

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Relación entre la química presente en biomuestras (cabello) de habitantes del municipio de Montelíbano (Córdoba, Colombia), las características geoquímicas del territorio y residuos de la minería en Cerro Matoso.

Autora: Lesly Zaray Diaz Lizarazo

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geóloga

Directora: Katherine Andrea León Palma

Geóloga MSc

Codirector: Álvaro Javier Idrovo Velandia

Médico PhD

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Geología

Geología

Bucaramanga

2025

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi nona Nancy, mi mamá y mi hermano Alejo, quienes han sido mi apoyo incondicional, mi refugio y mi mayor fuente de inspiración. Su amor, consejos y aliento han sido fundamentales en cada etapa de mi vida, guiándome y motivándome a seguir adelante sin importar los desafíos.

A mi directora y codirector, por su paciencia, orientación y dedicación durante todo este proceso. Sus enseñanzas han sido clave para mi crecimiento académico y profesional, y su compromiso ha dejado una huella imborrable en mi formación. También extendo mi gratitud a todas las docentes que, con su conocimiento y pasión por la ciencia, han enriquecido mi aprendizaje y fomentado mi curiosidad por explorar nuevos caminos. A todas las mujeres de mi vida que me han hecho la mujer que soy hoy, gracias por su ejemplo, fortaleza y apoyo.

A Maria Fernanda, Galixmar y Gissell quienes con su amistad, compañía y risas hicieron que este viaje fuera inolvidable y significativo. A Juan Pablo, por todo el amor, apoyo y comprensión, gracias por creer en mí y demostrarme que en compañía todo es mejor. El tiempo compartido y los momentos vividos los atesoro con gran cariño.

Por último, pero no menos importante quiero darle las gracias a todas las instituciones que permitieron que llegara hasta este momento y a la realización de este proyecto, a la Universidad industrial de Santander, a la escuela de Geología, al Ministerio de Ciencias y Tecnología e Innovación, al Laboratorio de ICP-MS del Departamento de Química de la Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro, Brasil, a los participantes del proyecto “Evaluación de la exposición a mezclas de contaminantes ambientales y efectos en salud en

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

población rural de tres departamentos” y a todas las demás personas y organizaciones que de alguna u otra manera hicieron parte.

A todos ustedes, gracias por ser parte de este camino.

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a:

Mi nona Nancy por enseñarme a ser lo que hoy soy, por su amor incondicional, por su confianza y por siempre creer en mí; siempre vas a estar incluida en mis sueños.

Y a mi nono Beto, por seguirme cuidado a pesar de no estar en este mundo y porque sé que te fuiste teniendo la plena seguridad que iba a lograrlo todo.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Tabla de contenido

Introducción	14
1. Localización del área de estudio	16
2. Planteamiento del Problema y/o Justificación	17
3. Objetivos	19
3.1. Objetivo General	19
3.2. Objetivos Específicos.....	19
4. Marco Teórico.....	19
4.1. Marco Geológico	19
4.1.1. Geología Estructural	19
4.1.2. Geomorfología	20
4.1.3. Estratigrafía.....	20
4.2. Marco Geoquímico	25
4.3. Mineralizaciones	34
4.4. Uso de Suelo y Actividades antrópicas.....	35
4.5. Marco Geomédico.....	37
5. Antecedentes	38
5.1. Monitoreo en poblaciones.....	38
5.2. ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry)	38
5.3. Valores de referencia para concentraciones en cabello.	40
5.4. Elementos potencialmente tóxicos.....	41
5.5. Presencia de REEs en humanos	43
5.6. Residuos de la minería a cielo abierto en la mina Cerro Matoso S.A.	44
6. Metodología	45
6.1. Etapa 1. Búsqueda bibliográfica	45
6.2. Etapa 2: Muestreo (No probabilístico).....	45
6.3. Etapa 3: Análisis estadístico	46
6.4. Etapa 4: Comparación de biomuestras con la geología del área.....	46
6.5. Etapa 5: Elaboración del documento final	46
7. Resultados	47
7.1. Estadística	49
7.2. Características composicionales de las Formaciones Geológicas y suelo de la zona.....	56
8. Discusión.....	59

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

9. Conclusiones	63
10. Recomendaciones	64
Referencias bibliográficas.....	66
Apéndice	73

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio.	17
Figura 2. Mapa geológico de Montelíbano, Córdoba, a partir de las planchas 81, 82 y 91 escala 1:100.000 del SGC y los datos de centros poblados de Montelíbano. Direccionamientos del aire de Montelíbano registrados por Aeropuerto de Montelíbano.	24
Figura 3. Mapa de la localización aproximada de los perfiles meteorizados muestreados y el esquema de las capas meteorizadas que los conforman.....	25
Figura 4. Fotografía de la zona de la mina de Cerro Matoso S.A. por la cual pasa el río Ure.	30
Figura 5. Ubicación de los puntos de muestreo (Perfiles CMM-01 y CMM-03) tomados en la mina Cerro Matoso S.A.	32
Figura 6. Mapa del uso de suelos del municipio de Montelíbano, Córdoba.....	37
Figura 7. Elementos analizados por el laboratorio de ICP-MS del Departamento de Química PUC- Río.....	39
Figura 8. Elementos potencialmente tóxicos.	42
Figura 9. Elementos con el 15% o más de los datos por encima del valor de referencia superior.	48
Figura 10. Elementos potencialmente tóxicos con anomalía positiva.	48
Figura 11. Comparación entre los datos del presente estudio y los valores de referencia para concentraciones en cabello proporcionados por el laboratorio de ICP-MS de la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro.....	53
Figura 12. Comparación entre las concentraciones en cabello de REEs de los habitantes de Montelíbano con las de los habitantes de Shanxi.	54
Figura 13. Comparación entre los contenidos de REEs en biomuestras, en la Fm. Cansona y los valores de enriquecimiento cortical.	56

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Figura 14. Elementos en anomalía positiva y REEs presentes en la litología aflorante, el perfil de suelo meteorizado y/o como producto de la minería. 58

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Lista de tablas

Tabla 1. Elementos Traza de la Fm. Cansona.....	21
Tabla 2. Resultados del análisis de espectroscopia de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente.....	28
Tabla 3. Valores de referencia superiores para las concentraciones de cientos elementos indicadas en la ley 2115.....	29
Tabla 4. Resultados de la cromatografía iónica ICP-AES (ppm) en muestras de aguas en la mina Cerro Matoso S.A. resaltando aquellos elementos que presentan una concentración superior a las indicadas en la ley 2115.....	29
Tabla 5. Mineralogía por DRX de las muestras A-O.....	31
Tabla 6. Resultados de XFR en las muestras analizadas definiendo el contenido de los óxidos mayores (porcentajes en peso) y los contenidos de Al, Fe y Mn en ppm.....	31
Tabla 7. Descripción litológica del perfil CMM-01 y CMM-03.....	32
Tabla 8. Contenido de elementos mayores y menores en las capas del perfil laterítico (% en peso).....	33
Tabla 9. Concentraciones de los elementos presentes de los 6 miembros analizados(% en peso).	34
Tabla 10. Resumen de elementos con anomalía positiva presentes en la geología, perfiles lateríticos y agua de Montelíbano.....	34
Tabla 11. Límites de Detección y Límites de Cuantificación del Laboratorio.....	40
Tabla 12. Valores de referencia para concentraciones en cabello.....	41
Tabla 13. Descripción de elementos potencialmente tóxicos presentes en las lateritas, suelo y rocas de Montelíbano y la mina Cerro Matoso S.A.....	42
Tabla 14 Contenido de REEs (ppb) en muestras de cabello de los residentes de Shanxi, China.	44

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Tabla 15. Resumen de los resultados del análisis de ICP-MS.....	47
Tabla 16. Diagramas de cajas y bigotes de los elementos potencialmente tóxicos en anomalía positiva que presentan sesgo positivo.	50
Tabla 17. Diagrama de cajas y bigotes de los elementos potencialmente tóxicos en anomalía positiva que presentan sesgo negativo.	51
Tabla 18. Concentraciones de REEs en la corteza terrestre (ppm).....	55
Tabla 19. Elementos traza de la formación Cansona con los elementos en anomalía positiva de los habitantes de Montelíbano resaltados en gris y las REEs en rojo.	57

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Lista de apéndices

Apéndice A. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Aluminio.	73
Apéndice B. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Aluminio.	73
Apéndice C. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Antimonio. .	73
Apéndice D. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Antimonio.	74
Apéndice E. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Arsénico.	74
Apéndice F. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Arsénico.	74
Apéndice G. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Bario.	75
Apéndice H. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Bario.	75
Apéndice I. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Boro.	76
Apéndice J. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Boro.	76
Apéndice K. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Cromo.	76
Apéndice L. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Cromo.	77
Apéndice M. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Estaño.	77
Apéndice N. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el estaño.	77
Apéndice O. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Hierro.	78
Apéndice P. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Hierro.	78
Apéndice Q. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Manganeso. 79	
Apéndice R. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Manganeso.	79
Apéndice S. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Mercurio.	79
Apéndice T. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Mercurio.	80
Apéndice U. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Molibdeno. .	80
Apéndice V. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Molibdeno.	80
Apéndice W. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Níquel.	81

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Apéndice X. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Níquel.	81
Apéndice Y. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Selenio.	82
Apéndice Z. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Selenio.	82
Apéndice AA. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Vanadio. ...	82
Apéndice BB. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Vanadio.	83
Apéndice CC. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Yodo.	83
Apéndice DD. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Yodo.	83
Apéndice EE. Recopilación de la distribución geológica de los elementos con anomalía positiva su impactos en la salud y como impacta la minería e industria en su concentración.	84

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Resumen

Título: Relación entre la química presente en biomuestras (cabello) de habitantes del municipio de Montelíbano (Córdoba, Colombia), las características geoquímicas del territorio y residuos de la minería en Cerro Matoso.

Autora: Lesly Zaray Diaz Lizarazo¹

Palabras clave: Elementos químicos, tierras raras, minería, geoquímica, biomarcadores, Montelíbano, Cerro Matoso, ferróniquel, elementos tóxicos, concentraciones.

El cabello es un biomarcador útil para evaluar la exposición a elementos químicos, ya que refleja la acumulación de sustancias presentes en el ambiente y es de fácil obtención. Este estudio se desarrolla a partir de parte de los datos del proyecto "Evaluación de la exposición a mezclas de contaminantes ambientales y efectos en salud en población rural de tres departamentos", financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología y hace parte del Programa de Investigación en Salud Ambiental para Colombia. El área de estudio es Montelíbano, Córdoba, Colombia, una zona influenciada por la minería de lateritas niquelíferas en la mina Cerro Matoso S.A. Se tomaron muestras de cabello de 78 habitantes expuestos a metales pesados y elementos de tierras raras (REEs), las cuales fueron analizadas mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) en el Laboratorio de la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro.

Los resultados mostraron la presencia de REEs en las biomuestras y elementos cuyas concentraciones superan el límite superior de referencia en cabello en más del 15% de las personas muestreadas, como en el caso del Yodo cuya media es 5,3 y su límite superior de referencia 0,6 ppm. Estas anomalías pueden deberse tanto a fuentes antropogénicas, como la actividad minera y la dispersión de residuos en el aire, agua y suelo, como a la geoquímica natural del territorio. En particular, la presencia de elementos de tierras raras en las muestras de cabello es un hallazgo relevante, ya que su origen podría estar vinculado a la geología, a la presencia de un complejo ofiolítico de la región y la meteorización de las rocas. Este estudio busca establecer relaciones entre la geoquímica del entorno y la química en biomuestras humanas, aportando información clave para la geología médica, la salud ambiental y la toma de decisiones en políticas de ordenamiento territorial.

¹ Universidad Industrial de Santander, Geología. Directora: Katherine Andrea León Palma. MSc.
Codirector: Álvaro Javier Idrovo Velandia. PhD.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Abstract

Title: Relationship between chemistry in biomaterials (hair) of inhabitants of the municipality of Montelíbano (Córdoba, Colombia), the geochemical characteristics of the territory, and mining residues in Cerro Matoso.

Author: Lesly Zaray Diaz Lizarazo¹

Keywords: Chemical elements, rare earth elements, mining, geochemistry, biomarkers, Montelíbano, Cerro Matoso, ferronickel, toxic elements, concentrations.

Hair is a useful biomarker for assessing exposure to chemical elements, since it reflects the accumulation of substances present in the environment and is easily obtained. This study is based in part on data from the project “Assessment of Exposure to Mixtures of Environmental Contaminants and Health Effects in Rural Populations of Three Departments,” funded by the Ministry of Science and Technology, and is part of the Environmental Health Research Program for Colombia. The study area is Montelíbano, Córdoba, Colombia, a region influenced by lateritic nickel mining at the Cerro Matoso S.A. mine. Hair samples were collected from 78 residents exposed to heavy metals and rare earth elements (REEs), which were analyzed by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) at the laboratory of the Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

The results showed the presence of REEs in the biomarker and elements whose concentrations exceed the upper reference limit in hair in more than 15% of the sampled individuals, for example Iodine, whose mean concentration is 5.3 ppm compared to an upper reference limit of 0.6 ppm. These anomalies may stem both from anthropogenic sources, such as mining activity and the dispersion of residues in air, water, and soil, and from the natural geochemistry of the area. In particular, the detection of rare earth elements in the hair samples is a significant finding, as their origin may be linked to the local geology, the presence of an ophiolitic complex in the region, and rock weathering. This study aims to establish relationships between the geochemistry of the environment and the chemistry in human biomaterials, providing key information for medical geology, environmental health, and land-use policy decision-making.

¹ Universidad Industrial de Santander, Geology. Thesis supervisor: Katherine Andrea León Palma. MSc.

Co-supervisor: Álvaro Javier Idrovo Velandia. PhD.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Introducción

El ser humano ha estado en contacto con múltiples elementos químicos a lo largo de su relación con el entorno, de los cuales algunos, denominados oligoelementos (Fe, Zn, Cu, Mn, Co, Mo, Se, I, Cr, V, Ni, Si, Li, Sn, F), son esenciales en concentraciones traza (menos del 0,1 %) para el correcto funcionamiento de numerosas reacciones bioquímicas, mientras que otros, como los metales pesados (Pb, Cd, Hg), pueden bioacumularse y resultar tóxicos si se exceden ciertos umbrales (*Ruiz, 2014*).

El cuerpo capta estos elementos de acuerdo con su disponibilidad ambiental, vía de exposición (ingesta, inhalación, dermal) y propiedades fisicoquímicas, de modo que las concentraciones elevadas pueden originarse tanto en actividades antrópicas (contaminación industrial, agrícola o minera), como en procesos naturales vinculados a la geología local. En este sentido, la mineralogía y la química de las rocas influyen directamente en la composición del suelo, el agua y el aire, e incluso pueden transferirse al nivel trófico de los alimentos (*Jarup, 2003*).

El 99% de la composición química del cuerpo humano se basa en cuatro elementos principales: carbono, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno. El resto está presente en cantidades traza (menos del 0.1%) y corresponde a los oligoelementos (Fe, Zn, Cu, Mn, Co, Mo, Se, I, Cr, V, Ni, Si, Li, Sn, F) que actúan como catalizadores en enzimas y transportadores celulares. Sin embargo, la sobreexposición a estos oligoelementos o la presencia de metales pesados puede provocar desde alteraciones en el desarrollo neurológico hasta daños renales y cardiovasculares (*Smith y Jones, 2010; Saz et al., 2010*).

Según Ruiz Cruz (2014) el cabello es un tejido de acumulación ideal y la obtención de muestras de cabello es sencilla: no es invasiva aparte de ser económica. Este mismo autor explica las ventajas del uso la técnica de espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

(ICP-MS por sus siglas en inglés) las cuales son principalmente en la alta precisión y bajos límites de detección, analizando un gran número de elementos químicos de manera simultánea en pocos minutos, siendo así una técnica ideal en el análisis de elementos traza en diferentes tipos de muestras incluido el cabello.

Esta investigación hace parte del proyecto “*Evaluación de la exposición a mezclas de contaminantes ambientales y efectos en salud en población rural de tres departamentos*”, del Programa de Investigación en Salud Ambiental para Colombia. Fue financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (contrato 905-2019) y es un trabajo conjunto de la Universidad del Rosario, la Universidad del Sinú, el Instituto Nacional de Salud y la Universidad Industrial de Santander. Uno de los tres municipios que se estudiaron en el proyecto mencionado es Montelíbano, el cual se ubica en el departamento de Córdoba, y fue seleccionado por la presencia de un depósito de laterita níquelífera, generada a partir de la meteorización de rocas que conforman un complejo ofiolítico, que dio origen a la mina Cerro Matoso S.A. y expuso a los habitantes de Montelíbano a residuos de la minería que llegan a dispersarse en el agua, aire, suelo y afectar otros factores del entorno.

