Empresa o Dueño	34
Faena	36
Nombre del depósito	67
Recurso explotado	12
Estado del depósito	3
Origen	4
Comuna	14

2.1. Geomorfología y Geología

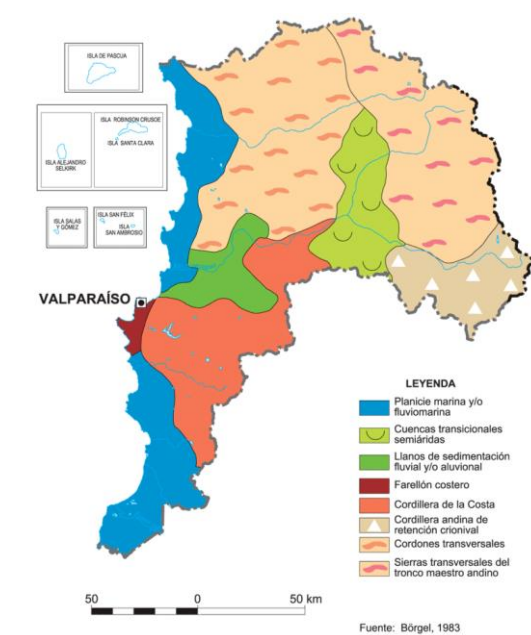


Figura 2: Mapa representativo de geomorfología región de Valparaíso.

Fuente: Instituto Geográfico Militar.

La información que se entrega a continuación está basada, en lo expuesto por el Instituto Geográfico Militar (IGM) en la Figura 2. La región de Valparaíso al oeste cuenta con la presencia del farellón costero, hacia el este aparecen planicies marinas y/o fluviomarina que conforman una franja que varía entre los 7 y 30 km de ancho. Hacia la derecha, se encuentra la Cordillera de la costa y entre la Cordillera de la costa y las planicies marinas es posible encontrar llanos de sedimentación fluvial y/o aluvial. Al norte surgen cordones transversales, mientras que a la derecha se cuenta con la presencia de cuencas transicionales semiáridas. Colindando con dichas cuencas están las sierras transversales del tronco maestro andino, finalmente al sur-este de las sierras y las cuencas emerge la cordillera andina de retención crionival.

De acuerdo a las hojas geológicas Quillota y Portillo en la región de Valparaíso afloran rocas del basamento de edad paleozoico y rocas de cobertura que corresponden al Mesocenoico. En la costa es posible identificar el basamento al sur del Río Aconcagua, en él es posible identificar rocas intrusivas pertenecientes a la Unidad Cochoa. De igual forma, la cobertura mesocenoica a la cual se hizo referencia anteriormente se identifican una serie de franjas de intrusivos mesocenoicos con edades decrecientes de oeste a este. (Rivano, 1996)

Más en detalle, la cobertura cuenta en la costa con una secuencia volcánica de composición acida a intermedia, en parte subacuáticas que corresponden a la Formación Pichidangui formadas en el Triásico. Hacia el este estas unidades son sobreyacidas de forma concordante por sedimentitas marinas del Jurásico Inferior a Superior que forman parte de la Formación los Molles, y de forma discordante por volcanitas continentales cotemporaneas con las sedimentitas marinas. Luego, en discordancia con la secuencia anterior aparecen las formaciones Lo Prado, Veta Negra Arqueros, Las Chilcas, Cristo redentor y Los Pelambres. Así, aparece una potente secuencia volcánica del Cretácico Superior correspondiente a la Formación Salamanca. Finalmente, aflora una secuencia volcánica del Mioceno perteneciente a la Formación Farellones que corresponde a un complejo volcánico con desarrollo inicial de depósitos de piroclastos e ignimbriticos seguidos de un volcanismo efusivo y andesítico. (Rivano, 1996)

En la zona costera se encuentran depósitos aterrizados del Mioceno-Plioceno marino litoral de la Formación Coquimbo, ligada a la desembocadura de ríos de gran tamaño. La Formación Confluencia también se

encuentra aterrazada pero sus depósitos son de origen continental. Sobre estas, aparecen depósitos del Cuaternario de origen litoral, fluvial, glacio-fluvial y de remoción en masa. Es importante destacar, que el basamento y la cobertura se encuentran interceptados por rocas intrusivas que forman cuatro franjas principales: franja jurásica constituida por la superunidad Mincha, franja cretácica de la superunidad Illapel, franja cretácico-Paleogena asociada a la superunidad Cogoti y unidad San Lorenzo y por último, la franja neógena conformada por la superunidad Río Chicharra y sus unidades todas del Mioceno. Asociado a estas franjas de intrusivo se encuentran yacimientos de minerales metálicos, sobre todo en la Superunidad Illapel y Río Cgicharra, adicionalmente son abundantes los yacimientos de minerales no metálicos: calizas, feldespato, cuarzo, caolín, etc. (Rivano, 1996)

3. METODOLOGÍA

Para este trabajo se utilizan datos de acceso público en la plataforma web de SERNAGEOMIN y su laboratorio. Se obtuvo una base de datos correspondiente al catastro de depósitos de relaves en el país, dicha base de datos fue reducida solo a la zona de interés por lo cual se consideraron solo los puntos muestreados en la quinta región, y se utilizaron solo los datos para los elementos traza disponibles que fueron: cobre, vanadio, estroncio, plomo, arsénico, antimonio, cadmio, mercurio, cobalto y bario.

El primer paso a seguir es la realización de una revisión bibliográfica con el fin de hacer un barrido de información y conseguir aristas a tratar, información relevante, casos asociados, si el tema configura una problemática, entre otras cosas. Para ello, se consideraron artículos, tesis de pre y posgrado, libros, revistas científicas y leyes vigentes.

3.1. Análisis exploratorio de datos, componentes principales, estadística univariada y análisis multivariado

En primer lugar se realiza el análisis exploratorio de datos (EDA) con ayuda del *software* IBM SPSS StaTistics y *software* JMP: Statistical Software. A continuación, se realiza en QGIS3 la localización geográfica de los 222 puntos muestreados. Es importante destacar, que en este trabajo no fueron descartados los valores atípicos ya que el fin es obtener resultados en base a concentraciones reales. A través de los *software* ya mencionados fueron realizados la estadística univarada para cada uno de los diez elementos de interés junto con el análisis multivariado del conjunto de datos. Finalmente, se lleva a cabo el respectivo análisis de componentes principales.

3.2. Distribución espacial

Mediante el *software* QGIS3, se realiza la distribución espacial de cada elemento en el área de la región del Valparaíso. Para conseguir esta interpolación se utiliza el método *Kriging* en el *software* mencionado. Con el resultado de la interpolación se elabora un mapa de distribución de concentraciones para cada uno de los 10 elementos.

3.3. Valores de fondo

Para comenzar, se debe calcular la desviación absoluta media (MAD) para cada uno de los elementos utilizando la siguiente fórmula:

$$MAD = med(|X_n - m|)$$

X_n : Enésima concentración del elemento, ppm

m : Mediana del elemento, ppm

med : mediana, ppm

Para el cálculo de los valores de fondo se utilizan: método MAD, método Upper Whisker y método de frecuencia acumulada.

3.3.1. Método MAD

En este método se utiliza el valor MAD para obtener los valores de fondo asociados, como se muestra a continuación

$$VF = \text{Mediana} \pm 2 \times MAD$$

3.3.2. Método Upper Whisker

Consiste en usar el bigote superior de la caja de Tukey.

$$VF = Q_3 + 1.5 \times IQR$$

IQR: Rango intercuartílico ($Q_3 - Q_1$) donde Q hace referencia a cuartil y el subíndice indica el número de cuartil

3.3.3. Método de frecuencia acumulada

Este método asume el valor de fondo como el límite superior del intervalo de confianza del 95% de la media de la distribución normal del valor medio más bajo.

3.4. Índices ecológicos

En este trabajo se calcularon los valores de fondo con los métodos previamente descritos, sin embargo, los resultados finales expuestos de índices ecológicos fueron calculados con los valores de fondo establecidos para la corteza terrestre superior debido a la profundidad habitual de las mineras. Dichos valores fueron definidos por McLennan en el año 2001 y se encuentran expresados en ppm. A continuación, en la Tabla 2 se exponen los valores de fondo utilizados.

Tabla 2
Valores de fondo para la corteza terrestre
en la región de Valparaíso

Elemento	Valor de fondo, ppm
As	1.5
Ba	550
Cd	98
Co	17
Cu	25
Hg	1000
Pb	17
Sb	0.2
Sr	350
V	107

Con los valores expuestos se calculan: índice de geoacumulación, factor de enriquecimiento y factor de contaminación.

3.4.1. Índice de geo-acumulación (*Igeo*)

En base al contenido medio del elemento y el valor de fondo del elemento se obtiene el índice de geoacumulación con la siguiente fórmula;

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1.5 \times B_n}$$

Igeo: Índice de geoacumulación, adimensional.

C_n: Contenido medio del elemento en el suelo, ppm.

B_n: Valor de fondo estimado en el suelo, ppm.

Luego, con el índice de geo-acumulación ya calculado para cada punto muestreado se califica si el suelo se encuentra contaminado o no y en qué grado, esto se realiza con la Tabla 3.