Se planteó analizar el impacto de esta explotación minera en la química de sus habitantes, a partir del análisis elemental en muestras de cabello tomadas por el equipo médico de la investigación. Estas muestras fueron analizadas en el Laboratorio de ICP-MS del Departamento de Química de la Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro, Brasil.

Se conformó una base de datos que contiene los análisis de un grupo de 78 habitantes del municipio de Montelíbano, a cada muestra de cabello se le midió la concentración de 68 elementos mediante ICP-MS. De estos elementos, se profundizó en los elementos de tierras raras y en los elementos cuyo valor supera la concentración máxima en cabello según los valores de referencia.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

A partir de estos datos, este trabajo tiene como objetivo indagar si el contenido químico en las muestras de cabello de los habitantes de la zona de estudio está relacionado con la distribución geoquímica natural del territorio y/o están influenciados por la actividad de la mina Cerro Matoso S.A.

1. Localización del área de estudio

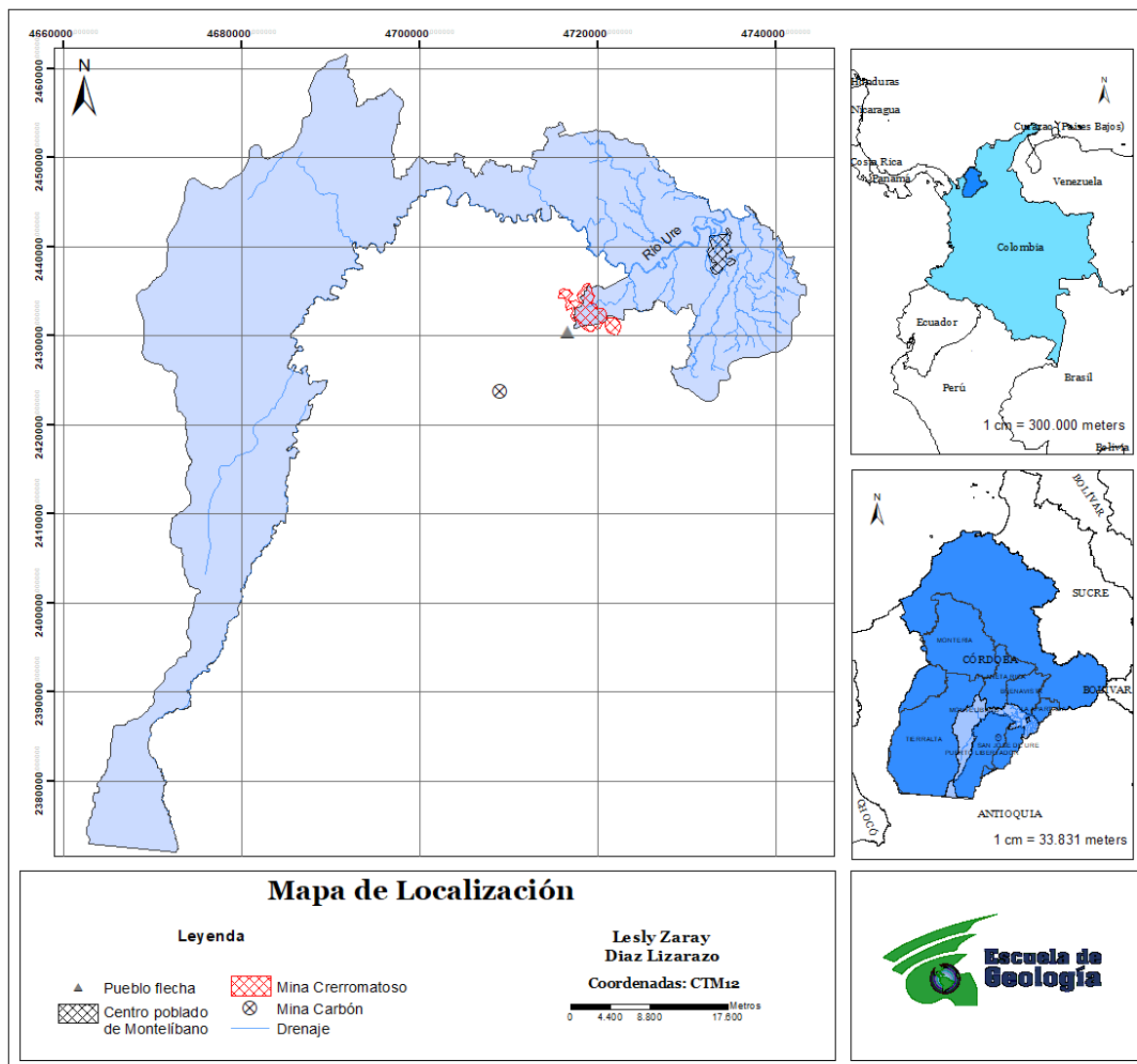
La zona de estudio se ubica en la región Caribe Colombiana, en el municipio Montelíbano, departamento de Córdoba, sus límites municipales son: Tierralta al Oeste, Cáceres al Este, Planeta Rica y Buenavista al Norte y Puerto Libertador y San José de Uré al Sur. (**Figura 1**). Las coordenadas planas del municipio estudiado según el nuevo sistema de coordenadas para Colombia **CTM12**, son CTM12 están dados por X1 (Oeste), X2 (Este), Y1 (Norte) y Y2 (Sur).

ESTE/OESTE	X1: 4'662.556	X2: 4'743.365
NORTE/SUR	Y1: 2'461.416	Y2: 2'371.958

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Figura 1

Mapa de localización de la zona de estudio.



2. Planteamiento del Problema y/o Justificación

El cuerpo humano necesita de elementos químicos para su desarrollo y normal funcionamiento, el desbalance de estos elementos puede generar diferentes enfermedades y las causas de estos desbalances van desde la falta de consumo hasta el exceso de este (Goyer, 1990; Smith y Jones, 2010). Una de las maneras en las que se generan concentraciones anómalas de ciertos elementos en el cuerpo humano se pueden dar por las actividades antrópicas relacionadas

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

con la sobre exposición a estos elementos, las actividades pueden ser el uso de plaguicidas, el uso de químicos para optimizar procesos o los residuos químicos de la minería; y aunque estas actividades puedan generar estas concentraciones anómalas, no son las únicas, la geología de la zona donde se habita también puede afectar generando exposición a los elementos presentes en las litologías y el suelo (*Martínez et al., 2023; Wang et al., 2022; Zhang et al., 2023*).

En la comunidad indígena Zenú, ubicada cerca de la mina de ferroníquel Cerro Matoso en Montelíbano, Córdoba, se detectaron niveles elevados de arsénico y presencia de otros metales pesados, como óxido de níquel (NiO) y mercurio; además en los habitantes se reportaron lesiones cutáneas sugerentes de hidroarsenicismo, hipertensión arterial, trastornos reproductivos y cardiovasculares, síntomas consistentes con los efectos conocidos de la exposición crónica a estos metales pesados (*Idrovo et al. 2017*).

Una de las actividades económicas del municipio de Montelíbano, Córdoba, es la minería, ya que allí se localiza la mina a cielo abierto Cerro Matoso S.A. la cual explota ferroníquel y genera residuos que presuntamente contaminan el agua y el aire alrededor de la mina (*Castrillón, 2023; Idrovo et al, 2017*).

Debido a esta situación, se planteó analizar el impacto de esta actividad minera en los habitantes de esta zona, a partir del muestreo de cabello ya que este acumula compuestos, metales, pesticidas y oligoelementos, lo que lo convierte en un indicador adecuado de los contaminantes ambientales (*Eisa y Mars, 2021; Iaquinta et al. 2019*).

Se plantea entender el origen de los elementos anómalos presentes en las muestras de cabello, considerando la caracterización química de los residuos de la minería y la geología de la zona.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Determinar la correlación entre la química de los residuos de la minería de Cerro Matoso y el origen de ciertos elementos secundarios y traza en muestras de cabello de habitantes de Montelíbano, Córdoba.

3.2. Objetivos Específicos

Señalar los elementos con anomalía positiva en las muestras de cabello usando los límites definidos para la existencia de ciertos elementos en el cuerpo humano.

Definir el origen de las anomalías positivas de estos elementos considerando la geología, la geoquímica de la zona y la química de los residuos de la minería en Cerro Matoso.

Describir el comportamiento estadístico en los parámetros de centralización y la desviación estándar en las concentraciones los elementos tóxicos con anomalía positiva del set de datos.

4. Marco Teórico

4.1. Marco Geológico

4.1.1. Geología Estructural

La zona de estudio se encuentra estructuralmente controlada por la falla Cauca – Almaguer la cual pone en contacto la corteza oceánica de la cordillera occidental con el basamento continental de la cordillera central (*Maya y González, 1995*). En esta zona desaparecen las cordilleras central y occidental bajo rocas sedimentarias y depósitos aluviales por lo que se genera una topografía plana y poco elevada y rocas sedimentarias con intensa laterización por las condiciones climáticas de la zona (*Bermúdez et al., 2012*).

Durango et al. (1987) explica las dos fallas que atraviesan la mina, una normal con dirección N30E/75NW que divide el área de la mina en dos bloques: uno enriquecido en Ni y el

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

otro estéril. y otra normal y con dirección perpendicular a la primera falla, que separa el saprolito verde de la peridotita saprolitizada. En la mina Cerro Matoso S.A. a nivel de afloramiento se observan familias de diaclasas N25E/78SE y N72E/75NW asociadas al sistema Cauca Romeral.

4.1.2. Geomorfología

La zona se conforma por llanuras en las que se formaron algunos cerros y colinas, sobre los depósitos aluviales cuaternarios se encuentra el asentamiento urbano de Montelíbano y hacia el suroeste del asentamiento se encuentra la mina Cerro Matoso S.A. con 225 msnm siendo este el punto más elevado del área de estudio (*Bermúdez et al., 2012*).

4.1.3. Estratigrafía

En las planchas 81, 82 y 91, a escala 1:100000 del Servicio Geológico Colombiano se definen las unidades geológicas que afloran en el municipio de Montelíbano, que a continuación se indican de las más antiguas a las más recientes:

Rocas y depósitos sedimentarios

- **Formación Cansona (k5k6-c) (Cretácico Tardío):** compuesta por secuencia de cherts, shales, calizas y Basaltos del Cretácico Superior; mineralógicamente las rocas volcánicas presentan plagioclasa, clinopiroxenos y líticos volcánicos (*Patiño et al., 2019; Barrantes et al., 2017*). De esta formación las rocas sedimentarias corresponden los a sedimentos marinos ubicados en la parte superior del complejo ofiolítico del cauca (*Tobón, 2018*).

Tabla 1*Elementos Traza de la Fm. Cansona.*

Elementos traza (ppm)	Ba	Ce	Cr	Cs	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Ge	Hf	Ho	La	Lu	Nb	Nd	Pr	In
	409	12,1	30	0,6	2,44	1,79	0,8	13,4	2,66	-5	1,9	0,61	6	0,3	3,5	8,9	1,79	0,03
	Th	Tm	U	V	W	Y	Yb	Zr	Ag	Cd	Co	Cu	Li	Mo	Ni	Pb	Sc	Re
	0,8	0,3	0,5	101	-1	17	2,18	66	-0,5	-1	7	81	10	1	3	-2	17	0
	Sb	Sc	Se	Te	Tl	S	C	Rb	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Zn	As	Bi	Hg	
	0,2	9,5	0,3	0,04	0,02	0,07	0,07	16,6	1,91	1	648	0,3	0	60	1,8	0	0,01	

Nota. Adaptado de Memoria Plancha 81, Patiño et al. (2019).

- **Formación San Cayetano (E1E2-sc) (Paleoceno):** compuesta por intercalaciones de limolitas y arenitas finas. Son rocas con cuarzo, feldespatos, biotita, moscovita, líticos metamórficos tipo esquistos - cuarcitas y líticos volcánicos félsicos y máficos (*Patiño et al., 2019*).
- **Formación Maco (E2-ma) (Paleoceno):** secuencia de conglomerados y areniscas líticas naranjas. Presentan cuarzo, feldespato y líticos volcánicos, plutónicos, metamórficos y sedimentarios (*Patiño et al., 2019*).
- **Formación Chengue (E2-ch) (Eoceno):** sucesión de lutitas calcáreas con capas delgadas de calizas y magras. Presenta moscovita, biotita, chert, plagioclasa, cuarzo y líticos metamórficos tipo esquistos (*Patiño et al., 2019*).
- **Formación San Jacinto (E2-sj) (Eoceno):** compuesta por un conglomerado con clastos de pórfidos, granitos y lodolitas calcáreas y unas areniscas conglomeráticas. Presentan una alta concentración de hierro, nódulos de carbón, cuarzo lechoso, líticos no diferenciados y moscovita (*Patiño et al., 2019*).

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

- **Formación Ciénaga de Oro (E3N1-co) (Oligoceno):** secuencia de areniscas y shales. Contiene abundantes fósiles, pellets glauconitizados, moscovita, fragmentos de carbón, cuarzo, feldespatos, líticos de basaltos y lodolitas (*Patiño et al., 2019*).
- **Formación El Carmen (E3N1-ca) (Oligoceno):** conjunto de shales y calizas con bivalvos. Presenta calcita, plagioclasa, sericita, circón, epidota y albita (*Patiño et al., 2019*).
- **Formación El Cerrito (N1-ec) (Neógeno):** secuencia de areniscas con intercalaciones de calizas y shales, altamente fosilíferas. Presenta un manto de carbón al techo, bivalvos, calcita, xilópalo, cuarzo, feldespato, líticos, micas y materia orgánica (*Patiño et al., 2019*).
- **Grupo Sincelejo (Neógeno)**

Se compone por:

- Areniscas conglomeráticas a lodosas (*Bermúdez et al., 2012*).
- Areniscas asociados a la falla Cauca-Almaguer que definen cinturones plegados (*Bermúdez et al., 2012*).
- Cuarzoarenitas finas con niveles arcillosos y gravas (*Bermúdez et al., 2012*).

Estas unidades presentan cuarzo mono y policristalino, plagioclasa, biotita, anfíboles, epidota, clorita, chert y líticos de rocas sedimentarias, metamórficas y un poco de ígneas (*Bermúdez et al., 2012*).

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

- **Terrazas aluviales (Q-t) (Cuaternario):** Conglomerados matriz soportados muy meteorizados, deleznable, guijos a cantos gruesos subredondeados, mal seleccionados, de areniscas líticas, arcillolitas y cuarzo (*Patiño et al., 2019*).
- **Depósitos aluviales (Qal) (Cuaternario):** Niveles arenosos y gravosos, pardos, asociados a los ríos San Jorge, Cauca y otros drenajes; con cantos de neises, rocas intrusivas y chert (*Bermúdez et al., 2012*).
- **Depósitos aluviales recientes (Q-al) (Cuaternario):** compuesto por limos, arenas y gravas (*Patiño et al., 2019*).

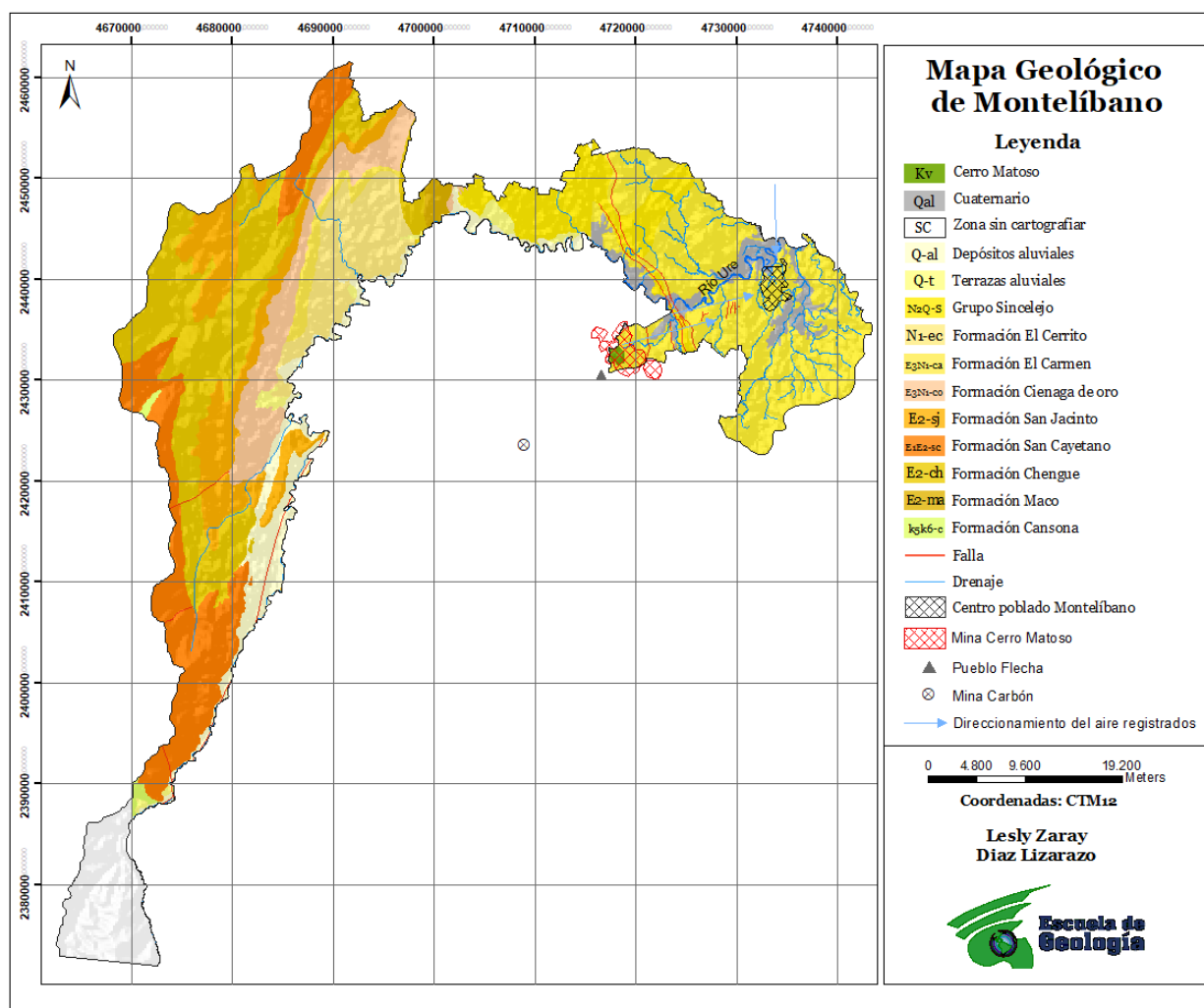
Rocas ígneas

Ultramafita de Cerro Matoso (Ksucm) (Cretácico): peridotitas con desarrollo de lateritas de níquel-hierro. Esta peridotita se clasificó como dunita serpentizada con cristales anhedrales de olivino, piroxenos y espinela diseminada, alterados a minerales del grupo de la serpentinita junto a minerales como magnetita residual, trazas de talco y venas de calcita con garnierita (*Bermúdez et al., 2012*).

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Figura 2

Mapa geológico de Montelíbano, Córdoba, a partir de las planchas 81, 82 y 91 escala 1:100.000 del SGC y los datos de centros poblados de Montelíbano. Direccionamientos del aire de Montelíbano registrados por Aeropuerto de Montelíbano.



Nota. El direccionamiento del aire de Montelíbano no es constante en el tiempo, en datos registrados por el Aeropuerto de Montelíbano la dirección del aire puede a 250°-260°, de Norte a Sur o no tener direccionamiento claro de acuerdo al día en el que se tomen los datos.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

4.2. Marco Geoquímico

Además de entender la geología local de Montelíbano y su mineralogía/química, también es necesario considerar que litologías y mineralogía (química) se presentan en la mina Cerro Matoso S.A. Debido a la ausencia de cobertura del atlas geoquímico en la zona de estudio, no fue posible utilizar información geoquímica del Servicio Geológico Colombiano; por tanto, se consideró la siguiente información:

Gleeson et al. (2004) realizaron la descripción y muestreo de dos perfiles meteorizados dentro de la mina Cerro Matoso S.A. con diferentes concentraciones de Ni, la ubicación de estos perfiles se observa en la **Este mismo** estudio realizó nueve análisis químicos de agua: cuatro alrededor de la mina incluyendo dos del río Ure, un pozo y un arroyo; así como cinco al interior de la mina de Cerro Matoso S.A., abarcando manantiales y trincheras, siendo analizadas por cromatografía iónica e ICP-AES. Sus resultados se observan en la **Tabla 4** y en estos se resaltan aquellas concentraciones que superan los límites permitidos en la ley 2115 (Calidad del agua para consumo humano del 2021), los límites definidos en esa ley se observan en la **Tabla 3** . Con esta información podemos identificar contenidos químicos en el agua para poder evaluar si existe una relación entre los niveles de ciertos elementos en las biomuestras y su presencia en el agua de zonas cercanas a la mina.

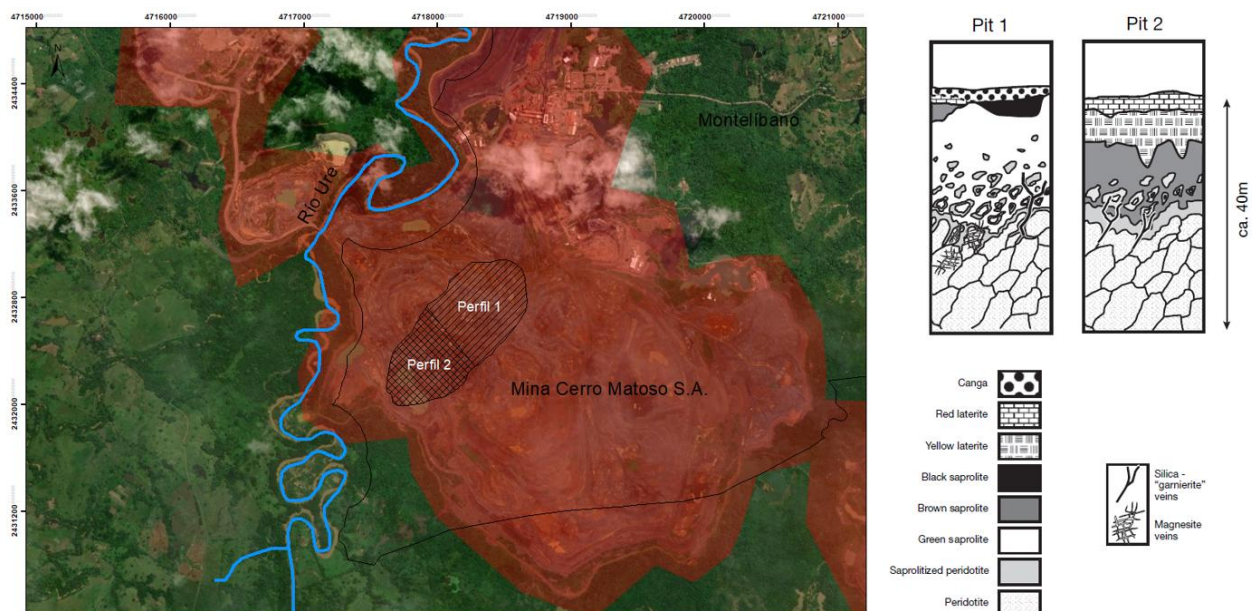
QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Figura 3. Los perfiles se conforman por 8 capas (ganga, laterita roja, laterita amarilla, saprolito negro, saprolito marrón, saprolito verde, peridotita saprolitizada y peridotita) y por dos tipos de venas, una de sílice y garnierita y otra de magnesita. De estos perfiles se obtuvieron 50 muestras que fueron analizadas por espectroscopia de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (*ICP-AES*) determinando 21 elementos, cuyos resultados se observan en la **Tabla 2**, esta investigación nos aporta datos sobre la química de las lateritas y suelo. Este mismo estudio realizó nueve análisis químicos de agua: cuatro alrededor de la mina incluyendo dos del río Ure, un pozo y un arroyo; así como cinco al interior de la mina de Cerro Matoso S.A., abarcando manantiales y trincheras, siendo analizadas por cromatografía iónica e ICP-AES. Sus resultados se observan en la **Tabla 4** y en estos se resaltan aquellas concentraciones que superan los límites permitidos en la ley 2115 (Calidad del agua para consumo humano del 2021), los límites definidos en esa ley se observan en la **Tabla 3** . Con esta información podemos identificar contenidos químicos en el agua para poder evaluar si existe una relación entre los niveles de ciertos elementos en las biomuestras y su presencia en el agua de zonas cercanas a la mina.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Figura 3

Mapa de la localización aproximada de los perfiles meteorizados muestreados y el esquema de las capas meteorizadas que los conforman.



Nota. Adaptado de Gleeson et al. (2004).

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Tabla 2

Resultados del análisis de espectroscopia de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente.

Sample	Al ₂ O ₃ (wt %)	Fe ₂ O ₃ (wt %)	MgO (wt %)	CaO (wt %)	MnO (wt %)	Ni (wt %)	Cr (wt %)	Co (ppm)	Ba (ppm)	V (ppm)	Sr (ppm)	Y (ppm)
Pit 1												
Magnetic canga	7,39	73,55	0,35	<0,01	0,0539	0,862	1,68	48	<1	<3	<2	<2
Magnetic canga	6,29	83,86	0,46	<0,01	0,466	1,139	1,46	364	<1	<3	<2	<2
Nodular canga	10,15	77,15	0,7	<0,01	0,1895	0,881	1,25	410	<1	12	<2	<2
Yellow laterite	9,58	65,61	0,99	<0,01	0,9336	1,122	1,95	1424	95	28	<2	8
Black saprolite	10,2	67,59	0,99	<0,01	1,2408	1,991	1,86	2009	<1	<3	<2	<2
Oxided black saprolite	9,06	73,58	0,71	<0,01	0,4018	1,962	2,46	264	<1	45	<2	18
Black saprolite	13,3	71,81	0,83	<0,01	0,5166	1,369	1,52	375	<1	39	<2	<2
Black saprolite / Tachylite	6,72	50,59	0,95	<0,01	0,6598	1,948	1,33	1133	<1	<3	<2	<2
Black saprolite / Tachylite	4,57	55,83	0,66	<0,01	1,3648	1,61	1,59	630	<1	<3	<2	<2
Tachylite	6,57	44,96	3,06	0,08	0,3482	2,663	3,26	983	54	165	21	28
Tachylite	3,89	25,28	17,44	0,21	0,1445	4,283	1,47	892	100	92	46	62
Tachylite	2,94	22,91	3,78	0,15	1,6573	6,139	0,62	1032	104	63	44	21
Tachylite	2,74	21,53	1,84	<0,01	0,3624	1,686	1,07	580	41	89	12	10
Green saprolite	0,96	15,18	11,07	0,19	0,062	18,516	0,58	355	38	<3	30	<2
Green saprolite	0,67	11,43	12,43	0,19	0,1693	4,323	0,42	188	71	34	26	3
Green saprolite	3,11	21,87	3,78	0,14	1,4902	5,305	0,61	1002	88	61	39	21
Peridotite	0,39	9,01	42,66	0,28	0,1217	0,262	0,29	131	9	10	<2	2
Peridotite	0,38	9,03	41,92	0,35	0,1203	0,256	0,28	130	18	14	4	2
Peridotite	0,44	9,11	42,14	0,44	0,1316	0,26	0,28	133	28	15	5	2
Veins	16,95	62,04	0,77	<0,01	0,0963	1,044	1,091	307	<1	<3	<2	<2
Magnesite veins	0,03	0,44	41,2	6,54	0,18	0,023	0,027	13	42	<3	54	<2
Magnesite veins	0,81	9,48	34,74	1,4	0,09	0,267	0,288	126	40	15	11	<2
Magnesite veins	0,02	0,31	44,93	2,6	0,07	0,018	0,029	8	13	<3	15	<2
Silicate vein	0,28	10,92	33,88	<0,01	0,0964	1,362	0,317	140	39	<3	<2	<2
Silicate vein	1,34	59,35	0,71	0,2	3,484	0,721	0,508	450	14	<3	5	<2
Silicate vein	1,62	22,1	1,37	<0,01	0,6562	0,897	0,456	315	39	42	9	8
Silicate vein	0,36	8,3	28,85	0,26	0,1082	0,234	0,248	101	101	9	21	2
Silicate vein	5,23	64,43	1,05	<0,01	0,2567	2,743	0,833	643	27	<3	<2	28
Silicate vein	0,45	10,68	17,57	<0,01	0,1099	7,54	0,158	509	23	3	7	20
Silicate vein	0,18	3,14	31,92	0,12	0,0798	0,216	0,129	82	70	<3	21	2
Pit 2												
Red laterite	8,33	69,45	1,13	<0,01	0,9871	1,941	2,11	1870	<1	63	<2	<2
Red laterite	8,55	69,03	1,14	<0,01	0,3337	1,83	1,96	570	6	<3	<2	<2
Yellow laterite	0,92	21,85	0,34	<0,01	0,2119	0,465	0,73	488	38	33	<2	4
Yellow laterite	2,33	20,99	0,62	<0,01	0,0801	0,422	0,74	82	18	42	<2	2
Brown saprolite	1,33	38,56	0,43	<0,01	0,6566	0,98	1,2	1087	115	83	<2	19
Brown saprolite	2,81	68,59	0,81	<0,01	1,0514	3,923	2,77	1903	127	<3	<2	9
Brown saprolite	2,85	28,83	1,38	<0,01	0,1798	1,135	1,29	634	17	74	<2	7
Alteration	1,39	11,24	24,2	0,45	0,0747	1,185	0,31	134	52	7	<2	<2
Saprolitized peridotite	1,23	9,91	37,28	0,83	0,1271	0,295	0,31	129	47	12	<2	<2
Saprolitized peridotite	1,12	9,26	36,01	<0,01	0,1227	0,3	0,27	134	33	12	<2	<2
Saprolitized peridotite	1,26	13,12	22,86	0,18	0,1145	1,401	0,39	190	46	13	<2	35
Saprolitized peridotite	0,28	10,92	33,88	<0,01	0,0964	0,423	0,27	129	49	9	<2	<2
Peridotite	0,76	8,17	38,22	<0,01	0,1067	0,217	0,29	114	7	4	<2	<2
Silicate veins	0,16	3,55	10,76	<0,01	0,046	0,875	0,039	50	19	<3	<2	<2
Silicate veins	0,47	10,07	32,82	0,04	0,1338	1,207	0,428	130	86	<3	<2	<2
Silicate veins	0,28	10,92	33,88	<0,01	0,0964	1,362	0,317	140	39	<3	<2	<2
Shear zone	1	9,33	25,08	<0,01	0,0745	4,112	0,271	191	25	<3	<2	<2
Alteration	18,85	58,9	0,64	<0,01	0,1044	1,213	0,863	336	<1	<3	<2	<2
Detection limit (2σ)	0,005	0,002	0,005	0,01	0,0002	0,001	0,001	5	1	3	2	2

Nota. Adaptado de Gleeson et al. (2004).

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Tabla 3

Valores de referencia superiores para las concentraciones de ciertos elementos indicadas en la ley 2115.

Compuesto/Elemento	Valor máximo (mg/L)	Compuesto/Elemento	Valor máximo (mg/L)
Cl	250	Mn	0,1
SO ₄	250	Al	0,2
Ca	60	Zn	3
Mg	36	Ni	0,02
Fe	0,3	Cr	0,05

Nota. Información adaptada de la Ley 2115 de 2021 de Colombia

Tabla 4

Resultados de la cromatografía iónica ICP-AES (ppm) en muestras de aguas en la mina Cerro Matoso S.A. resaltando aquellos elementos que presentan una concentración superior a las indicadas en la ley 2115.