Tabla 3
Rango para índice de geoacumulación

Criterio	Rango
Prácticamente sin contaminar	$I_{geo} = < 0$
No contaminado a moderadamente contaminado	$0 < I_{geo} < 1$
Moderadamente contaminado	$1 < I_{geo} < 2$
Moderada a fuertemente contaminado	$2 < I_{geo} < 3$
Muy contaminado	$3 < I_{geo} < 4$
Muy a extremadamente contaminado	$4 < I_{geo} < 5$
Extremadamente contaminado	$I_{geo} > 5$

3.4.2. Factor de enriquecimiento (*EF*)

El factor de contaminación relaciona las concentraciones en estudio con una concentración de referencia

$$EF = \frac{C_i / CA_{li}}{C_b / CA_{lb}}$$

EF: Factor de enriquecimiento, adimensional.

C_i: Concentración del elemento en estudio, ppm.

CA_{li}: Contenido de Al como elemento de referencia, ppm.

C_b: Contenido de referencia o de fondo del elemento obtenido por el método *background*, ppm.

CA_{lb}: Contenido de referencia o el valor de fondo de Al, ppm.

3.4.3. Factor de contaminación (*CF*)

El factor de enriquecimiento corresponde a la relación entre la concentración del elemento en estudio y el contenido de referencia o de fondo del elemento obtenido a través del método *background*, es decir;

$$CF = \frac{C_i}{C_b}$$

Con los resultados del factor de contaminación para todos los elementos, se procede a clasificar de acuerdo a la Tabla 4, para luego transformar estos resultados en porcentajes. Posteriormente, se realiza un gráfico circular para cada elemento con la finalidad de visualizar de forma más gráfica el nivel de contaminación por cada elemento.

Tabla 4
Rangos y criterio para Factor de contaminación

Criterio	Rango
Contaminación baja	$CF < 1$
Contaminación moderada	$1 < CF < 3$
Contaminación considerable	$3 < CF < 6$
Contaminación muy alta	$CF > 6$

3.4.4. Grado de contaminación

Con el fin de obtener el grado de contaminación se realiza la sumatoria de los factores de contaminación y en base a este resultado con la ayuda de la tabla 5 se puede indicar de forma cualitativa el grado de contaminación del suelo;

$$C_{deg} = \sum CF$$

C_{deg} : Grado de contaminación, adimensional.

Tabla 5
Rangos y criterios para Grado de contaminación

Criterio	Rango
Baja contaminación	$C_{deg} < 8$
Contaminación moderada	$8 < C_{deg} < 16$
Contaminación considerable	$16 < C_{deg} < 32$
Contaminación muy alta	$C_{deg} > 32$

Adicionalmente, se realizó un mapa interpolado utilizando como atributo de interpolación el grado de contaminación para identificar que zonas eran las más afectadas por la contaminación de metales pesados. Para la realización de este mapa en el *software* QGIS3.

3.4.5. Índice de contaminación integrado (IPI)

Corresponde al promedio de los factores de contaminación calculados para cada uno de los elementos, siendo este un valor adimensional. En base a este valor se puede clasificar el punto muestreado según los criterios expuestos en la tabla 6.

Tabla 6
Rangos y criterios para el índice de contaminación integrado

Criterio	Rangos
Bajo nivel de contaminación	$IPI < 1$
Nivel de contaminación moderado	$1 < IPI < 2$
Alto nivel de contaminación	$2 < IPI < 5$
Índice de contaminación extremadamente alto	$IPI > 5$

3.5. Riesgo para la salud

Para cuantificar el riesgo de exposición se considera que el individuo se encuentra expuesto a los metales del suelo a través de tres vías principales como son la ingesta de tierra y polvo, inhalación de aire y contacto dérmico. Al realizar la evaluación de riesgo para la salud se vinculan los niveles de contaminantes en el ambiente con una probabilidad de efectos tóxicos para una población humana.

3.5.1. Ingestión de tierra y polvo

Con la fórmula que se expone a continuación se calcula la dosis de ingesta diaria promedio del elemento de interés a través de tierra y polvo;

$$ADI_{ing} = C_{soil} \times \frac{IngR \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6}$$

ADI_{ing}: Ingesta diaria promedio de un elemento traza a través de la ingestión de suelo o polvo, mg/kg-día.

C_{soil}: Concentración de elemento traza en el suelo, ppm.

IngR : Tasa de ingestión, kg/día

EF : Frecuencia de exposición, día/año.

ED : Duración de la exposición, años.

BW : Peso corporal del individuo expuesto, kg.

AT : Periodo de tiempo durante el cual se promedia la dosis, día.

3.5.2. Inhalación de partículas

Como se mencionó anteriormente una de las vías de absorción de metales pesados es a través de la inhalación de partículas;

$$ADI_{inh} = C_{soil} \times \frac{InhR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT}$$

ADI_{inh}: Ingesta diaria promedio de un elemento a través de inhalación, mg/kg-día.

InhR: Tasa de inhalación, m³/día.

PEF: Factor de emisión, mg³/día.

3.5.3. Contacto dérmico

La última vía de ingesta utilizada en este informe corresponde a la ingesta por contacto dérmico, la cual es posible cuantificar con la siguiente expresión;

$$ADI_{dermal} = C_{soil} \times \frac{SA \times AF \times AS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6}$$

ADI_{dermal} : Ingesta diaria promedio de un elemento traza a través del contacto dérmico, mg/kg-día.

SA: Área superficial de la piel expuesta, cm²/día.

AF: Factor de adherencia dérmica, mg/cm².

BAS: Factor de absorción dérmica.

3.5.4. Cociente de riesgo (HQ)

El cociente de riesgo corresponde a la relación entre la dosis calculada y la dosis de referencia para cada vía de exposición,

$$HQ = \frac{ADI_i}{RfDi}$$

ADI_i : Dosis calculada para cada vía de exposición, mg/kg-día.

RfDi : Dosis de referencia para cada vía de exposición, mg/kg-día.

3.5.5. Índice de riesgo

Este valor se calcula para tener una mayor evaluación del potencial global de efectos no cancerígenos, estimando así los riesgos combinados.

$$HI = \sum HQ_i$$

3.5.6. Índice de riesgo total cancerígeno

Este valor se calcula solo para los elementos cancerígenos.

$$TCRI = \sum (ADI_{ing} \times SF_{ing}) + \sum (ADI_{dermal} \times SF_{dermal}) + \sum (ADI_{inh} \times SF_{inh})$$

Tabla 7

Factores para el cálculo de dosis de exposición

	PEF (m ³ /kg)	ABS	RfDo (mg/kg/día)	RfDi (mg/kg/día)	RfDd (mg/kg/día)	SFo (mg/kg/día) ⁻¹	SFi (ma/kg/día) ⁻¹	SFd (mg/kg/día) ⁻¹
Cu	1360000000	0.01	0.04	0.04	0.12			
V	1360000000	0.001	0.007		0.00007			
Sr								
Pb	1360000000	0.001	0.0035	0.000525	0.0035			
As	1360000000	0.03	0.0003	0.00012	0.0000086	1.5	15.1	3.66
Sb								
Cd	1360000000	0.001	0.001	0.00001	0.001	0	6.3	0
Hg	1360000000	0.001	0.0003	0.000021	0.0000857			
Co	1360000000	0.01	0.02	0.016	0.00000571		9.8	
Ba	1360000000	0.01	0.002	0.014	0.00014			

4. RESULTADOS

4.1. Análisis exploratorio de datos

En primer lugar, se exponen los histogramas realizados y cada histograma caracteriza a un elemento. Dichos histogramas son presentados desde la Figura 3 a la Figura 12. En ellos es posible observar en el eje x las concentraciones medidas en ppm, mientras que el eje y representa la totalidad de puntos en el rango específico.

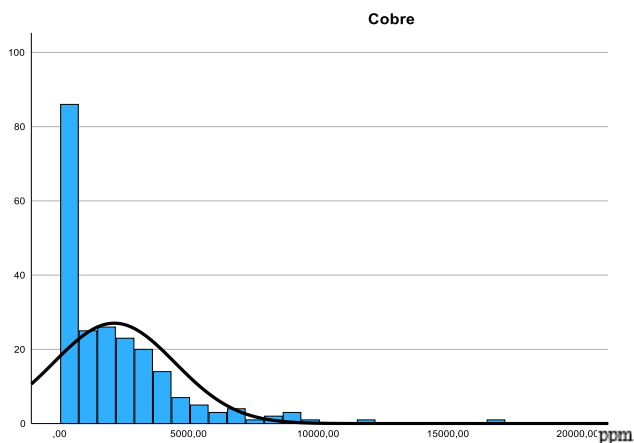


Figura 3: Histograma elemento Cobre.