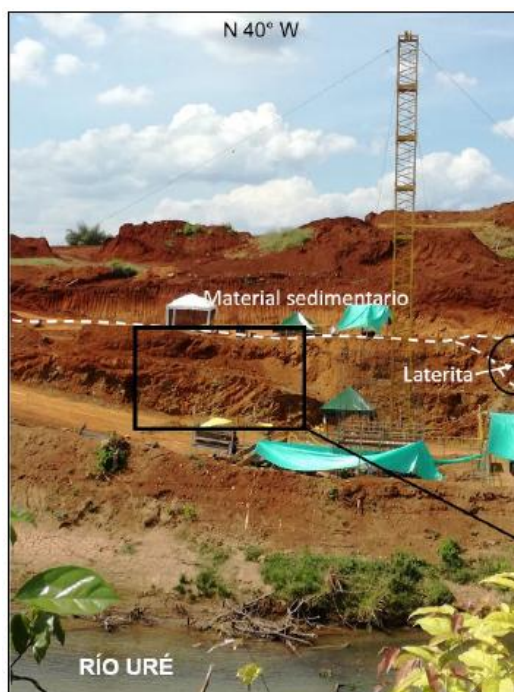
Ubicación	Tipo	Cl	SO ₄	NH ₄	Na	K	Mg	Ca	Si	Fe	Mn	Al	Ni	Co	Cr	Zn
Mina	Manantial	1,37	5,1	0,02	0,9	0,2	17,6	2,87	11	0,9	0,2	<0,1	0,28	0,01	<0,05	0,02
Mina	Zanja	1,75	75,63	<0,05	0,7	0,3	19,9	9,7	3,1	0,9	0	0,02	<0,05	0,01	0,23	0,03
Mina	Manantial	1,35	105	<0,05	1,4	0,2	33,5	16,33	10	0	0	<0,1	<0,05	0,02	<0,05	0,01
Mina	Cascada	1,65	52,35	0,28	1,4	0,3	25,7	8,33	13	0	0	<0,1	0,11	0,01	<0,05	<0,02
Superficie	Río Ure	1,13	1,07	0,18	3,4	0,5	3,52	6,82	11	0,2	0,1	<0,1	<0,05	<0,05	<0,05	0,02
Superficie	Río Ure	1,08	1,6	0,6	3,3	0,5	3,76	7,69	11	0	0	<0,1	<0,05	<0,05	<0,05	0,03
Superficie	Pozo	1,98	0,47	0,07	1	0,1	5,38	<0,0005	7,6	0	0	<0,1	0,76	0,01	<0,05	0,02
Superficie	Arroyo	1,67	6,34	0,06	1	0,2	5,38	2,06	4,3	3,5	0,8	<0,1	0,29	0,04	<0,05	0,02

Nota. Adaptado de Gleeson et al. (2004).

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Figura 4

Fotografía de la zona de la mina de Cerro Matoso S.A. por la cual pasa el río Ure.



Nota. Adaptado de Tobón (2018).

En Castrillón et al. (2023) analizaron 15 muestras de las capas saprolitizadas y meteorizadas de los alrededores y sobre la zona de extracción de níquel en la mina Cerro Matoso S.A. Siete muestras fueron analizadas por difracción de rayos X (DRX) dando información sobre su mineralogía (**Tabla 5**) y once se analizaron por fluorescencia de rayos X (FRX) definiendo los contenidos de óxidos mayores presentes y de los elementos Al, Fe, Mn y Ti (**Tabla 6**). Con estos datos podemos identificar que otros elementos están presentes en los suelos y la peridotita de la mina de Cerro Matoso S.A. y correlacionar cuales de estos elementos coinciden con los presentes en las biomuestras analizadas.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Tabla 5

Mineralogía por DRX de las muestras A-O.

Muestra	Mineralogía
Lutita negra facie I	Greenalita, nimita, siderita, goethita, magnetita, cromita, óxido de Fe
Lutita negra facie II	Greenalita, berthierina, siderita, goethita, óxido de manganeso, nimita, sulfato de magnesio
Serpentinita con intraclastos	Siderita, antigorita, olivino, talco, serpentinita, espinela
Arcilla con intraclastos	Greenalita, berthierina, siderita, goethita, nimita, cromita
Arcilla oxidada marrón	Greenalita, goethita
Arcilla fosilífera verde	Berthierina, nimita, siderita, goethita
Lutita brechada	Siderita, goethita, nontronita

Nota. Adaptado de Castrillón et al. (2023).

Tabla 6

Resultados de XFR en las muestras analizadas definiendo el contenido de los óxidos mayores (porcentajes en peso) y los contenidos de Al, Fe y Mn en ppm.

Elementos	Arcilla con laminación de hierro	Arcilla rojiza	Lutitas negras (Facies II)	Serpentinita con intraclastos	Arcilla con intraclastos	Lutitas negras (Facies I)	Listwanita	Lutitas verdes	Arcilla marrón con óxidos	Arcilla fosilífera verde	Lutita brechada
Al ₂ O ₃	3,9	15,37	5,31	4,82	4,47	2,52	4,24	10,63	17,4	8,94	6,71
Fe ₂ O ₃	60,4	70,45	79,27	67,31	71,25	76,17	61,89	39,13	53,86	72,35	65,81
MgO	0,2	1,56	1,81	1,75	1,75	1,63	2,39	4,03	2,45	4,52	5
CaO	0,06	0,07	0,08	0,13	0,08	0,17	0,25	5,67	0,09	0,4	0,44
P ₂ O ₅	0,028	0,18	0,01	0	0,12	0	0,03	3,15	0,17	0,1	0,06
MnO	0,28	0,02	1,02	1,29	0,58	5,87	0,86	0,16	0	0,55	0,56
Al	2,2	8,5	2,9	2,7	2,5	1,4	2,4	5,9	9,7	5	3,7
Fe	21,1	24,6	27,7	23,5	24,9	26,6	21,6	13,7	18,8	25,3	23
Mn	0,217	0,015	0,79	0,999	0,449	4,547	0,666	0,124	0	0,426	0,434

Nota. Adaptado de Castrillón et al. (2023).

Tobón (2018) realizó el análisis de elementos mayores, menores (en % en peso) y elementos del grupo del platino y oro (en ppb) en perfiles expuestos de la mina Cerro Matoso S.A., lo que permitió identificar cambios químicos generados por los procesos de meteorización.

El estudio analizó 2 perfiles (**Tabla 7**) en la mina Cerro Matoso S.A., el perfil CMM-01 se encuentra al NNW de la zona de extracción minera contiguo a Río Ure y el perfil CMM-03 se

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

encuentra al interior de la zona de extracción minera (**Figura 5**). Estos perfiles presentan descripción litológica lo que aporta información sobre minerales presentes en estas capas.

Figura 5

Ubicación de los puntos de muestreo (Perfiles CMM-01 y CMM-03) tomados en la mina Cerro Matoso S.A.



Nota. Adaptado de Tobón (2018).

Tabla 7

Descripción litológica del perfil CMM-01 y CMM-03.

Perfil CMM-01	
Clasificación	Mineralogía
Material sedimentario	Sin especificar
laterita roja	Sin especificar
saprolito verde	peridotita (Olivino)
	Bastita
	Cromita
Peridotita saprolitizada	peridotita (Olivino)
	Serpentinita
Perfil CMM-03	
Clasificación	Mineralogía

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

laterita roja IV	
laterita roja III	Sílice
laterita roja II	peridotita saprolitizada
laterita roja I	
Peridotita saprolitizada	serpentinita
	cromita negra
	peridotita (olivino)

Nota. Adaptado de Tobón (2018).

La **Tabla 8**, indica los óxidos mayores, menores (en % en peso) y elementos del grupo del platino y oro (en ppb) para los perfiles.

Tabla 8

Contenido de elementos mayores y menores en las capas del perfil laterítico (% en peso).

Elementos	Laterita Roja	Saprolito Verde	Peridotita Saprolitizada	Laterita Roja	Laterita Roja con sílice	Laterita Roja	Laterita Roja	Peridotita Saprolitizada
Al ₂ O ₃	7,56	1,74	0,41	3,14	2,67	5,82	6,43	1,21
Fe ₂ O ₃	66,18	13,02	12,34	71,64	58,28	64,32	61,41	13,96
MgO	1,08	25,43	32,44	0,62	0,58	2,59	3,33	29,44
CaO	0,02	0,48	0,04	<LD	<LD	0,01	0,05	0,26
P ₂ O ₅	0,088	0,006	0,006	0,012	0,01	0,013	0,015	0,009
MnO	0,73	0,12	0,15	1,06	0,8	1,44	0,79	0,14
Cr ₂ O ₃	2,943	0,635	0,349	2,692	3,492	3,327	3,334	0,561
SO ₃	0,076	0,003	<LD	0,343	0,242	0,24	0,161	0,02
Ni	1,13	1,906	0,353	1,433	0,916	1,211	1,463	2,215
Co	0,14	0,017	0,015	0,022	0,026	0,249	0,213	0,048

Nota. Adaptado de Tobón (2018).

Mejía y Durango (1982) realizaron el análisis de lateritas ubicadas en la mina Cerro Matoso S.A. (**Tabla 9**). Analizaron seis miembros, que van desde la peridotita (miembro más profundo) hasta la ganga (miembro más superficial). Esto permitió conocer la variación química de la secuencia de rocas, desde la menos hasta la más meteorizada, con estos datos se puede describir si el contenido elemental de las lateritas y capas meteorizadas se relaciona con los elementos presentes en las biomuestras analizadas.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Tabla 9

Concentraciones de los elementos presentes de los 6 miembros analizados (% en peso).

Elementos	Peridotita	Peridotita Sapolítica	Saprolito Verde	Saprolito Café	Laterita	Ganga
Al ₂ O ₃	1	1,04	2	2,5	10	11,1
MgO	40	27	15	15	0,75	0,77
Ni	0,3	2,5	3,1	3,4	1,3	0,8
Co	0,012	0,02	0,05	0,09	0,15	0,06
Fe	6	8,5	15	15	42	46

Nota. Adaptado de Mejía y Durango (1982).

La **Tabla 10** resume los elementos presentes en la peridotita, su perfil de meteorización, lateritas.

Tabla 10

Resumen de elementos con anomalía positiva presentes en la geología, perfiles lateríticos y agua de Montelíbano.

	Al	Sb	As	S	Ba	B	Ca	Co	Cr	Sn	Sr	P	Fe	Mg	Mn	Hg	Mo	Ni	Se	V	I
Muestras de agua (Gleeson et al, 2004)	x						x	x	x				x	x	x			x			
Muestras de perfil laterítico (Castrillón et al, 2023)	x						x					x	x	x	x			x			
Perfiles lateríticos (Tobón, 2018)	x			x			x	x	x			x	x	x	x			x			
Perfiles lateríticos (Gleeson et al, 2004)	x				x		x	x	x		x		x	x	x			x		x	
Muestras de lateritas (Mejía y Durango, 1982)	x							x					x	x				x			
Fm. Cansona		x	x	x	x		x	x	x	x	x					x	x	x	x	x	

Nota. Adaptado de Patiño et al. (2019); Mejía y Durango (1982), Tobón (2018), Castrillón et al. (2023) y Gleeson et al. (2004).

4.3. Mineralizaciones

Níquel y Ferroníquel: estos metales son explotados de lateritas níquelíferas que se formaron a partir de la meteorización química de la Ultramafita de Cerro Matoso (Ksucm), esta unidad está constituida principalmente por peridotitas que afloran como un cuerpo aislado dentro

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

del complejo ofiolítico del Cauca de edad Cretácico Temprano (Mejía y Durango, 1982; *Bermúdez et al., 2012*). La explotación de estos metales es realizada en la mina a cielo abierto Cerro Matoso S.A. (*Bermúdez et al., 2012*).

Carbón: La mina a cielo abierto Las Palmeras ubicada en el municipio de Puerto Libertador, al sur del departamento de Córdoba, sobre la cuenca del río San Jorge, lleva a cabo trabajos enfocados en la exploración y extracción de carbón (*Quiñones, 2024*). En la **Figura 2** se observa su localización.

4.4. Uso de Suelo y Actividades antrópicas

El uso de suelo en el municipio de Montelíbano es descrito por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo -PNUD (2014), indicando los siguientes usos específicos:

Agricultura: en un área de 331 hectáreas se presentan cultivos de subsistencia como maíz, arroz, plátano, yuca y ñame. Para la fertilización del maíz se aplica nitrógeno, fósforo y potasio en dosis específicas de acuerdo con la producción (AGROSAVIA, s.f.). Para el plátano se usan fertilizantes ricos en potasio y nitrógeno como el sulfato de potasio y el nitrato de amonio (Walco Agro S.A.S, s.f.). Para el ñame se usan fertilizantes con nitrógeno fósforo y potasio (AGROSAVIA, s.f.).

Ganadería: mayormente ganadería extensiva, ocupando un área de 126.524 hectáreas, orientada a la producción de carne.

Protección y/o conservación: Con un área de 59.335 hectáreas es una categoría con bosques naturales intervenidos ubicados en serranías de San Jerónimo, Ayapel y parte del Parque Nacional Natural de Paramillo.

Minería: Con un área de 680 hectáreas se tiene una explotación de ferroníquel por parte de la Mina Cerro Matoso S.A. en cercanía de la boca del río Uré, esta explotación se da a cielo

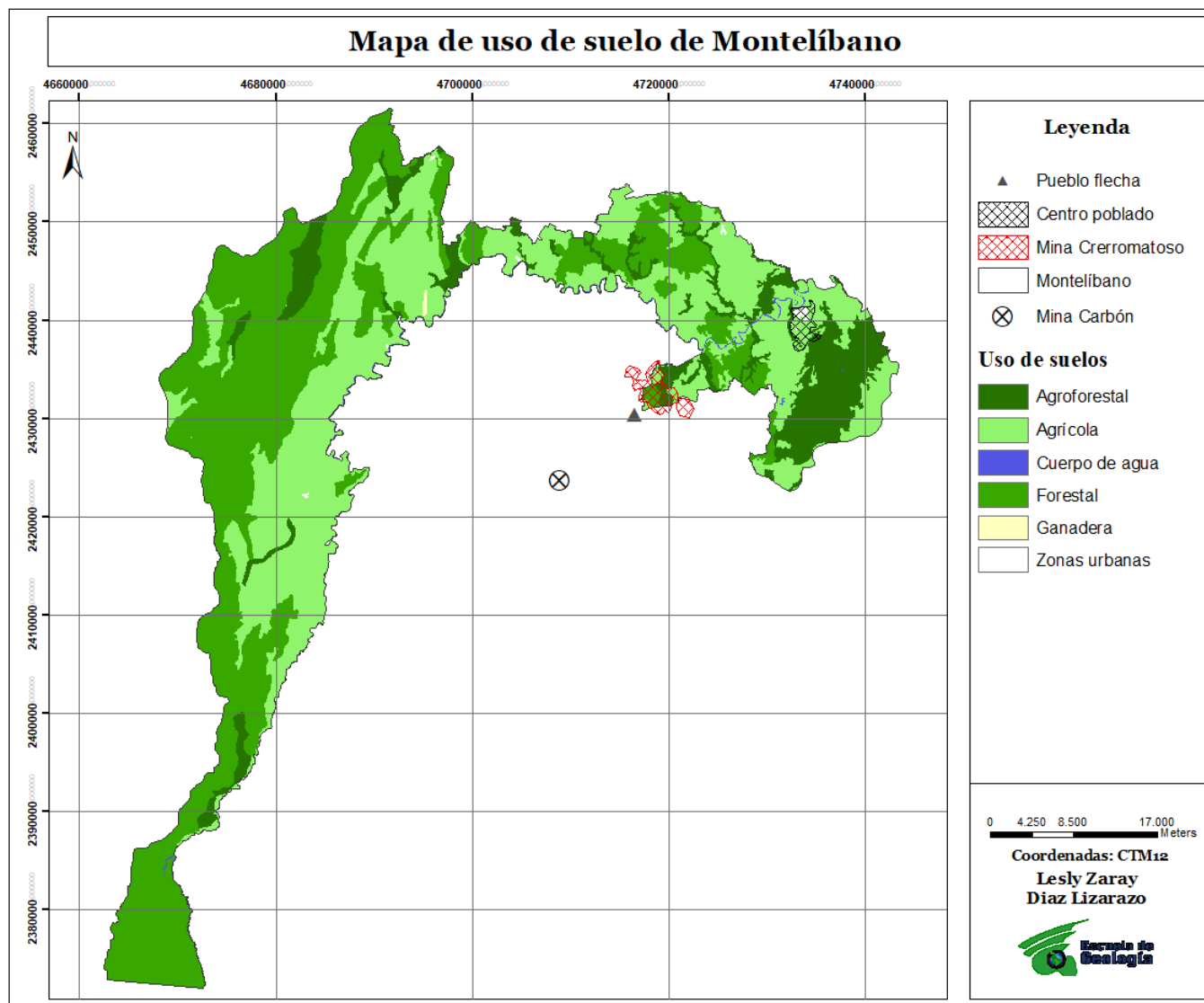
QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

abierto y el proceso utilizado es de tipo piro-metalúrgico de pre-reducción selectiva y fundición en horno eléctrico.

Para realizar el mapa de uso de suelos (**Figura 6**) se obtuvieron datos espaciales de la cobertura y uso de suelo del IGAC generados en el 2017 a una escala de 1:100.000.

La empresa Jaguazul S.A. E.S.P. es responsable de la prestación de los servicios de acueducto y saneamiento básico en Montelíbano, esta empresa transforma el agua del río San Jorge en agua potable apta para el consumo humano. En el río San Jorge desemboca el río Ure el cual nace en la Serranía de San Jerónimo y atraviesa el municipio Ure, Córdoba (*Jaguazul S.A. E.S.P., s.f.*). La cobertura de este acueducto es de alrededor de 29.000 domicilios por 22 horas al día (*Jaguazul S.A. E.S.P., s.f.*), aunque diferentes comunidades de Montelíbano han realizado denuncias por falta de agua en temporadas de sequía.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Figura 6*Mapa del uso de suelos del municipio de Montelíbano, Córdoba.*

Nota. Elaborado a partir de la cobertura y uso del suelo obtenidos del IGAC (2017).

4.5. Marco Geomédico

Biomarcador: Cabello. El cabello funciona como un biomarcador útil para detectar la exposición del cuerpo humano a compuestos, metales, pesticidas y oligoelementos (Jaquinta et al., 2019). El primer centímetro desde la raíz refleja la exposición del mes anterior (Chang et al., 2024), lo que permite evaluar exposiciones químicas crónicas que se da por exposiciones prolongadas

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

que pueden ir de uno a tres meses o hasta años (ATSDR, 2007) con umbrales de ingesta muy bajos ($\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{día}$) (ATSDR, 2009).

Las biomuestras obtenidas por el equipo médico del proyecto “*Evaluación de la exposición a mezclas de contaminantes ambientales y efectos en la salud de la población rural de tres departamentos*” fueron tomadas desde el cuero cabelludo y se analizó por ICP-MS solo el primer centímetro de crecimiento; por lo que estas biomuestras reflejan la exposición a compuestos, únicamente, del mes anterior a la toma de las muestras.

Se señala que las personas pueden estar expuestas a sustancias que provienen de la geología de la zona donde viven o de residuos de actividades antrópicas, transportados por agua y/o aire hasta zonas cercanas a estas viviendas, lo que podría representar una exposición crónica.

5. Antecedentes

5.1. Monitoreo en poblaciones

La importancia de monitorear en poblaciones sus niveles oligoelementales y de metales pesados se describe en Ruiz (2014), quien estudio menores de edad en etapa de desarrollo, entre 3-12 años de la ciudad Elche, España. Sus muestras de cabello fueron analizadas por ICP-MS definiendo concentraciones de 28 elementos en 419 menores. Este monitoreo es de gran importancia ya que permitió que con la estadística de las variables poblacionales y los resultados del muestreo se generaran valores de referencia para concentraciones en muestras de cabello para 24 elementos en una población infantil de la zona estudiada.

5.2. ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry)

La espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente es una técnica analítica que se basa en la ionización de la muestra con un plasma acoplado inductivamente (ICP) y luego se analiza la composición de iones utilizando un espectrómetro de masas (MS). Esta técnica indica

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Tabla 11*Límites de Detección y Límites de Cuantificación del Laboratorio.*

Elemento	LD (ppm)	LQ (ppm)	Elemento	LD (ppm)	LQ (ppm)	Elemento	LD (ppm)	LQ (ppm)
Al	0.0099	0.033	Gd	0.0002	0.0006	K	0.3382	1.1275
Sb	0.0005	0.0017	Ga	0.0007	0.0023	Pr	0.00005	0.0002
As	0.0042	0.0139	Ge	0.0013	0.0043	Re	0.0001	0.0002
S	53.0311	176.7704	Fe	0.4499	1.4995	Rb	0.0003	0.001
Ba	0.0042	0.0141	Ho	0.00002	0.0001	Ru	0.0002	0.0006
Be	0.0002	0.0006	In	0.0001	0.0004	Sm	0.0002	0.0006
Bi	0.0004	0.0015	Yb	0.0001	0.0002	Se	0.0192	0.0639
B	0.1244	0.4146	Y	0.0001	0.0004	Si	98.3555	327.8518
Br	0.0595	0.1982	La	0.0003	0.0009	Na	0.0406	0.1353
Cd	0.0004	0.0012	Li	0.0008	0.0025	Tl	0.00004	0.0001
Ca	2.8248	9.416	Lu	0.00005	0.0002	Ta	0.0001	0.0003
Ce	0.0002	0.0006	Mg	0.0101	0.0336	Tb	0.00003	0.0001
Cs	0.0001	0.0002	Mn	0.0016	0.0053	Ti	0.0195	0.0648
Co	0.0004	0.0013	Hg	0.0079	0.0264	Th	0.0002	0.0007
Cu	0.0048	0.0161	Mo	0.0005	0.0018	Tm	0.00002	0.0001
Cr	0.0024	0.0079	Nd	0.0043	0.0145	U	0.0001	0.0005
Dy	0.00005	0.0002	Nb	0.0002	0.0006	V	0.0004	0.0012
Er	0.0001	0.0002	Ni	0.0025	0.0083	W	0.0014	0.0047
Sc	0.0497	0.1656	Au	0.0002	0.0006	I	0.0031	0.0104
Sn	0.0008	0.0005	Pd	0.0007	0.0022	Zn	0.0181	0.0603
Sr	0.0006	0.0021	Ag	0.0024	0.0081	Zr	0.001	0.0033
Eu	0.0001	0.0003	Pt	0.0004	0.0013	-	-	-
P	0.3395	1.1316	Pb	0.0004	0.0015	-	-	-

5.3. Valores de referencia para concentraciones en cabello.

Los valores de referencia (**Tabla 12**) fueron proporcionados por el Laboratorio de ICP-MS PUC-Rio, basado en una recopilación de información en su trayectoria con estos análisis.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Tabla 12

Valores de referencia para concentraciones en cabello.

Elemento	Referencia en $\mu\text{g/g}$ (ppm)	Elemento	Referencia en $\mu\text{g/g}$ (ppm)	Elemento	Referencia en $\mu\text{g/g}$ (ppm)
Aluminio (Al)	14	Gadolinio (Gd)	-	Potasio (K)	8-75
Antimonio (Sb)	0.03	Galio (Ga)	-	Praseodimio (Pr)	-
Arsénico (As)	0.15	Germanio (Ge)	0.1	Renio (Re)	-
Azufre (S)	39000-56000	Hierro (Fe)	7-18	Rodio (Rh)	-
Bario (Ba)	4	Holmio (Ho)	-	Rubidio (Rb)	-
Berilio (Be)	0.05	Indio (In)	-	Rutenio (Ru)	-
Bismuto (Bi)	0.03	Iterbio (Yb)	-	Samario (Sm)	-
Boro (B)	0,25-1,5	Itrio (Y)	-	Selenio (Se)	0,8-1,5
Bromo (Br)	-	Lantano (La)	-	Silicio (Si)	-
Cadmio (Cd)	0.3	Litio (Li)	0,007-0,02	Sodio (Na)	20-250
Calcio (Ca)	190-684	Lutecio (Lu)	-	Talio (Tl)	-
Cerio (Ce)	-	Magnesio (Mg)	13-73	Tantalio (Ta)	-
Cesio (Cs)	-	Manganeso (Mn)	0,15-1,2	Terbio (Tb)	-
Cobalto (Co)	0,003-0,03	Mercurio (Hg)	2.3	Titanio (Ti)	-
Cobre (Cu)	10-32	Molibdeno (Mo)	0,02-0,05	Torio (Th)	0.005
Cromo (Cr)	0,4-0,65	Neodimio (Nd)	-	Tulio (Tm)	-
Disproso (Dy)	-	Niobio (Nb)	-	Uranio (U)	0.02
Erbio (Er)	-	Níquel (Ni)	0.6	Vanadio (V)	0,0004-0,03
Escandio (Sc)	-	Oro (Au)	0,002-0,07	Wolframio (W)	-
Estaño (Sn)	0.35	Paladio (Pd)	0.05	Yodo (I)	0,05-0,6
Estroncio (Sr)	0,6-4,3	Plata (Ag)	0.4	Zinc (Zn)	140-240
Europio (Eu)	-	Platino (Pt)	-	Zirconio (Zr)	-
Fósforo (P)	160-260	Plomo (Pb)	9.3	-	-

Nota. Los valores de referencia fueron proporcionados por el laboratorio de ICP-MS del Departamento de Química de la Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro, Brasil.

* Elemento que solo cuenta con el valor de referencia máximo.

5.4. Elementos potencialmente tóxicos

Los elementos presentan diferentes grados de toxicidad según la manera en la que afecta el cuerpo humano. Varios elementos se consideran esenciales para el ser humano pero su exceso o déficit puede generar efectos perjudiciales (*Macías y Calvo, 2008*).

Para los elementos potencialmente tóxicos se usó la definición de Macías y Calvo (2008), esta definición la realizaron con información de los niveles considerados peligrosos por entidades internacionales como la EPA, la OMS, y regulaciones europeas y españolas. La metodología que usaron combina dos métodos: uno toxicológico, que modela el riesgo por exposición humana, y

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

otro estadístico, que establece el fondo natural en suelos no contaminados, con esta información calcularon cuánto contaminante puede haber en el suelo sin que cause daño a la salud y cuánto contaminante hay normalmente en suelos no contaminados de la región, de estos dos el valor que sea más bajo se define como valor de referencia.

En la **Figura 8** se observan los elementos que definieron como potencialmente tóxicos y su nivel de toxicidad, de este grupo de elementos se describieron los elementos que están presentes en las laterías, suelo o rocas de Montelíbano y la mina Cerro Matoso S.A (**Tabla 13**).

Figura 8

Elementos potencialmente tóxicos. Tomado y adaptado de Macías y Calvo (2008).

H																					He
Li	Be											B	C	N	O	F					Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl					Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br					Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I					Xe
Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At					Rn
Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Uuu	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts					Og
		*	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
		**	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

	Elementos muy tóxicos
	Elementos tóxicos
	Elementos con toxicidad moderada
	Toxicidad en determinadas condiciones

Tabla 13

Descripción de elementos potencialmente tóxicos presentes en las lateritas, suelo y rocas de Montelíbano y la mina Cerro Matoso S.A.

Elemento	Descripción	Exposición	Bioacumulable	
			si	no
<i>Aluminio</i>	Metal más abundante en la tierra (8,8%), no se encuentra de forma libre	Por comida, agua, aire y/o contacto con la piel	x	
<i>Antimonio</i>	Metaloides poco abundante (0,00005%) y raro en forma natural	Por comida, agua, aire y/o contacto con la piel. Contamina principalmente el suelo	x	

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Arsénico	Metaloide con abundancia de 0.0005%	Por comida, agua, aire y contacto con la piel	x	
Bario	Metal con una alta abundancia (0,05%)	Principalmente a través del aire y el consumo, aunque también por contacto con la piel		x
Boro	Metaloide con abundancia de 0,001% en la corteza de la tierra	Principalmente a través de su consumo, inhalación y un poco por contacto con la piel		x
Cromo	Metal con abundancia de 0,03% en la corteza de la tierra	A través de vías orales, cutáneas e inhalatorias	x	
Estaño	Metal raro con abundancia de 0,004% en la superficie terrestre	A través de vías orales, cutáneas e inhalatorias		x
Hierro	Metal, 2° más abundante de la corteza terrestre con una abundancia de 5%	Principalmente a través de su consumo o inhalación y también puede absorberse por contacto con la piel		x
Manganeso	Metal con abundancia de 0,095% en la superficie terrestre	Principalmente a través de su consumo, y de menor manera por inhalación y contacto con la piel		x
Mercurio	Metal con abundancia de 0,00005% en la corteza de la tierra	Presenta una alta toxicidad al entrar por vías respiratorias o ingerirlo en pescado contaminado, también afecta tener contacto con la piel	x	
Molibdeno	Metal con abundancia de 0,00015% en la superficie terrestre	Principalmente a través de su consumo y en menor medida por su inhalación y contacto con la piel		x
Níquel	Metal con abundancia de 0,018% en la corteza terrestre	A través de consumo, inhalación y contacto con la piel		x
Selenio	Metal con abundancia de 0,000009% en la superficie terrestre	principalmente por consumo e inhalación, aunque en menor medida se da por contacto con la piel		x
Vanadio	Metal con abundancia en la superficie terrestre de 0,012%	A través de contacto con la piel, consumo e inhalación		x
Zinc	Metal con abundancia de 0,02% en la superficie de la tierra	Principalmente a través del consumo, pero se puede dar por inhalación en menor medida		x

Nota. Adaptado de Macías et al. (2016); Ruiz (2014); Lenntech (s. f.).

5.5. Presencia de REEs en humanos

Las concentraciones de cada elemento de los lantánidos varían en el cuerpo humano, el Cerio es el que se presenta las mayores concentraciones y en las menores concentraciones el Terbio y el Iterbio. Esto concuerda con su distribución en los materiales terrestres. Su principal peligro proviene de la inhalación de polvo con altas concentraciones de estos elemento en el aire, especialmente en cercanía de fundiciones. Esta exposición crónica puede generar fibrosis pulmonar. (Kabata y Mukherjee, 2007).

La literatura actual destaca la ausencia de procedimientos estandarizados y de estudios sistemáticos que definan valores de referencia para los 17 elementos considerados tierras raras, lo que impide validaciones comparativas y evaluación de riesgos en poblaciones expuestas (Mikulewicz et al., 2013). Debido a esto se buscaron datos de concentraciones de REEs en biomuestras de cabello que puedan ser usados como referencia y poder comparar, en caso de haber, con las concentraciones de estos elementos en las biomuestras de habitantes de Montelíbano.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Dai et al. (2023) presentan datos sobre contenido elemental en muestras de cabello de mineros y habitantes de siete ciudades de China: Bayan Obo, Baotou, Hohhot Shanxí, HeZhang, Shandong y Guangxi, las cuales se relacionan directamente con la minería y/o procesamientos de REEs. La ciudad de Shanxi es la única en la que se analizaron a los habitantes expuestos por lo que estos datos sirven de referente para comparar con los de los habitantes expuestos en Montelíbano. Las muestras de cabello de los habitantes expuestos en Shanxi se analizaron por ICP-MS y dieron como resultados las concentraciones de REEs en ppb (**Tabla 14**).

Tabla 14

Contenido de REEs (ppb) en muestras de cabello de los residentes de Shanxi, China.

REEs	(ng/g)		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
Shanxi (Na et al., 2022)	Media	Habitantes expuestos (n=117)	15.2	30.7	3.6	12.6	2.3	1.1	3.3	0.4	1.9	0.3	1.0	0.1	0.9	0.2	9.2

Nota. Adaptado de Dai et al. (2023).

5.6. Residuos de la minería a cielo abierto en la mina Cerro Matoso S.A.

Esta minería por ser a cielo abierto expone rocas del complejo ofiolítico laterizadas, de donde extraen FeNi. La laterita fragmentada es fundida por medio de dos hornos (donde usan el carbón de la mina aledaña), para la separación de FeNi (PNUD, 2014), dejando como residuo la escoria, la cual puede migrar a través del agua (Gleeson et al., 2004) o del viento hacia los asentamientos humanos generando graves afectaciones (Idrovo et al., 2017).

El sólido residual (escoria) obtenido de la extracción de ferroníquel en la mina Cerro Matoso S.A. genera una acumulación a gran escala de un material vítreo (contaminante), los sólidos residuales son ricos en Fe₂O₃ y NiO, presentando un porcentaje en peso de 0.19% para NiO y un 13.3% para Fe₂O₃. El material residual contiene minerales como enstatita y alúmina.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Además, presenta cúmulos de Fe^{3+} en una matriz vítrea compleja y su tamaño es inferior a $1 \mu\text{m}$ (*Hernández et al., 2006*).

Este solido residual no es inflamable y es posible considerar su uso en la producción de accesorios domésticos (artículos cerámicos y baldosas) o como matriz de relleno en algunos productos prefabricados de madera o polímeros (*Hernández et al., 2006*).

6. Metodología

La elaboración del presente trabajo de grado se dividió en cinco etapas:

6.1. Etapa 1. Búsqueda bibliográfica

Se buscó en bibliografía información geológica de la zona de estudio, geoquímica de las unidades geológicas presentes, características y valores de referencia de los elementos potencialmente tóxicos para el cuerpo humano e información sobre estudios similares donde se emplee el ICP-MS en muestras de cabello con el fin de determinar contaminantes ambientales. Esta información se usó para la realización del marco teórico de la investigación.