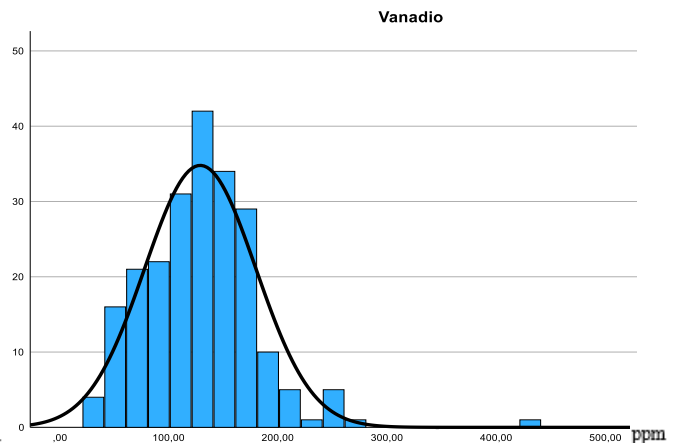


Figura 4: Histograma elemento Vanadio.

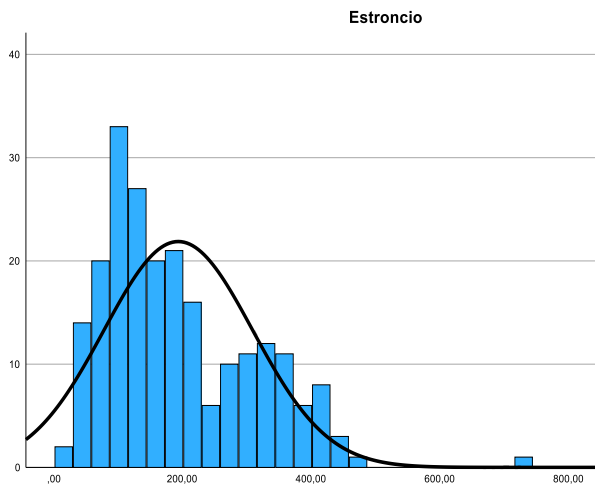


Figura 5: Histograma elemento Estroncio.

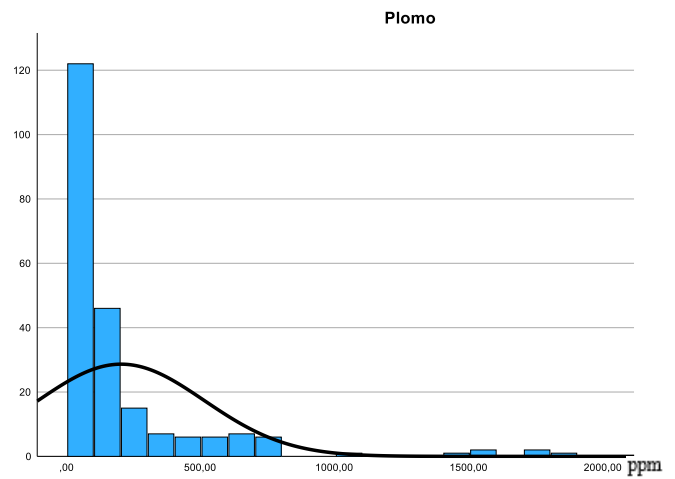


Figura 6: Histograma elemento Plomo.

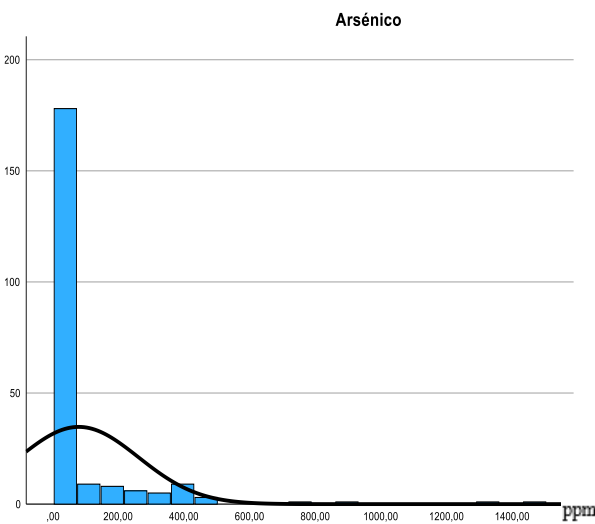


Figura 7: Histograma elemento Arsénico.

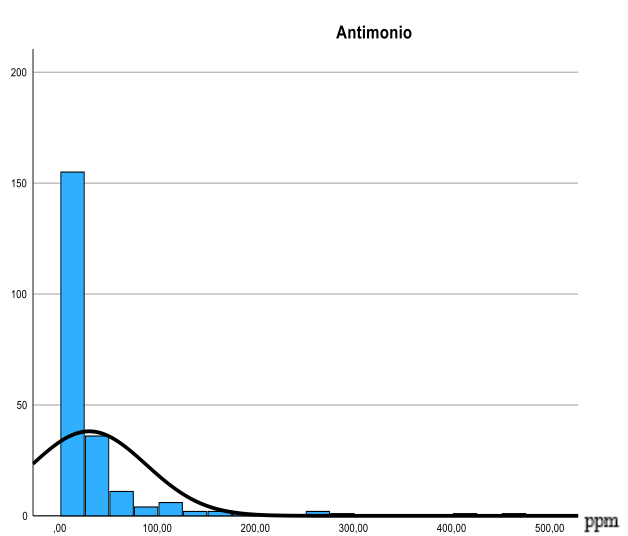


Figura 8: Histograma elemento Antimonio.

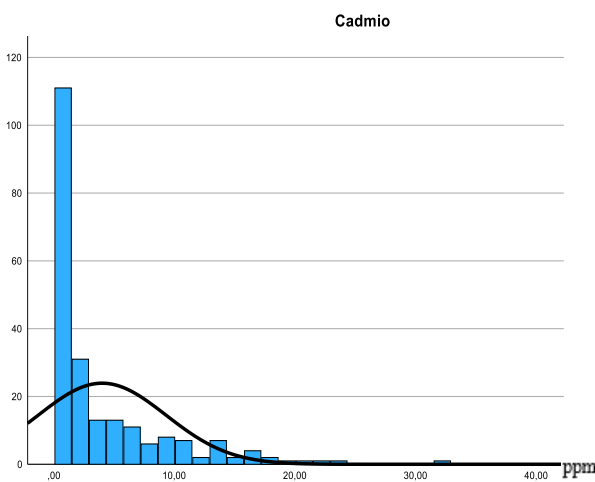


Figura 9: Histograma elemento Cadmio.

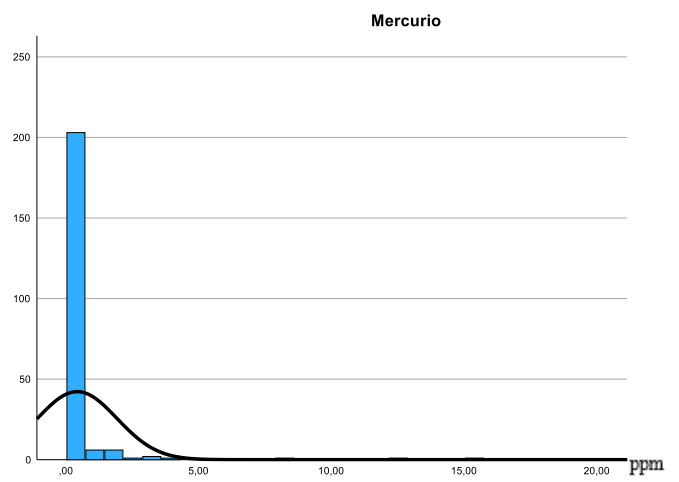
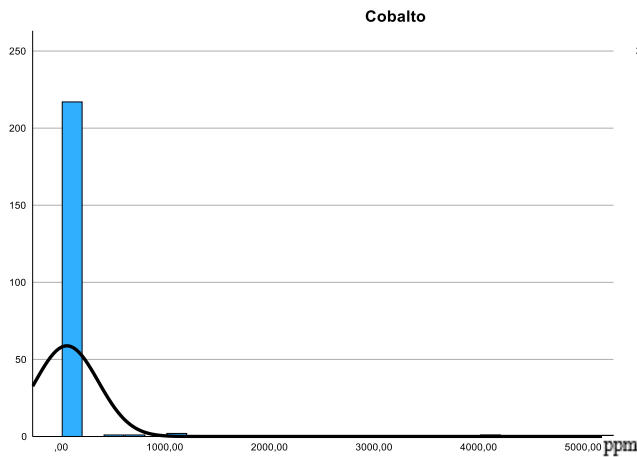
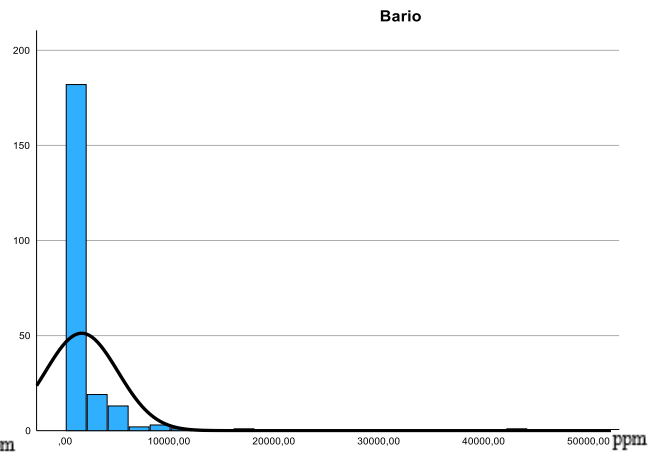
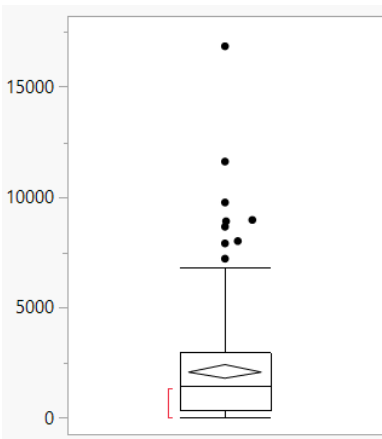
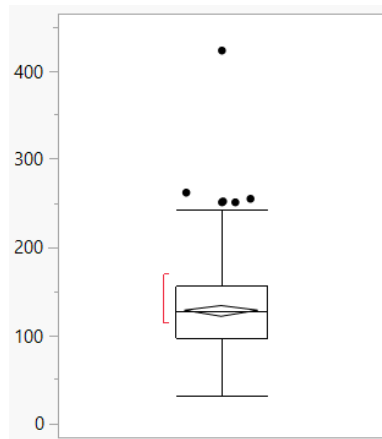
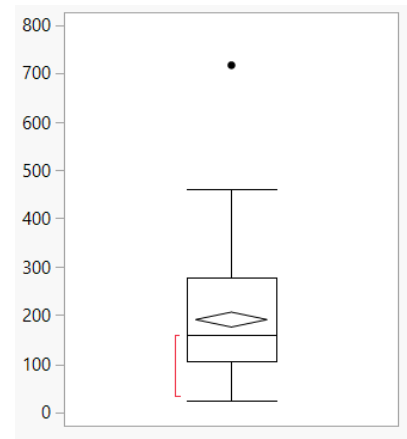
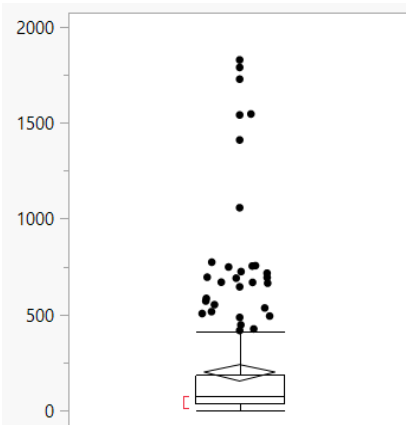
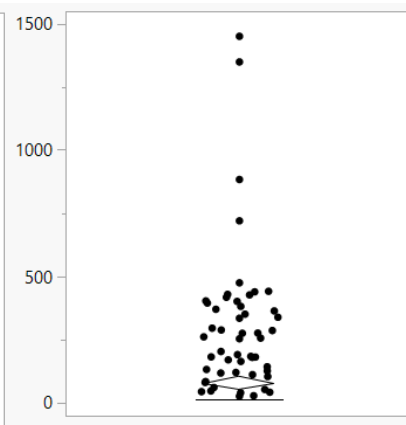
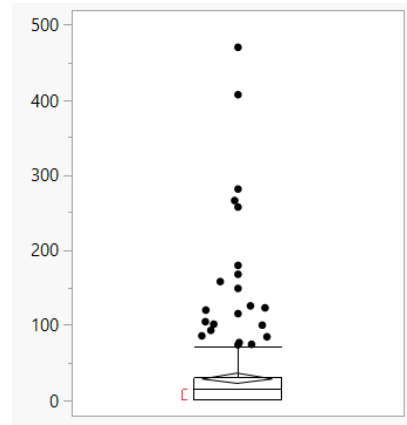


Figura 10: Histograma elemento Mercurio.


Figura 11: Histograma elemento Cobalto.

Figura 12: Histograma elemento Bario.

De igual forma, se presentan desde la Figura 13 a la Figura 22 los diagramas de caja o también llamados boxplot. Estos fueron realizados con el software estadístico JMP. Para la elaboración de estos gráficos se utilizaron todas las concentraciones muestreadas, es decir, se incluyen los datos atípicos que existían en la base de datos de cada elemento. Las concentraciones mencionadas se encuentran en ppm y son las representadas por el eje y.


Figura 13: Boxplot elemento Cobre.

Figura 14: Boxplot elemento Vanadio.

Figura 15: Boxplot elemento Estroncio.

Figura 16: Boxplot elemento Plomo.

Figura 17: Boxplot elemento Arsénico.

Figura 18: Boxplot elemento Antimonio.

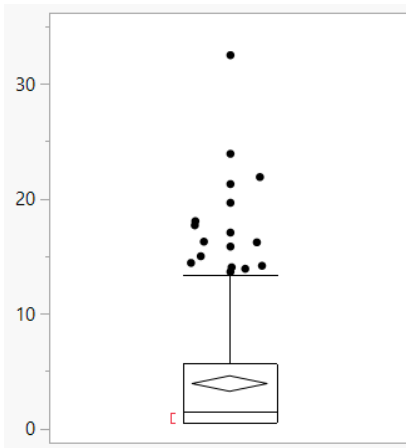


Figura 19: Bloxplot elemento Cadmio.

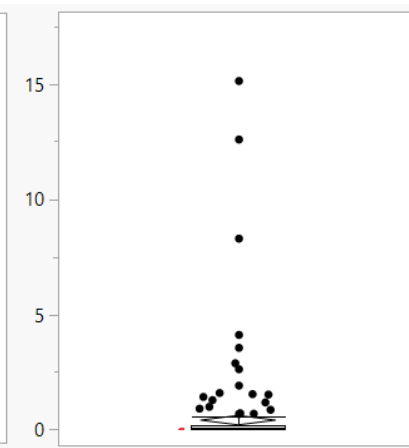


Figura 20: Bloxplot elemento Mercurio.

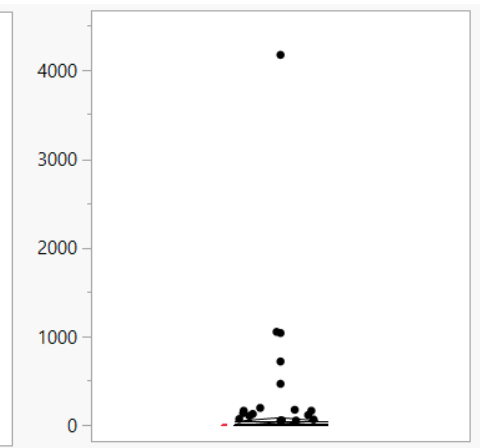


Figura 21: Bloxplot elemento Cobalto.

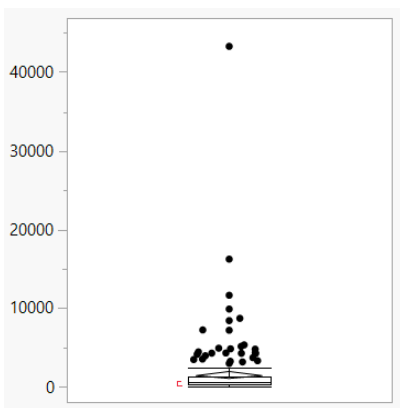


Figura 22: Bloxplot elemento Bario.

4.2. Estadística descriptiva univariada

Tabla 8

Estadística descriptiva metales pesados considerados

Estadístico	As	Ba	Cd	Co	Cu	Hg	Pb	Sb	Sr	V
Media, ppm	76.57	1520.94	3.95	49.12	2082.84	0.41	201.41	29.41	192.22	127.88
Mediana, ppm	10	640.5	1.46	6	1441	0.07	79.50	14.27	160.5	127
Desviación estándar, ppm	181.98	3455.84	5.28	301.06	2338.88	1.49	309.04	58.09	115.67	50.91
Coefficiente de asimetría, adimensional	4.55	8.72	2.11	12.14	2.29	7.65	3.21	4.52	0.93	1.05
Rango, adimensional	1442.59	43250	31.9	4172.5	16828	15.13	1821	469.7	691	391
Mínimo, ppm	10	10	0.5	2.5	12	0.005	6	0.5	26	32
Máximo, ppm	1452.59	43260	32.49	4175	16840	15.14	1827	470.2	717	423

MAD	66.57	1168.86	3.34	46.53	1623.05	0.39	156.4	26.62	91.78	38.26
Primer cuartil, ppm	10	381.75	0.5	2.5	342	0.005	44	0.5	104	96.75
Tercer cuartil, ppm	10	1352	5.69	18	2987	0.25	193	29.81	278.25	157.25
IQR, ppm	0	970.25	5.19	15.5	2645	0.25	149	29.31	174.25	60.5
Percentil 95, ppm	399.88	4858.05	14.97	110.55	6483	1.44	726.6	120.08	408.65	216.95

4.3. Análisis multivariado

A partir de los histogramas expuestos anteriormente, se desprende que los conjuntos de datos no responden a una distribución normal. Además, como se mencionó anteriormente se consideran los valores atípicos. Por estas razones, se realiza el análisis multivariado utilizando la correlación de Spearman.