6.2. Etapa 2: Muestreo (No probabilístico)

Este muestreo se enmarcó en el proyecto II programa de investigación en salud ambiental para Colombia, fue desarrollado por un equipo de profesionales de la salud de la Universidad Industrial de Santander-UIS. Las consideraciones éticas del programa cumplen con los lineamientos de la Declaración de Helsinki y la Resolución 8430 de 1993 del Ministerio de Salud sobre investigación con humanos. El Comité de Ética del Instituto Nacional de Salud (registro #23-2019) y el Comité de Ética e Investigación Científica de la Universidad Industrial de Santander aprobaron la investigación. Los 78 participantes fueron habitantes de la zona de estudio que decidieron participar, firmaron un consentimiento informado después de conocer los objetivos, métodos y riesgos del estudio. El muestreo se realizó en el segundo semestre del 2022 y para la toma de datos se cortó del cabello de los participantes y este fue empacado y sellado para ser

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

enviado al laboratorio de ICP-MS en el Laboratorio (LABSPECTRO) del departamento de química de la universidad Pontificia Católica de Rio de Janeiro en Brasil.

6.3. Etapa 3: Análisis estadístico

Al recibir los resultados de las muestras de cabello se revisaron y se les realizó tratamiento estadístico e interpretación contrastando los resultados con los valores de referencia sugeridos por el laboratorio. Los elementos potencialmente tóxicos que tuvieran el 15% o más de sus datos por encima del valor de referencia se establecieron como elementos potencialmente tóxicos con anomalía positiva. Se analizó el comportamiento estadístico en parámetros de centralización y desviación estándar de las concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos con anomalía positiva, para estos mismos elementos se realizaron diagramas de cajas y bigotes para observar cómo se concentraban los datos y polígono de frecuencia para observar la variabilidad de los datos.

6.4. Etapa 4: Comparación de biomuestras con la geología del área

Con los elementos tóxicos previamente determinados se analizó la información de la química de los residuos de la mina, obtenida de estudios previos, para determinar si hay una posible relación entre las concentraciones anómalas y los residuos mineros, así mismo analizando información del uso de suelo, la geoquímica y geología para determinar si existe relación posible entre la geología y las concentraciones anómalas.

6.5. Etapa 5: Elaboración del documento final

Finalmente, los resultados y datos adquiridos se recopilaron en el trabajo de investigación dando respuesta a los objetivos planteados. Los resultados buscan aportar al conocimiento de geología médica y epidemiología de Colombia en el contexto de la población de Montelíbano, Córdoba.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

7. Resultados

Los resultados entregados por el laboratorio se muestran en la **Tabla 15**.

Tabla 15

Resumen de los resultados del análisis de ICP-MS

Elemento	VRS [ppm]	Mínimo	Máximo	Dato<LQ [%]	Dato>VRS [%]	Elemento	VRS [ppm]	Mínimo	Máximo	Dato<LQ [%]	Dato>VRS [%]
Al	14	3,527	1558,477	0%	64,10%	Mg	13-73	12,973	1449,4	0%	55,10%
Sb	0,03	0,003	0,355	0%	44,90%	Mn	0,15-1,2	0,061	92,634	0%	56,40%
As	0,15	0,045	4,276	0%	44,90%	Hg	2,3	0,059	12,292	0%	42,30%
S	39000-56000	17.043,94	1.010.537,75	0%	76,90%	Mo	0,02-0,05	0,012	1,399	0%	47,40%
Ba	4	0,161	83,183	0%	38,50%	Nd	-	0,017*	9,874	44,90%	-
Be	0,05	0,001*	16,058	60,30%	3,80%	Nb	-	0,003*	0,003	98,70%	-
Bi	0,03	0,001*	0,137	21,80%	2,60%	Ni	0,6	0,049	17,767	0%	39,70%
B	0,25-1,5	0,724	7,482	42,30%	24,40%	Au	0,002-0,07	0,001*	0,611	46,20%	5,10%
Br	-	0,618*	90,738	14,10%	-	Pd	0,05	0,004*	0,06	51,30%	3,80%
Cd	0,3	0,002*	1,69	1,30%	11,50%	Ag	0,4	0,003*	24,563	5,10%	9,00%
Ca	190-684	122,113	9.212,17	0%	43,60%	Pt	-	0,001*	0,496	88,50%	-
Ce	-	0,002	0,452	0%	-	Pb	9,3	0,037	89,012	0%	10,30%
Cs	-	0,0003*	0,005	52,60%	-	K	8-75	0,385*	155,466	2,60%	1,30%
Co	0,003-0,03	0,001	4,462	0%	55,10%	Pr	-	0,0003*	0,53	1,30%	-
Cu	10-32	3,768	186,343	0%	12,80%	Re	-	0,0002*	0,002	80,80%	-
Cr	0,4-0,65	0,177	19,062	0%	35,90%	Rb	-	0,001*	0,256	5,10%	-
Dy	-	0,0003*	0,117	11,50%	-	Rh	-	0,003*	24,563	5,10%	-
Er	-	0,0003*	0,066	28,20%	-	Ru	-	0,001*	0,003	88,50%	-
Sc	-	0,376*	0,376	98,70%	-	Sm	-	0,0003*	0,055	23,10%	-
Sn	0,35	0,016*	18,783	3,80%	41,00%	Se	0,8-1,5	0,225	14,704	0%	34,60%
Sr	0,6-4,3	0,1	55,416	0%	28,20%	Si	-	735,519*	7597,851	74,40%	-
Eu	-	0,0003*	0,021	20,50%	-	Na	20-250	0,471	238,258	0%	-
P	160-260	65,983	2.883,22	0%	29,50%	Tl	-	0,0003*	0,045	5,10%	-
Gd	-	0,0004*	0,103	6,40%	-	Ta	-	0,001*	0,07	30,80%	-
Ga	-	0,006	1,955	0%	-	Tb	-	0,0001*	0,015	32,10%	-
Ge	0,1	0,004*	0,174	10,30%	1,30%	Ti	-	0,040*	3,163	6,40%	-
Fe	7-18	4,285	327,56	0%	61,50%	Th	0,005	0,001*	0,027	91,00%	2,60%
Ho	-	0,0001*	0,023	7,70%	-	Tm	-	0,0001*	0,009	51,30%	-
In	-	0,001*	0,002	97,40%	-	U	0,02	0,001*	0,028	47,40%	2,60%
Yb	-	0,0003*	0,062	16,70%	-	V	0,0004-0,03	0,004	1,406	0%	75,60%
Y	-	0,001	0,636	0%	-	W	-	0,008*	0,029	92,30%	-
La	-	0,001	0,148	0%	-	I	0,05-0,6	0,093	56,929	0%	80,80%
Li	0,007-0,02	0,002*	0,113	51,30%	5,10%	Zn	140-240	39,677	2.407,71	0%	34,60%
Lu	-	0,0002*	0,008	69,20%	-	Zr	-	0,024*	1473,235	1,30%	-

VRS: Valor de Referencia Superior LQ: Límite de cuantificación

En estos resultados se observa la presencia de elementos de tierras raras, específicamente: **Dy, Tb, Y, Er, Tm, Lu, Sm, Yb, Ho, Gd, Eu, La y Ce.**

Los elementos con anomalía positiva se definieron como aquellos cuya concentración en el cabello presentan un valor 15% más alto que el valor de referencia superior (*Dr. Javier Idrovo, comunicación personal*). Los elementos que presentaron anomalía positiva se resaltaron en azul en la tabla periódica de la **Figura 9**, correspondiendo a un total de 21: **B, Mg, Al, P, S, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, As, Se, Sr, Mo, Sn, Sb, I, Ba y Hg.**

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Figura 9

Elementos con el 15% o más de los datos por encima del valor de referencia superior.

H																									He
Li*	Be*												B*	C	N	O	F	Ne							
Na*	Mg*												Al*	Si	P*	S*	Cl	Ar							
K*	Ca*	Sc	Ti	V*	Cr*	Mn*	Fe*	Co*	Ni*	Cu*	Zn*	Ga	Ge*	As*	Se*	Br	Kr								
Rb	Sr*	Y	Zr	Nb	Mo*	Tc	Ru	Rh	Pd*	Ag*	Cd*	In	Sn*	Sb*	Te	I*	Xe								
Cs	Ba*		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au*	Hg*	Tl	Pb*	Bi*	Po	At	Rn								
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Uuu	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og								

	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
	Ac	Th*	Pa	U*	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

	Elementos con más del 15% de los datos arriba del límite propuesto	21
*	Elementos con límite propuesto	36
	Elementos analizados por el laboratorio	68

De los 21 elementos con anomalía positiva, se identificaron 15 que a su vez se clasifican como potencialmente tóxicos (**Figura 10**): **B, Al, V, Cr, Mn, Fe, Ni, As, Se, Mo, Sn, Sb, I, Ba, Hg.**

En la **Figura 10** se pueden observar los elementos en anomalía positiva con los grados de toxicidad definidos por Macías y Calvo (2008).

Figura 10

Elementos potencialmente tóxicos con anomalía positiva.

H																									He
Li	Be												B	C	N	O	F	Ne							
Na	Mg												Al	Si	P	S	Cl	Ar							
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr								
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe								
Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn								
Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Uuu	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og								

*	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
**	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

	Elementos muy tóxicos (+15% datos > VRS)	4	15
	Elementos tóxicos (+15% datos > VRS)	6	
	Elementos con toxicidad moderada (+15% datos > VRS)	3	
	Elementos con toxicidad en determinadas condiciones (+15% datos > VRS)	2	

7.1. Estadística

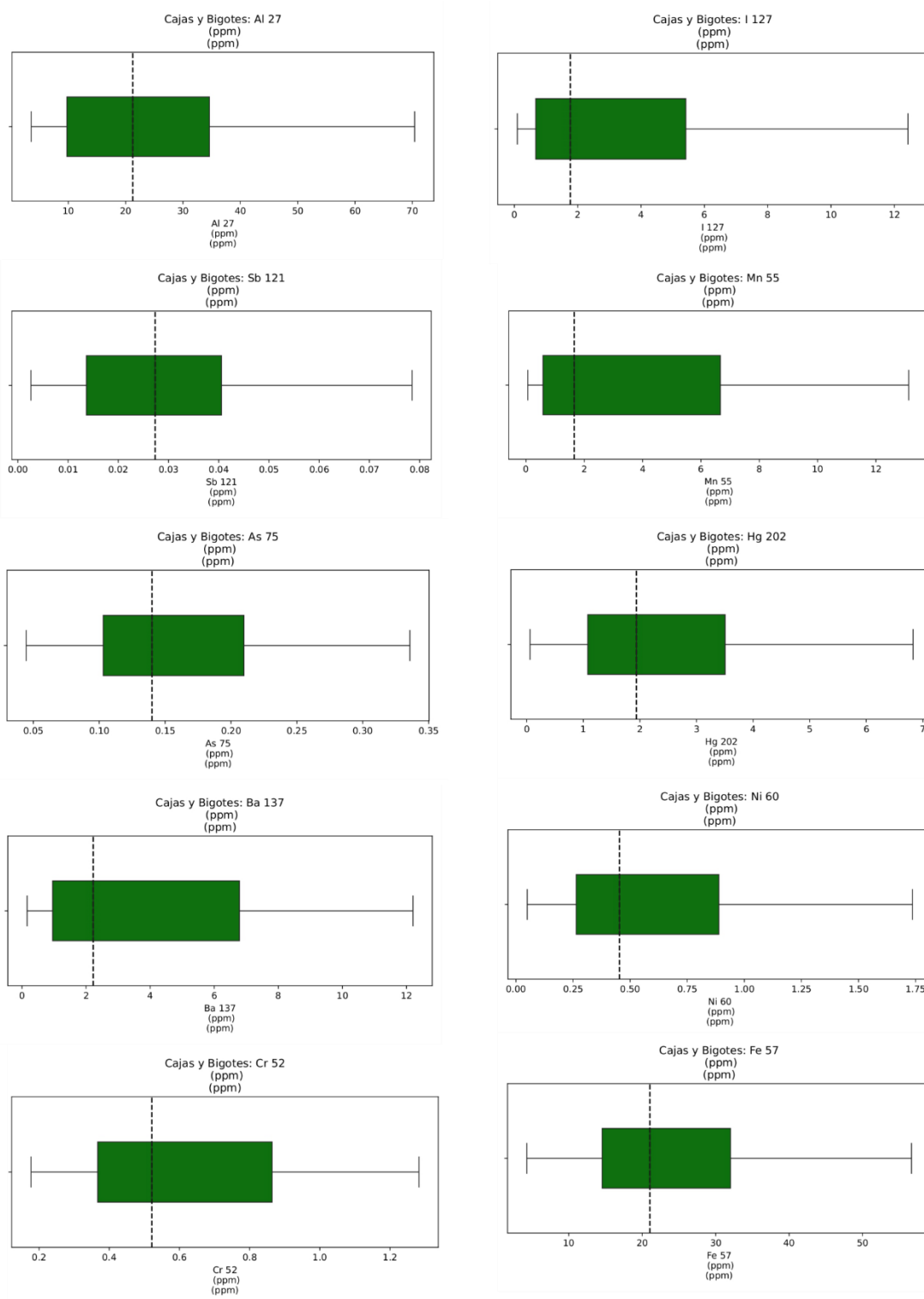
Se analizó el comportamiento estadístico en parámetros de centralización y desviación estándar de las concentraciones de los elementos tóxicos con anomalía positiva. Además, para este mismo grupo de elementos, se realizaron diagramas de cajas y bigotes para observar cómo se concentraban los datos y polígono de frecuencia para observar la variabilidad de los datos.

Estas herramientas estadísticas (gráficas y tablas) se realizaron haciendo uso de la herramienta Google Colab y sus librerías con código Python. Todas las tablas y gráficas para cada elemento se encuentran en la sección titulada **Apéndice**. Se identificó que los elementos Al, Sb, As, Ba, Cr, Fe, Mn, Hg, Ni e I presentan un sesgo positivo (hacia la derecha), que indica la existencia de valores extremos altos en sus concentraciones (**Tabla 16**).

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Tabla 16

Diagramas de cajas y bigotes de los elementos potencialmente tóxicos en anomalía positiva que presentan sesgo positivo.

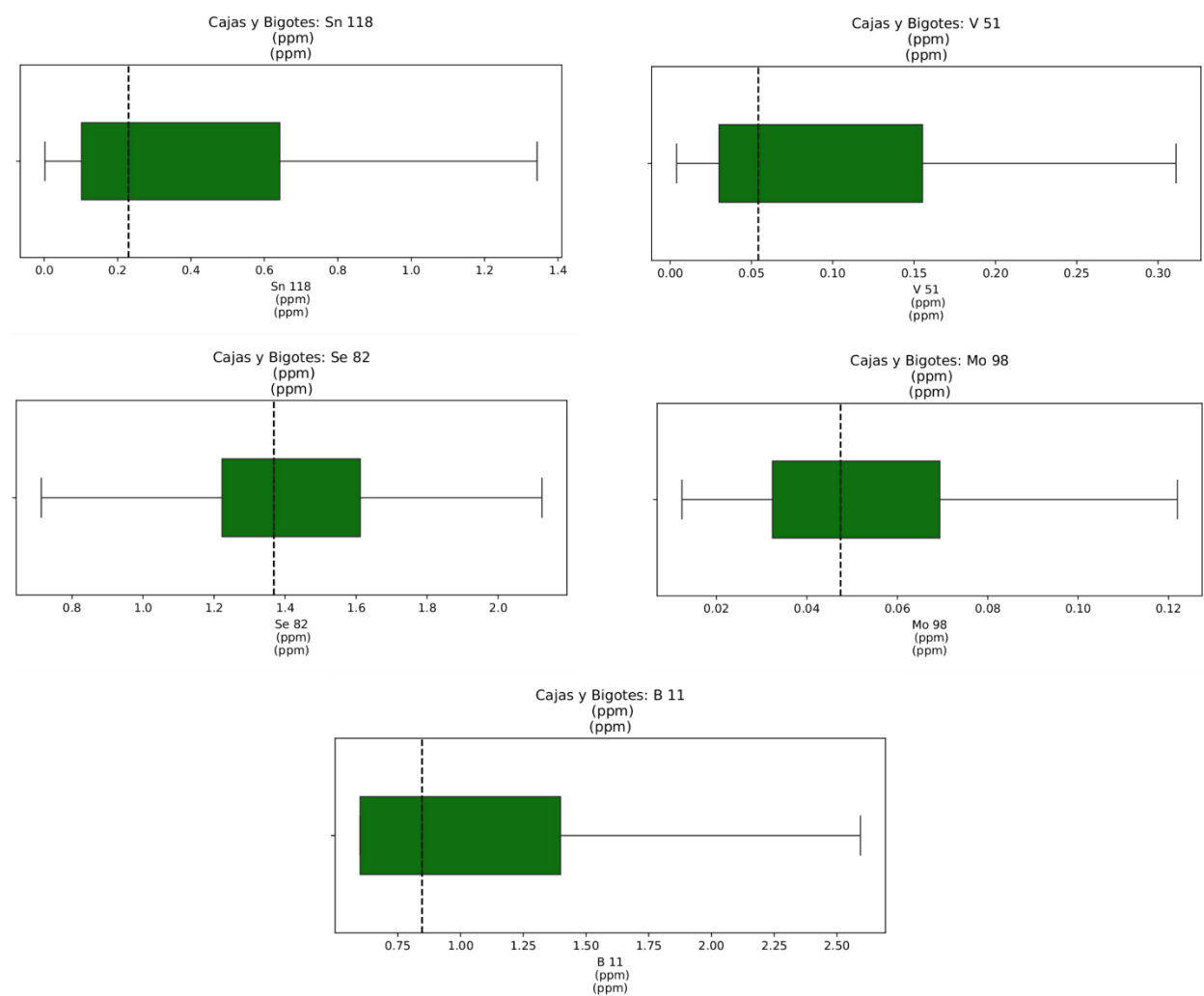


QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Por otro lado, los elementos **B**, **Sn**, **Mo**, **Se** y **V** presentan un **sesgo negativo (hacia la izquierda)**, lo que sugiere la predominancia de valores bajos en sus concentraciones (**Tabla 17**).