Tabla 9

Correlación de Spearman, adimensional

	Cu	V	Sr	Pb	As	Sb	Cd	Hg	Co	Ba
Cu	1									
V	-0.18	1								
Sr	-0.10	0.49	1							
Pb	0.26	-0.15	-0.13	1						
As	0.31	-0.15	-0.13	0.9	1					
Sb	0.24	-0.09	-0.23	0.53	0.59	1				
Cd	0.13	0.04	-0.12	0.45	0.44	0.19	1			
Hg	-0.04	0.09	-0.05	0.25	0.13	0.02	0.27	1		
Co	0.17	-0.18	-0.15	-0.02	-0.03	0.03	-0.07	-0.02	1	
Ba	0.06	0.17	0.37	0.25	0.25	0.05	0.21	0.04	-0.04	1

4.4. Análisis de componentes principales (ACP)

El valor obtenido para la Medida de Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo o también llamado KMO es de 0.662.

Tabla 10

Prueba de esfericidad de Bartlett

Aprox. Chi-cuadrado	Gl	Sig.
770,394	45	<0,01

A continuación, en la Figura 23 se muestra el gráfico de sedimentación.



Figura 23: Gráfico de sedimentación, análisis de componentes principales.

4.5. Distribución espacial

La rampa de color mostrada en la Figura 24 indica que tan concentrados se encuentran los elementos en el punto muestreado, correspondiendo el color azul a una concentración menor mientras que las concentraciones más elevadas se muestran de color rojo.



Figura 24: Rampa de color utilizada en los mapas de distribución espacial.

A continuación, desde la Figura 25 a la Figura 34, se representa la distribución espacial para casa uno de los diez elementos de acuerdo a la rampa de color señalada en la Figura 24. Es importante destacar que los valores reflejados en estas figuras se encuentran en ppm.

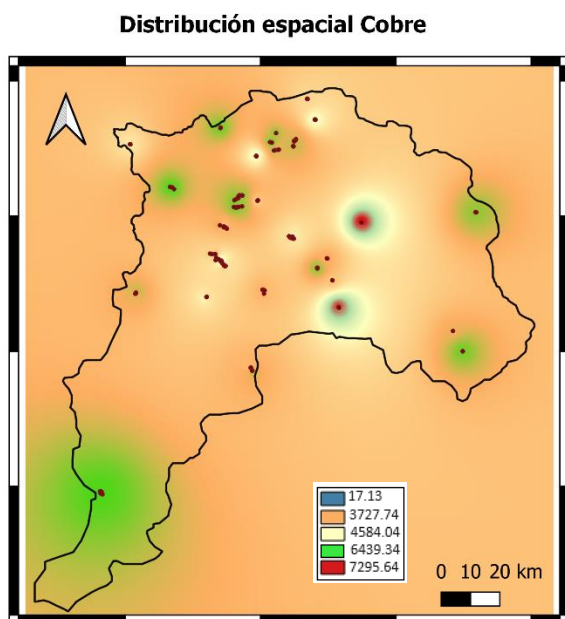


Figura 25: Distribución espacial Cobre, QGIS3.

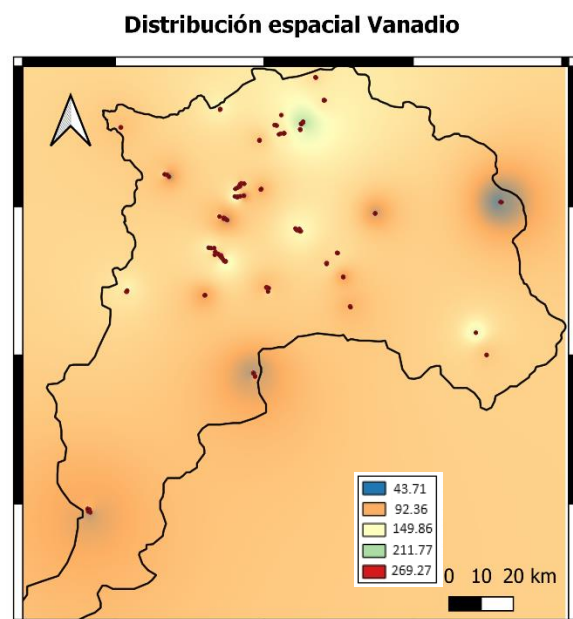


Figura 26: Distribución espacial Vanadio, QGIS3.

Distribución espacial Estroncio

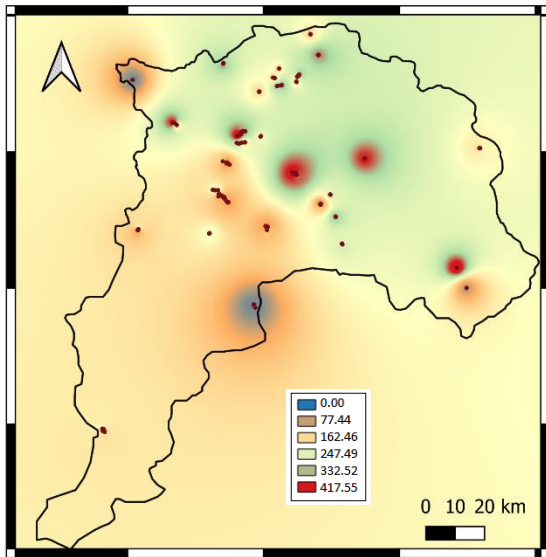


Figura 27: Distribución espacial Estroncio, QGIS3.

Distribución espacial Plomo

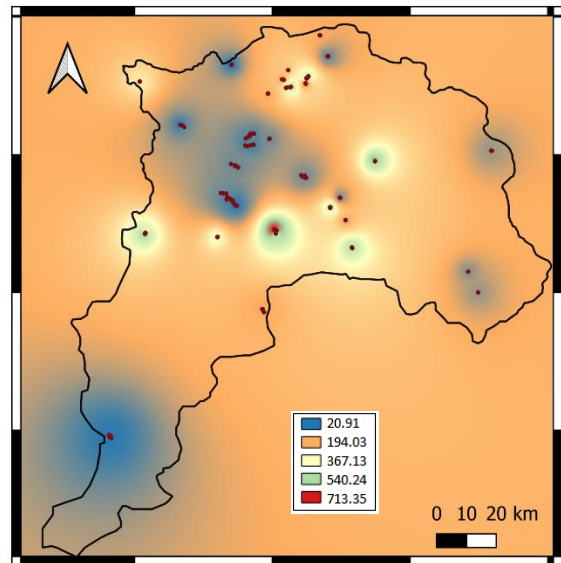


Figura 28: Distribución espacial Plomo, QGIS3.

Distribución espacial Arsénico

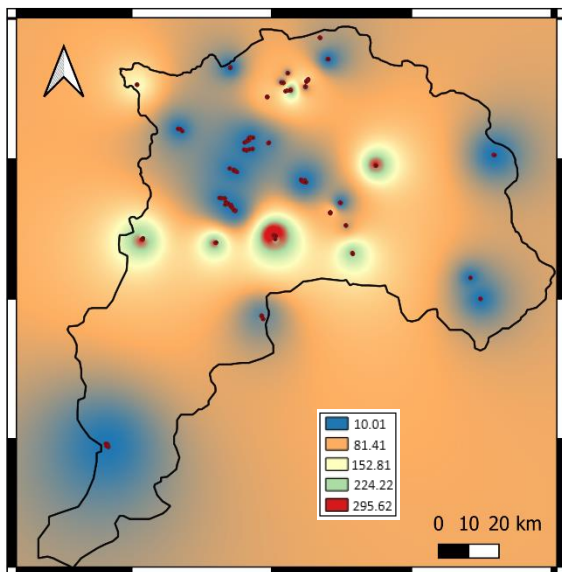


Figura 29: Distribución espacial Arsénico, QGIS3.

Distribución espacial Antimonio

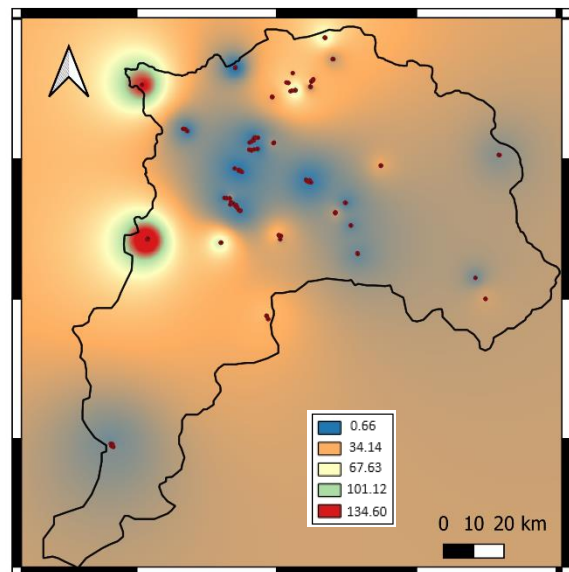


Figura 30: Distribución espacial Antimonio, QGIS3.

Distribución espacial Cadmio

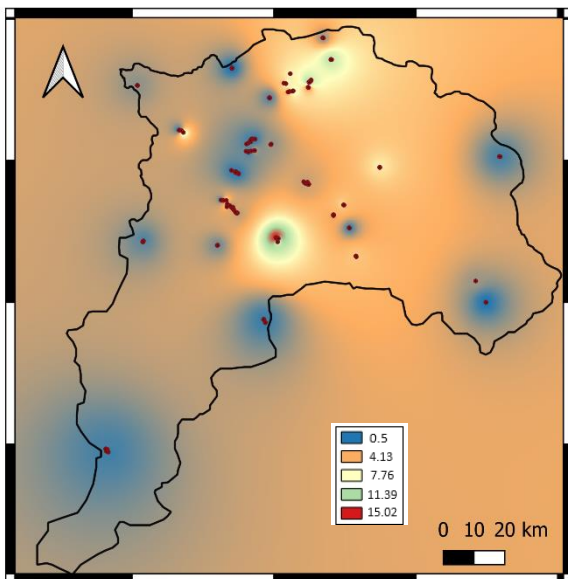


Figura 31: Distribución espacial Cadmio, QGIS3.

Distribución espacial Mercurio

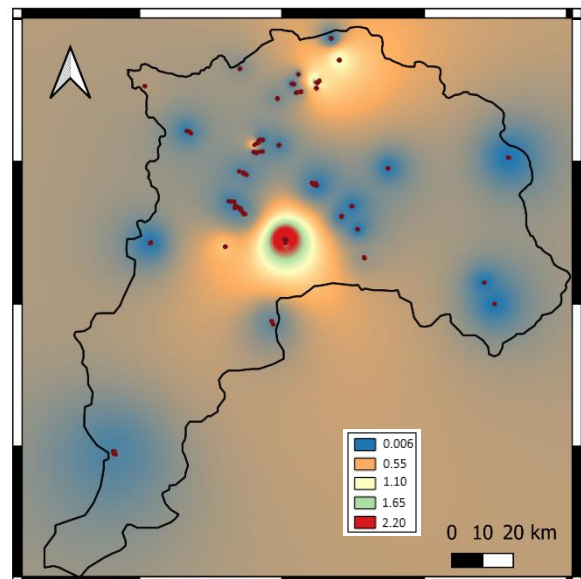


Figura 32: Distribución espacial Mercurio, QGIS3.

Distribución espacial Cobalto

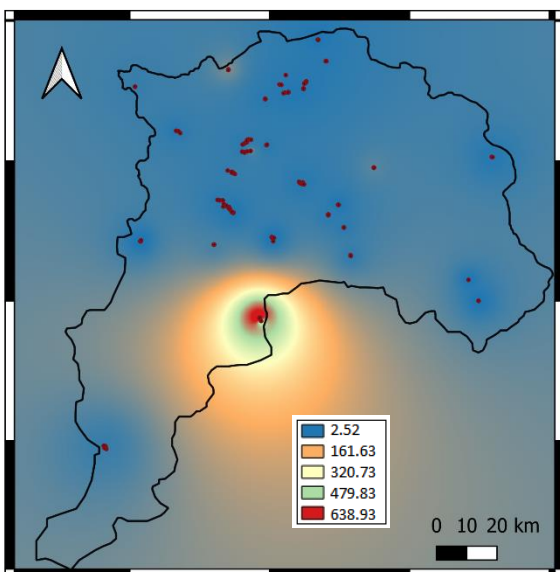


Figura 33: Distribución espacial Cobalto, QGIS3.

Distribución espacial Bario

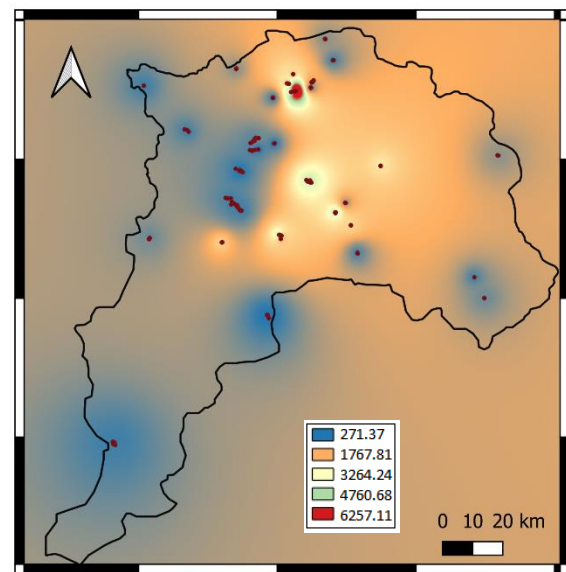


Figura 34: Distribución espacial Bario, QGIS3.

4.6. Valores de Fondo

Tabla 11

Resultados estadísticos descriptivos para valores de fondo para cada elemento.

	As	Ba	Cd	Co	Cu	Hg	Pb	Sb	Sr	V
Media, ppm	76.57	1520.94	3.95	49.12	2082.83	0.4	201.41	29.41	192.22	127.88
Mediana, ppm	10	640.5	1.47	6	1441	0.07	79.5	14.27	160.5	127
Desviación estándar, ppm	181.98	3455.84	5.29	301.06	2338.87	1.5	309.05	58.09	115.67	50.91
Cantidad de datos, adimensional	222	222	222	222	222	222	222	222	222	222
Límite superior, ppm	1.5	550	98	17	25	1000	17	0.2	350	107
Cantidad de datos, adimensional	222	136	0	57	215	0	213	222	25	146
Pérdida (%)	100	61.26	0	25.68	96.84	0	95.95	100	11.26	65.76

4.7. Índices ecológicos

Tabla 12

Resultados índices de geoacumulación para cada elemento según rango

	Igeo = < 0	0 < Igeo < 1	1 < Igeo < 2	2 < Igeo < 3	3 < Igeo < 4	4 < Igeo < 5	Igeo > 5
As	0	0	0	170	2	6	44
Ba	142	33	21	18	6	1	1
Cd	222	0	0	0	0	0	0
Co	182	24	3	7	0	2	3
Cu	11	6	8	22	29	26	119
Hg	1	0	0	0	0	0	0
Pb	21	45	60	40	22	25	7
Sb	0	89	0	0	0	0	133
Sr	221	1	0	0	0	0	0
V	173	48	1	0	0	0	0

Tabla 13

Resultados Factor de Contaminación (CF) para cada elemento según rango

	CF < 1	1 < CF < 3	3 < CF < 6	CF > 6
As	0	0	0	222
Ba	93	82	21	26
Cd	222	0	0	0
Co	161	41	3	12
Cu	7	10	8	196
Hg	1	0	0	0
Pb	8	57	60	94
Sb	0	89	0	133
Sr	195	25	0	0
V	75	145	1	0

Tabla 14
 Grado de contaminación en función del factor de contaminación expresado de forma porcentual

	Baja	Moderada	Considerable	Muy Alta
As	0.00	0.00	0.00	100.00
Ba	41.89	36.94	9.46	11.71
Cd	100.00	0.00	0.00	0.00
Co	72.52	18.47	1.35	5.41
Cu	3.15	4.50	3.60	88.29
Hg	0.45	0.00	0.00	0.00
Pb	3.60	25.68	27.03	42.34
Sb	0.00	40.09	0.00	59.91
Sr	87.84	11.26	0.00	0.00
V	33.78	65.32	0.45	0.00

A continuación, se presentan gráficos circulares asociados a la tabla anterior. En cada gráfico se puede visualizar el grado predominante de contaminación teniendo como causa el elemento indicado.

■ Baja ■ Moderada ■ Considerable ■ Muy Alta ■ Baja ■ Moderada ■ Considerable ■ Muy Alta ■ Baja ■ Moderada ■ Considerable ■ Muy Alta

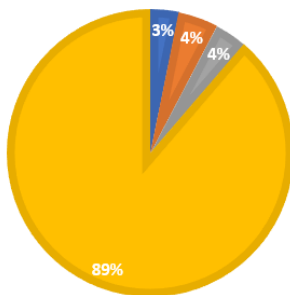


Figura 35: Gráfico circular CF para Cobre.

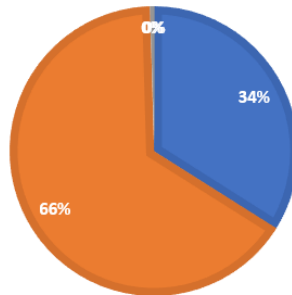


Figura 36: Gráfico circular CF para Vanadio.

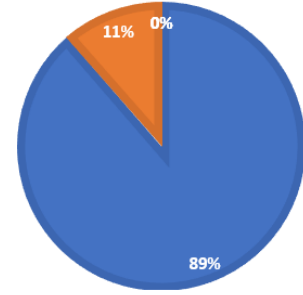


Figura 37: Gráfico circular CF para Estroncio.

■ Baja ■ Moderada ■ Considerable ■ Muy Alta ■ Baja ■ Moderada ■ Considerable ■ Muy Alta ■ Baja ■ Moderada ■ Considerable ■ Muy Alta

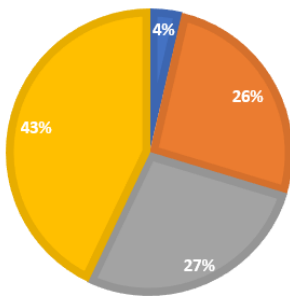


Figura 38: Gráfico circular CF para Plomo.