Tabla 17

Diagrama de cajas y bigotes de los elementos potencialmente tóxicos en anomalía positiva que presentan sesgo negativo.



Aclaraciones sobre el análisis de los datos

- Para tratar de evitar un desequilibrio en los datos, los valores que estaban por debajo del límite de cuantificación se redondearon a valor inmediatamente siguiente.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

- El número de clases de frecuencia se calculó usando la fórmula de Sturges

$$\#clases = 1 + 3.322 * \log(\text{número de datos})$$

El resultado se elevó al entero superior más cercano

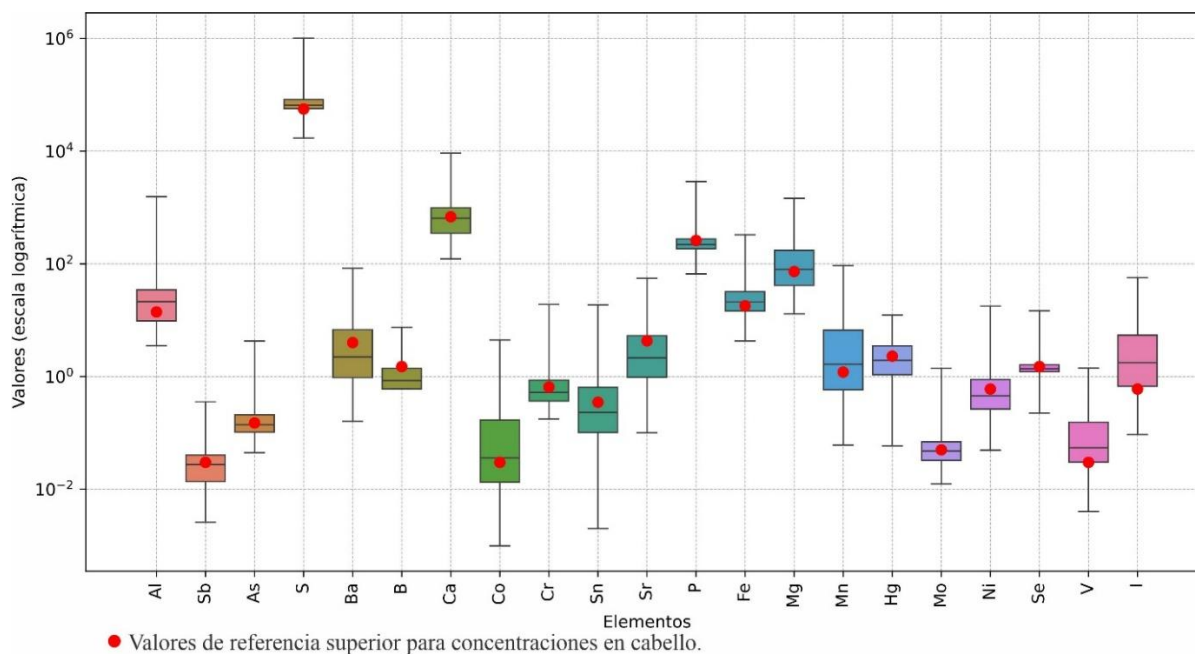
- La amplitud también se elevó al número inmediatamente mayor, esto genera un nuevo rango el cual se calculó multiplicando la amplitud con el número de clases.

La **Figura 11** muestra los diagramas de cajas y bigotes para cada elemento definido en anomalía positiva, como puntos rojos observamos los valores de referencia para concentraciones en cabello proporcionados por el laboratorio de la PUC-Rio. Esta gráfica nos permite observar cómo es el comportamiento general de los datos de este grupo de elementos y notando que el elemento con datos más altos es el S y el elemento con el valor mínimo más bajo es el Co; el I y V son los dos elementos que presentan la mayoría de sus datos por encima de los valores de referencia mientras que el P y Sr son los que presentan menos cantidad de datos por encima de los valores de referencia; el P y Se son los elementos que presentan menos dispersión mientras que Co y Sn los que más presenta.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Figura 11

Comparación entre los datos del presente estudio y los valores de referencia para concentraciones en cabello proporcionados por el laboratorio de ICP-MS de la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro.



La **Figura 12** se agrupan los diagramas de cajas y bigotes de los contenidos de REEs que se encontraron en las biomuestras analizadas de los habitantes de Montelíbano, de esta gráfica podemos observar que el Ce e Y son los elementos con concentraciones más altas y los elementos Tm y Lu las más bajas. Debido a que estos elementos no tienen límite de referencia propuesto para concentraciones en cabello no se pueden comparar con que tanto sobrepasan algún límite.

Por esta razón se consultaron datos que sirvieran de referente, es decir datos de biomuestras de cabello de habitantes expuestos a algún tipo de minera que se hayan analizado con la misma técnica usada en el presente estudio (ICP-MS). Los datos definidos como referentes se obtuvieron del estudio de Dai et al. (2023) y son las concentraciones medias de REEs de los habitantes

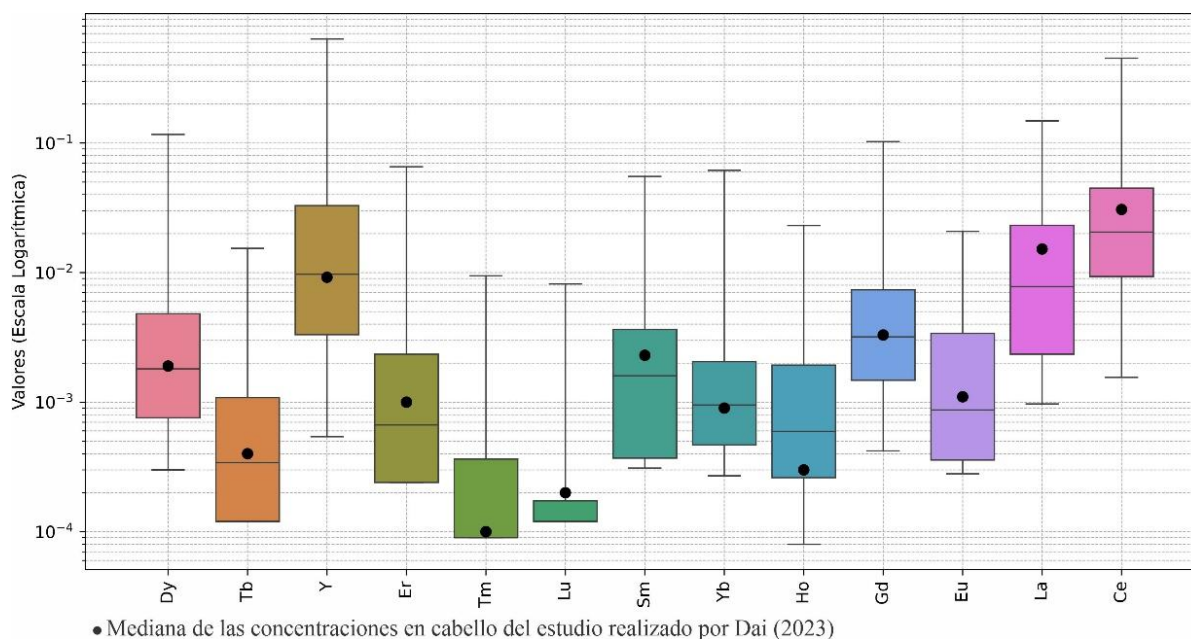
QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

expuestos a la minería de REEs de la ciudad de Shanxi, China (**Tabla 14**), estos se incluyeron en la **Figura 12**.

En esta comparación notamos la similitud entre las concentraciones medias de REEs en una zona donde se mina FeNi con respecto a las de una zona donde se da una de las explotaciones más grandes de REEs, especialmente en los elementos Dy, Tb, Y, Yb y Gd

Figura 12

Comparación entre las concentraciones en cabello de REEs de los habitantes de Montelíbano con las de los habitantes de Shanxi. Modificado de Dai (2023).



En la **Figura 13** se agrupan los diagramas de cajas y bigotes de los contenidos de REEs que se encontraron en las biomuestras analizadas de los habitantes de Montelíbano con los contenidos de REEs en la Fm. Cansona (**Tabla 1**) y las concentraciones de REEs en la corteza terrestre definidas por Kabata y Mukherjee (2007) (**Tabla 18**).

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Tabla 18*Concentraciones de REEs en la corteza terrestre (ppm).*

Elementos	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Corteza	16	33	3.9	16	3.5	1.1	3.3	0.6	3.7	0.8	2.1	0.3	2.0	0.3
terrestre	39	67	92	42	7.1	2.0	6.2	1.2	5.2	1.3	3.5	0.5	3.2	0.8

Nota. Adaptado de Kabata y Mukherjee (2007).

Estas concentraciones de REEs en la corteza se toman como valores de fondo globales ya que no hay información sobre valores de fondo locales de estos elementos en Montelíbano, con el fin de poder notar si hay alguna anomalía positiva en las concentraciones de estos elementos en la Fm. Cansona.

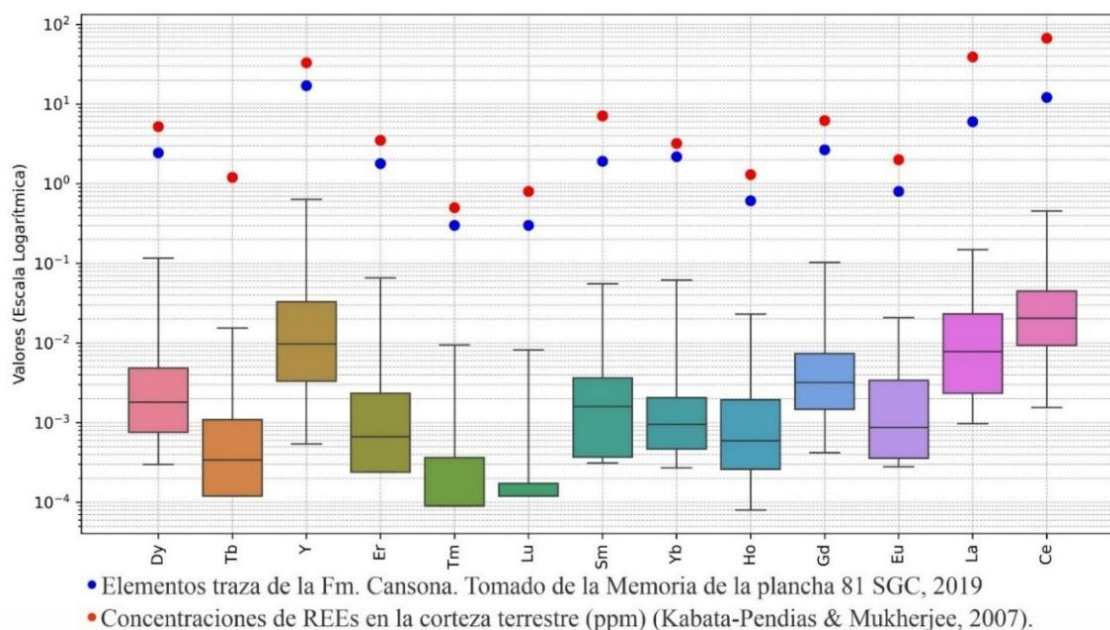
Con estos datos podemos observar que cuando la Fm. Cansona presenta concentraciones altas de REEs también hay concentraciones altas en las biomuestras, y cuando hay bajas concentraciones también bajan en las biomuestras. Esto nos indica que el aumento o disminución de las concentraciones en las biomuestras está relacionado con el contenido en la formación rocosa.

También notamos que ningún valor del contenido de REEs en la Fm. Cansona supera los valores del contenido en la corteza terrestre, por lo que no hay ninguna anomalía positiva.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Figura 13

Comparación entre los contenidos de REEs en biomuestras, en la Fm. Cansona y los valores de enriquecimiento cortical.



7.2. Características composicionales de las Formaciones Geológicas y suelo de la zona

El casco urbano de Montelíbano se encuentra ubicado sobre el Grupo Sincelejo, este se compone de areniscas ricas en sílice por lo que no se asocian con los elementos en anomalía positiva presentes en las biomuestras de cabello de los habitantes.

La Fm. Cansona muestra dentro de su composición de elementos traza las concentraciones de **Ce, Dy, Er, Eu, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Pr, Tm, Y, Yb, Sc, Sm, Tb** (REEs) y de 34 elementos (Ba, Cr, Cs, Ga, Ge, Hf, Nb, In, Th, U, V, W, Zr, Ag, Cd, Cu, Li, Mo, Ni, Pb, Sc, Sb, Se, Te, Ti, S, C, Rb, Sn, Sr, Ta, Zn, As y Hg) según *Patiño et al. (2019)*.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Tabla 19

Elementos traza de la formación Cansona con los elementos en anomalía positiva de los habitantes de Montelíbano resaltados en gris y las REEs en rojo.

Elementos traza (ppm)	Ba	Ce	Cr	Cs	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Ge	Hf	Ho	La	Lu	Nb	Nd	Pr	In
	409	12,1	30	0,6	2,44	1,79	0,8	13,4	2,66	-5	1,9	0,61	6	0,3	3,5	8,9	1,79	0,03
	Th	Tm	U	V	W	Y	Yb	Zr	Ag	Cd	Co	Cu	Li	Mo	Ni	Pb	Sc	Re
	0,8	0,3	0,5	101	-1	17	2,18	66	-0,5	-1	7	81	10	1	3	-2	17	0
	Sb	Sc	Se	Te	Tl	S	C	Rb	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Zn	As	Bi	Hg	
	0,2	9,5	0,3	0,04	0,02	0,07	0,07	16,6	1,91	1	648	0,3	0	60	1,8	0	0,01	

Nota. Adaptado de Patiño et al. (2019).

Los trabajos de caracterización química de los perfiles de la peridotita se sintetizan en la siguiente composición elemental: Gleeson et al. (2004) indico **Al, Fe, Mg, Ca, Mn, Ni, Cr, Co, Ba, V, Sr**, y de **Y** (asociado a REEs) (

Tabla 2); mientras que Castrillón et al. (2023) definió **Mg, Al, Ca, Cr, Mn, Fe, y Ni** desde la mineralogía de la peridotita laterizada (**Tabla 5**) y su FRX mostró **Mg, Al, Ca, Mn, Fe, y P** (**Tabla 6**); Tobón (2018) mostró presencia de **Mg, Al, Cr, Mn, Fe y Ni** (**Tabla 8**) y desde la mineralogía definió **Mg, Al, P, S, Ca, Cr, Mn, Fe, Co y Ni** (**Tabla 7**). Finalmente, Mejía y Durango (1982) determinaron la química elemental de las lateritas explotadas en la mina Cerro Matoso S.A. con presencia de **Al, Mg, Ni, Co y Fe** (**Tabla 9**).