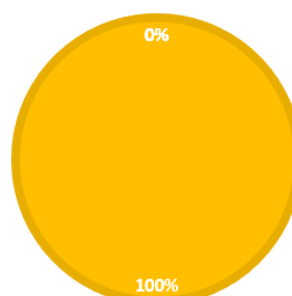


Figura 39: Gráfico circular CF para Arsénico.

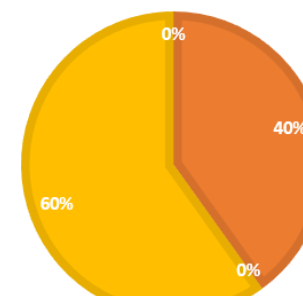


Figura 40: Gráfico circular CF para Antimonio.

■ Baja
 ■ Moderada
 ■ Considerable
 ■ Muy Alta
 ■ Baja
 ■ Moderada
 ■ Considerable
 ■ Muy Alta
 ■ Baja
 ■ Moderada
 ■ Considerable
 ■ Muy Alta

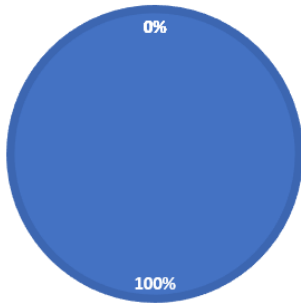


Figura 41: Gráfico circular CF para Cadmio.

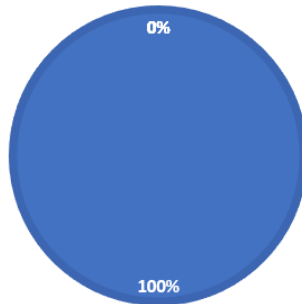


Figura 42: Gráfico circular CF para Mercurio.

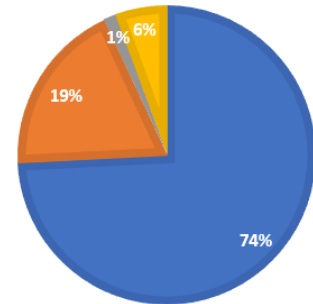


Figura 43: Gráfico circular CF para Cobalto.

■ Baja
 ■ Moderada
 ■ Considerable
 ■ Muy Alta

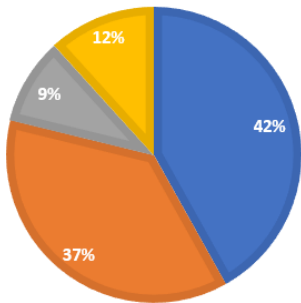


Figura 44: Gráfico circular CF para Bario.

La Figura 45 muestra el mapa de distribución espacial realizado con los valores del grado de contaminación.

Distribución espacial Grado de contaminación

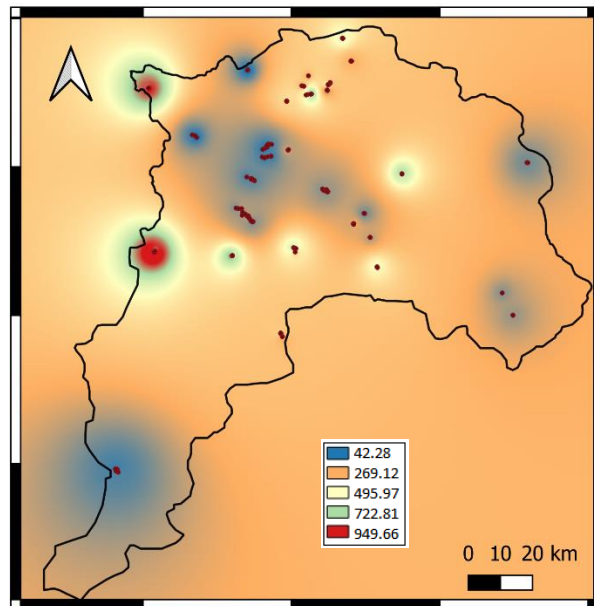


Figura 45: Mapa distribución espacial del grado de contaminación.

4.8. Riesgo para la salud

4.8.1. Riesgo para la salud en niños

Tabla 15
Estadísticos Índice de Riesgo (HI) en niños

	Cu	Pb	As	Cd	Hg	Co	Ba
Media	0.672	0.738	12.826	0.051	0.017	3.111	13.612
Desv. estándar	0.755	1.132	30.482	0.068	0.064	19.068	30.929
Percentil 50	0.465	0.291	1.675	0.019	0.003	0.380	5.732
Percentil 75	0.962	0.699	1.675	0.073	0.011	1.140	11.968

Tabla 16
Estadísticos para el índice de riesgo total cancerígeno (TCRI) en niños.

	As	Cd	Co
Media	1.7699E-03	8.8958E-09	1.7197E-07
Desv. Estándar	4.2064E-03	1.1903E-08	1.054E-06
Percentil 50	2.3114E-04	3.2971E-09	2.1006E-08
Percentil 75	2.3114E-04	1.2744E-08	6.3017E-08

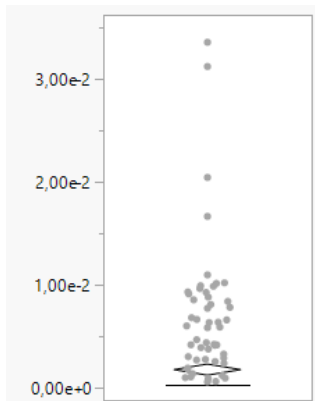


Figura 46: Boxplot TCRI para Arsénico en niños.

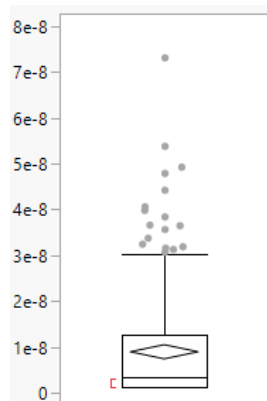


Figura 47: Boxplot TCRI para Cadmio en niños.

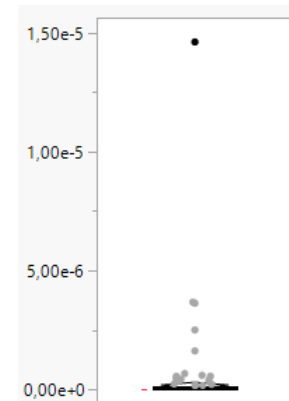


Figura 48: Boxplot TCRI para Cobalto en niños.

4.8.2. Riesgo para la salud en adultos

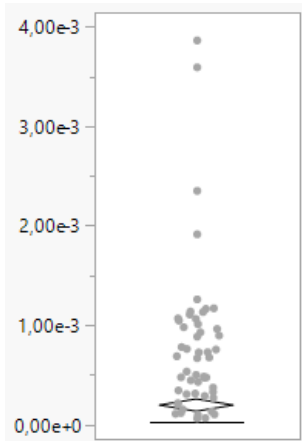
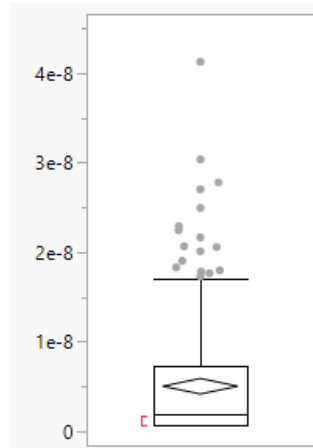
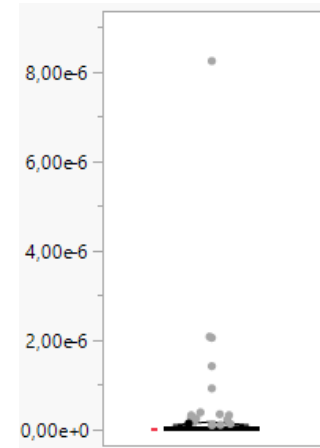
Tabla 17
Estadísticos Índice de Riesgo (HI) en adultos

	Cu	Pb	As	Cd	Hg	Co	Ba
Media	0.072	0.079	1.810	0.006	0.002	0.474	1.636
Desv. estándar	0.081	0.122	4.301	0.007	0.007	2.902	3.716
Percentil 50	0.050	0.031	0.236	0.002	0.000	0.058	0.689
Percentil 75	0.104	0.075	0.236	0.008	0.001	0.174	1.438

Tabla 18

Estadísticos para el índice de riesgo total cancerígeno (TCRI) en adultos

	As	Cd	Co
Media	0.00020353	5.0164E-09	9.6977E-08
Desv. Estándar	0.0004837	6.7124E-09	5.9436E-07
Percentil 50	2.658E-05	1.8593E-09	1.1845E-08
Percentil 75	2.658E-05	7.1865E-09	3.5536E-08


Figura 49: Boxplot TCRI para Arsénico en adultos.

Figura 50: Boxplot TCRI para Cadmio en adultos.

Figura 51: Boxplot TCRI para Cobalto en adultos.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo a los diez histogramas realizados y expuestos, se concluye que ninguno de los elementos sigue una distribución normal lo cual se debe a la presencia de valores atípicos en los conjuntos de datos.

De los resultados obtenidos en el análisis univariado se afirma que el elemento con concentraciones más altas en el área de estudio del Cobre y a su vez presenta una desviación estándar mayor a 2338, por lo cual es posible afirmar que la dispersión de los datos es muy alta. Por otro lado, el elemento con mayor variabilidad en sus concentraciones es bario ya que su desviación estándar es la más elevada.

El cobre es el elemento que presenta una mayor diferencia entre los valores de media y mediana, esto indica la presencia de valores atípicos muy extremos. Por el contrario, el mercurio presenta la menor diferencia entre estos estadísticos, por ende, la existencia de valores atípicos es casi nula. Esto también se puede visualizar en los diagramas de caja.

De acuerdo a los resultados de la prueba de esfericidad de Bartlett. El valor de KMO es 0.662, por ello y dado el valor de significancia, se puede realizar el análisis de componentes principales. La gráfica de sedimentación sigue el patrón ideal, de esto se desprende que los componentes que siguen al tercer componente explican una proporción muy pequeña de variabilidad, dado esto la importancia disminuye.

Si bien se utilizó el método Varimax para el análisis de componentes principales, no se logra del todo el objetivo de que una variable sea representativa de solo una dimensión, ya que tanto en la matriz de componente y la de componente rotado (revisar anexo) existen dos elementos que se encuentran asociados a las tres dimensiones.

De la matriz de correlaciones se desprende que el conjunto de datos presenta relación distante entre sí, ya que los valores de correlación son negativos. Los elementos con relación más distantes son estroncio con antimonio.

En base a la distribución espacial, bario es el elemento en el cual las concentraciones medidas distan menos unas de otras o la dispersión entre ellas es menor ya que en su distribución espacial se observa un color más homogéneo, mientras todos los otros elementos en sus respectivos mapas presentan zonas circulares rojas que indican que en esos puntos hay concentraciones más altas.

La contaminación por antimonio es la mayor en el conjunto de datos con 133 puntos extremadamente contaminados, en segundo lugar, se tiene la contaminación por cobre tiene un total de 26 casos de muy a extremadamente contaminado y 119 casos extremadamente contaminado.

En cuanto al factor de contaminación (CF) siguen destacando con un grado elevado de contaminación el cobre y el antimonio. Sin embargo, en este caso el arsénico lidera con un 100% de sus puntos con contaminación muy alta.

Haciendo una revisión de los gráficos circulares para factor de contaminación, se visualiza que el cadmio y mercurio no significan un riesgo de contaminación en la zona de estudio puesto que el 100% de los puntos presenta una baja contaminación por estos elementos. De forma contraria, el cobre presenta el número más alto de puntos muestreados contaminado con un total del 89% de ellos.

Las comunas más contaminadas son Los Nogales, La Ligua, Cabildo y Catemu según la base de datos son comunas que cuentan con un gran número de depósitos de relaves inactivos y abandonados. Existe la posibilidad de que esto último influya en el grado de contaminación presente, ya que no existe mayor control de este tipo de relaves y en el caso de relaves abandonados, si se desconoce el dueño es probable que sea aún más la información desconocida.

En base al índice de riesgo en los elementos arsénico, cobalto y bario si configuran un riesgo para la salud no cancerígenos en niños, ya que los valores obtenidos son mayores a 1. El cobre también implica un riesgo en este caso, sin embargo, en un grado un poco menor que los elementos ya mencionados. Además, existe un riesgo para la salud cancerígeno en niños por arsénico, ya que los valores obtenidos son mayores a 10^{-4} .

Es correcto afirmar que ninguno de los elementos configura un riesgo en la salud no cancerígeno en adultos. Esto se debe a que los resultados se encuentran por debajo de 1. En cuanto al riesgo cancerígeno para la salud en adultos, si bien ninguno de los elementos entrega valores de riesgo, no hay que desviar la atención del arsénico que si se encuentra cercano al riesgo.

6. COMENTARIOS

Es importante contar a nivel nacional con leyes más estrictas en cuanto a proyectos mineros se trate. Hoy en día la reglamentación en Chile exige la cuantificación y mitigación del riesgo medioambiental y social que genera un proyecto minero durante las etapas de construcción y funcionamiento, sin embargo, sería de buen uso que se exija al igual que en otros territorios como Arizona y Nuevo México la evaluación, cuantificación y mitigación de riesgo en etapas de cierre y post-cierre de proyectos mineros, incluso barajando un considerable rango de años en los que la compañía responsable continúe monitoreando los posibles riesgos medioambientales.

En Perú se realizó un estudio similar al presentado, este estudio recibe el nombre de “Riesgo para la salud por metales pesados en productos agrícolas cultivados en áreas abandonadas por la minería aurífera en la Amazonía peruana, Soto et al.”. La importancia de este estudio para este trabajo radica en que los resultados obtenidos son similares, incluso en el grado de contaminación por mercurio y cadmio que es casi nulo mientras que Arsénico y Plomo si implican un riesgo. La zona de estudio del trabajo realizado en Perú igual corresponde a una zona minera y como se sabe Perú es otra de las potencias a nivel mundial en minería. De estas similitudes se desprende y concluye que la industria minera si significa un riesgo latente para la salud humana, ya que en ambos casos se demostró que los suelos se encuentran contaminados por metales pesados y esta contaminación puede llegar de alguna forma u otra a perjudicar a los seres humanos.

7. REFERENCIAS

- Bautista Zúñiga, F. (1999). *Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados*. México: Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán.
- Brizuela, J. y Jiménez, Y. (2012). *Metodologías aplicadas para el establecimiento de los niveles de referencia para metales pesados en la evaluación de la contaminación en suelos*. Avances en Química. Vol. N°7, pp. 101-109.
- Galán, E. y Romero, A. (2008). *Contaminación de suelos por metales pesados*. Revista de la sociedad mineralógica española. Vol. N°10, pp. 48-60.
- Jiménez, R. (2017). *Introducción a la contaminación de suelos*. Madrid, España. Ediciones Mundi-Prensa.
- Kotthoff, K. (2020). *Mineralogía de depósitos de relave en Chile y relación con yacimientos de origen: potencial para la recuperación de elementos de valor*. (Tesis de Magister). Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- McLennan, S. (2001) Relationships between the Trace Element Composition of Sedimentary Rocks and Upper Continental Crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Rodríguez, N., McLaughlin, M. y Pennock, D. (2019). *La contaminación del suelo: una realidad oculta*. Food & Agriculture Org.
- Portal Educar Chile. Instituto Geográfico Militar. (S.f). *Mapa geomorfológico de Valparaíso*. Obtenido en fecha 30 de Mayo 2023, desde el sitio web: https://centroderecursos.educarchile.cl/bitstream/handle/20.500.12246/39322/5ta_region_geomorfologia.gif?sequence=1&isAllowed=y
- Portal educativo Mapade.org. Equipo de redacción profesional. (2016). *Mapa de Valparaíso*. Escrito por: Redacción Mapade.org. Obtenido en fecha 05, 2023, desde el sitio web: <https://www.mapade.org/valparaido.html>
- Ramírez, N. (2007). *Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves*. Servicio Nacional de Geología Y minería. Departamento de seguridad minera.
- Real Academia Española. *Diccionario de la lengua española*, 23. ed., [versión 23.6 en línea]. <<https://del.rae.es>> [18/04/2023]
- Real Academia Española. *Diccionario de la lengua española*, 23. ed., [versión 23.6 en línea]. <<https://del.rae.es>> [20/04/2023]
- Real Academia Española. *Diccionario de la lengua española*, 23. ed., [versión 23.6 en línea]. <<https://del.rae.es>> [27/03/2023]
- Rivano, S. (1996). *Geología de las Hojas Quillota y Portillo*. Subdirección Nacional de Geología. Chile.
- Solano, A. (2005). *Movilización de metales pesados en residuos y suelos industriales afectados por la hidrometalurgia del cinc*. (Tesis doctoral). Universidad de Murcia, Murcia.
- Soto, M., Rodríguez, L., Olivera, M., Arostegui, V., Colina, C. y Garate, J. (2020). *Riesgos para la salud por metales pesados en productos agrícolas cultivados en áreas abandonadas por la minería aurífera en la Amazonia peruana*. Scientia Agropecuaria. Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo, Perú.
- Tejió, J. (2020). *History of the periodic table of the elements*. Anales de la Real Academia de Doctores de España. Vol. N°5, pp. 241-259.
- Thomashausen, S., Maenling, N. y Mebratu-Tsegaye, T. (2018). *A comparative overview of legal frameworks governing water use and waste water discharge in the mining sector*. Columbia center on Sustainable Investment. Columbia, Estados Unidos.



UCSC

Simposio de Habilitación Profesional
Departamento de Ingeniería Civil
Abril 2025

Torres, R. (2020). *Relaves Mineros, Legislación Comparada*. Asesoría Técnica Parlamentaria. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Santiago, Chile.