La **Figura 14** resalta en la tabla periódica los elementos en anomalía positiva y REEs presentes en las biomuestras (diferenciando por colores su potencial tóxico). La gran mayoría de los elementos en anomalía están presentes en la litología asociada con la peridotita, su perfil meteorizado, lateritas y/o en el producto de la minería a excepción de B y I. Además 12 de las 13 REEs coinciden con la química que caracteriza la Fm Cansona, con excepción del Tb. Por lo que dos elementos de los que se encuentran en anomalía positiva y un elemento de tierras raras no están presentes en la geología y/o suelos del la mina Cerro Matoso S.A. y de Montelíbano.

Figura 14

Elementos en anomalía positiva y REEs presentes en la litología aflorante, el perfil de suelo meteorizado y/o como producto de la minería.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

H																			He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne		
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Uuu	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og		

*	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
**	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

	Elementos muy tóxicos (+15% datos > VRS)
	Elementos tóxicos (+15% datos > VRS)
	Elementos con toxicidad moderada (+15% datos > VRS)
	Elementos con toxicidad en determinadas condiciones (+15% datos > VRS)
	Elementos no tóxicos (+15% datos > VRS)
	Elementos de REEs

8. Discusión

El estudio se enfocó en entender el origen de los 21 elementos en anomalía positiva (15 tóxicos) y las 13 REEs encontradas en las biomuestras de los pobladores muestreados en el casco urbano de Montelíbano. Se busco verificar una posible relación entre la composición de las biomuestras y la geología alrededor de dicho casco urbano y/o las actividades antrópicas. Para esto se detalló la geoquímica de las unidades geológicas circundantes, y evidencias químicas asociadas a la actividad minera, basándose en la información mineralógica y química disponible.

La población de Montelíbano se encuentra asentada sobre el Grupo Sincelejo (Neógeno), compuesto por areniscas silíceas con líticos sedimentarios, metamórficos e ígneos. Su composición química muestra un predominio de Si, por lo que no se correlaciona con los elementos en anomalía positiva. Por otro lado, esta unidad no presenta REEs.

La síntesis del registro químico de la peridotita de Cerro Matoso, su perfil de alteración y su laterita expuesta en la mina del mismo nombre, mostró contenidos de **Al, Fe, Mg, Ca, Mn, Ni, Cr, Co, Ba, V, Sr, P, S** y el **Y**, lo que representa coincidencia con 13 de los 21 elementos con anomalía positiva y una REE de las biomuestras.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

El complejo ofiolítico compuesto en su base por la Ultramafita de Cerro Matoso (peridotita), muestra al tope las sedimentitas marinas de la Fm Cansona. Esta última unidad mostró 12 REEs (Dy, Y, Er, Tm, Lu, Sm, Yb, Ho, Gd, Eu, La y Ce) y 13 elementos en anomalía positiva (Ba, Cr, V, Co, Mo, Ni, Sb, Se, S, Sr, Sn, As y Hg). La Fm Cansona solo aflora al sur del municipio de Montelíbano, y por su lejanía con el casco urbano no se puede definir que esta formación se relacione con la presencia de REEs en las biomuestras de los habitantes de Montelíbano, por lo que debe haber otra fuente (más cercana al casco urbano de Montelíbano) de estos elementos.

En Ruiz et al. (2020) analizaron con DRX e ICP-MS muestras de un perfil meteorizado de un depósito laterítico de níquel en Cajálbana (Cuba). Este depósito fue formado a partir de procesos de meteorización de rocas máficas y ultramáficas de un complejo ofiolítico conformado por una peridotita serpentizada, protolito ultramáfico y ferricreta, componentes con gran similitud a las rocas y laterita explotada en la mina Cerro Matoso S.A. Este análisis mostró la presencia de REEs en este depósito laterítico, por ende la existencia de estos elementos de tierras raras en rocas similares a las presentes en Montelíbano ya se ha presentado en otros lugares del mundo.

Se observa similitud en las concentraciones medias medidas en las biomuestras de los habitantes de Montelíbano con los de Shanxi (China). Esta similitud es destacable teniendo en cuenta que Shanxi es una ciudad con una exposición muy alta debido a su cercanía a la mina más grande de REEs en el mundo, mientras que en Montelíbano teóricamente solo se explota ferroníquel. Actualmente no se cuenta con mediciones publicadas de REEs en la peridotita, perfil de alteración, ni laterita, por lo que es necesario ahondar en este tema.

El 70% del Boro contenido en el carbón se libera al aire durante la combustión (*Kabata y Mukherjee, 2007*). En la mina a cielo abierto Las Palmeras ubicada en el municipio de Puerto Libertador se extrae carbón (*Quiñones, 2024*) y al observar el mapa geológico de Montelíbano

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

(Figura 2) notamos que por las direcciones registradas del viento puede que los residuos o humos resultantes de esta minería se desplacen hacia el casco urbano de Montelíbano. Además en la mina Cerro Matoso S.A. el FeNi se separa por medio de su fundición en horno (PNUD, 2014) lo que también puede generar residuos por combustión. Esta puede ser la fuente antrópica de la ocurrencia de este elemento en las muestras de cabello.

El uso de suelo más frecuente en Montelíbano es la agricultura, actividad que implementa fertilizantes que pueden ser fuente de varios elementos, como el Fósforo (P), el cual se encuentra en anomalía positiva en las biomuestras.

De acuerdo con la química asociada a la actividad minera y a la geología, no se correlacionaron a estas fuentes la presencia del elementos anómalo I, ni la tierra rara Tb. Sin embargo, el I se encuentra en sedimentos marinos, caliches y fuentes hidrotermales, o en desechos industriales (Kabata y Mukherjee, 2007). De esta forma los sedimentos marinos presentes en las unidades geológicas aflorantes en Montelíbano podrían contener I, lo que explicaría su ocurrencia en las biomuestras.

El sólido residual (escoria) de la extracción de ferroníquel en la mina Cerro Matoso S.A. con 0.19% NiO y 13.3% Fe₂O₃, sumado a productos de la meteorización y erosión pueden ser movilizados a través del aire con dirección de la mina hacia el casco urbano de Montelíbano, o considerando que el río Ure tiene su cause cerca de la mina, este material puede presuntamente transportarse fácilmente aguas abajo (Idrovo et al., 2017) hacia el casco urbano de Montelíbano, por lo que puede relacionar a las anomalías positivas del Fe y el Ni.

Así mismo, las aguas analizadas en la mina de Cerro Matoso S.A. mostraron contenidos de **NH₄** y **Cr** y las aguas de corrientes superficiales o pozos **Fe, Mn y Ni**. El río Ure desemboca en el río San Jorge, del cual se abastece el casco urbano de Montelíbano (Jaguazul S.A. E.S.P., s.f.).

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Se consulto la web del acueducto para verificar los análisis de calidad de agua, pero esta información no está disponible. A través del agua pueden movilizarse los elementos desde la mina aguas hacia abajo, hasta el casco urbano de Montelíbano. Incluso si el acueducto cumpliera con la normativa 2115, esta no exige la medición de los REEs ni de parte de los elementos en anomalía (e.g. Ni, V, Sn, Sr, B, Mo) en el agua potable, siendo este un medio para la contaminación observada.

Los resultados muestran que los habitantes de Montelíbano presentan niveles de contaminación importante de elementos potencialmente tóxicos en su organismo, lo que indica un problema de salud pública, que requiere de intervención para controlar sus efectos. El Sb, As, Ba, B, Cr, Sn, Hg, Mo, Ni y Se presentan entre el 24% y 47% de sus datos por encima de los niveles de referencia en concentraciones de cabello, mientras que el Al, Fe, Mn, V y I presentan entre 56% y 81% de sus datos por encima de los niveles de referencia.

Se evidencia una correlación entre la geoquímica de formaciones no superficiales del municipio de Montelíbano y las concentraciones de elementos en el cabello de sus habitantes. Estas unidades ,y colateralmente su geoquímica, son expuestas por la actividad de la mina de Cerro Matoso S.A. Se identifica que la dirección del aire y del agua del rio Ure, desde la mina hacia el casco urbano de Montelíbano (**Figura 2**) facilitan la migración de elementos que son inhalados y absorbidos por los habitantes, generando un alto impacto en su salud.

El impacto de la composición elemental del suelo en sus distintos usos demuestra la relevancia de considerar la geología, la geoquímica y la química de las aguas al formular los Planes de Ordenamiento Territorial, con el objetivo de prevenir y reducir la exposición a elementos potencialmente riesgosos para las poblaciones.

Las limitaciones al realizar esta investigación fueron:

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

- No se dispuso de valores de referencia nacionales para la concentración de elementos en el cabello y los suelos. Esto llevó al uso de bibliografía de España, a pesar de sus diferencias geológicas y geográficas con el país.
- No se cuenta con caracterizaciones de REEs en los perfiles lateríticos ni rocas ultramáficas de la zona. Esta falta de información impidió correlacionar de forma contundente el origen de los REEs de las biomuestras con el complejo ofiolítico y la laterita generada. También hizo falta la cobertura de datos del atlas geoquímico en la zona de estudio.

Las limitaciones encontradas pueden convertirse en oportunidades para estudios interdisciplinarios, no solo en Montelíbano, sino a nivel nacional, permitiendo realizar seguimientos con valoraciones más detalladas que consideren las particularidades de cada región. Este estudio busca servir como referencia para investigaciones similares, impulsando nuevas áreas de interés tanto en el ámbito de la salud como la epidemiología, y en las geociencias, incluyendo la geología médica, la geoquímica y la geología ambiental.

9. Conclusiones

- De los 68 elementos analizados, 21 presentaron anomalía positiva: B, Mg, Al, P, S, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, As, Se, Sr, Mo, Sn, Sb, I, Ba y Hg. De estos, 15 se consideran potencialmente tóxicos: B, Al, V, Cr, Mn, Fe, Ni, As, Se, Mo, Sn, Sb, I, Ba y Hg.
- Se encontró relación entre las formaciones geológicas subsuperficiales y antiguas y suelos de Montelíbano con las concentraciones anómalas de 13 elementos tóxicos (Al, V, Cr, Mn, Fe, Ni, As, Se, Mo, Sn, Sb, Ba y Hg), 6 elementos no tóxicos (Mg, P, S, Ca, Co y Sr) y con la ocurrencia de 12 tierras raras (Dy, Y, Er, Tm, Lu, Sm, Yb, Ho, Gd, Eu, La y Ce).

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

- Se identificó que los elementos Al, Sb, As, Ba, Cr, Fe, Mn, Hg, Ni e I presentan un sesgo positivo (hacia la derecha), indicando la existencia de valores extremos altos, mientras que B, Sn, Mo, Se y V presentan un sesgo negativo (hacia la izquierda), sugiriendo predominancia de valores bajos en sus concentraciones.
- La anomalía de B se puede presuntamente estar asociar a fuentes antrópicas, específicamente la minería de carbón, al procesamiento de ferroníquel y la del I a los sedimentos marinos de las formaciones geológicas presentes en Montelíbano. Además, el P tiene un origen adicional antrópica debido al uso de fertilizantes en la agricultura.
- Las anomalías positivas de Fe y Ni están directamente relacionadas con los residuos mineros, ya que la escoria residual presenta un 0.19% de NiO y un 13.3% de Fe₂O₃ (porcentaje en peso).

10. Recomendaciones

- Profundizar en estudios geológicos y geoquímicos para actualizar la información existente, incluyendo el muestreo y análisis de datos en Montelíbano y zonas aledañas como Pueblo Flecha. Esto permitirá generar mapas geoquímicos y evaluar la concentración de elementos, con especial énfasis en tierras raras en lateritas y rocas ofiolíticas, así como el contenido de Tb, cuya ausencia es inusual dada su afinidad química con las REEs.
- Realizar análisis de aguas, suelos y sedimentos, considerando elementos potencialmente tóxicos en anomalía positiva. Igualmente, se recomienda realizar estudios sobre fertilizantes y plaguicidas utilizados en la zona, además de análisis composicionales en cultivos y animales de consumo humano para evaluar su impacto en la salud de la población.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

- Utilizar estudios como este en la elaboración del Plan de Ordenamiento Territorial de Montelíbano e impulsar la creación de normativas que regulen las concentraciones elementales en suelos, sedimentos y personas, con el fin de mitigar riesgos ambientales y sanitarios.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Referencias bibliográficas

Aeropuerto de Montelíbano. (s.f.) Informe meteorológico para SKML - Montelíbano. Recuperado de <https://metar-taf.com/es/SKML>.

AGROSAVIA. (s.f.). Fertilización del maíz en asociación con ñame en el Valle del Sinú. Recuperado de <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/12040>.

Aiglsperger, T. H. (2015). Mineralogy and geochemistry of the platinum group elements (PGE), rare earth elements (REE) and scandium in nickel laterites.

Ali, A., Abbasi, I. A., Nogueira, L. B., Hersi, O. S., Al Kindi, S. A. N., El-Ghali, M. A. K., & Nasir, S. J. (2021). Geochemical and C–O isotopic study of ophiolite-derived carbonates of the Barzaman Formation, Oman: Evidence of natural CO₂ sequestration via carbonation of ultramafic clasts. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(10), e2020JB021290. <https://doi.org/10.1029/2020JB021290>

Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2007). Toxicological Profile for Lead. U.S. Department of Health and Human Services.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2009). *Technical Support Document for a Methylmercury Reference Dose as a Basis for Fish Consumption Advisories* (Technical report). U.S. Department of Health and Human Services. <https://www.atsdr.cdc.gov/hac/pha/MethylmercuryReference/TechnicalSupportDocumentforAMethylmercuryReferenceDoseasaBasisforFCSVs9-10-2009.pdf>

Barrantes, L. C., López, C., Patiño, A., Pinilla, A., Ramos, J. A., Ramos, K. G., Savanier, D., Orozco, L. A., Rodríguez, G., López, J. A., Cortés Castillo, E., Lozano Gutiérrez, L., Gómez Medina, D., Salazar Ortiz, E. A., Sotelo Salas, A. P., Martínez, E. A., García, G. D., Forero, A. J., Cetina, L. M., Duarte, J. A., Parra C., R. A., Patiño, H. A., & Torres, E.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

- M. (2019). Memoria explicativa de la Plancha 81 – Puerto Libertador (1:100.000), Departamento de Córdoba. Servicio Geológico Colombiano.
- Becker, J. S. (2007). Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). *Journal of Mass Spectrometry*, 42(6), 635-647. <https://doi.org/10.1002/jms.1206>
- Bermúdez Cordero, J. G., Arango, M. I., Rodríguez García, G., Zapata García, G., & Ramírez Cardona, C. (2012). Cartografía geológica de las Planchas 72 Pueblo Nuevo y 82 Montelíbano, Departamento de Córdoba. Ingeominas.
- Castrillón, A., Lartaud, F., Delgado, A., Núñez, F. (2023). Mineralogical, petrographic, and geochemical analyzes which confirm the hydrothermal origin of the sediments that overlie the peridotites of Cerro Matoso, Colombia. *Boletín de Geología UIS*. <https://doi.org/10.18273/revbol.v45n1-2023003>
- Chang, C.-W., Wu, C.-H., Wang, R.-H., Lo, Y.-T., & Liao, P.-C. (2024). Establishing a biomonitoring baseline by characterizing the hair metabolome across age and sex using high-resolution mass spectrometry. *Journal of Environmental Exposure Assessment*, 3, 19. <http://dx.doi.org/10.20517/jeea.2024.17>
- Dai, Lijun, Jinsong Ge, Lingqing Wang, Xiaoming Wan, Guanghui Guo, Tao Liang, Nanthi Bolan, Thilo Rennert, y Jörg Rinklebe. 2023. "Hair-biomonitoring assessment of rare-earth-element exposure in residents of the largest rare-earth mining and smelting area of China." *Environment International* 179: 108177. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108177>.
- Economou-Eliopoulos, M., Laskou, M., Eliopoulos, D. G., Megremi, I., Kalatha, S., & Eliopoulos, G. D. (2021). Origin of critical metals in Fe–Ni laterites from the Balkan Peninsula: Opportunities and environmental risk. *Minerals*, 11(9), 1009.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

- Eisa, M. E., & Mars, J. A. (2021). Trace Elements in Scalp-Hair of Students from Four Different Environmental Contexts. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(1).
- Gleeson, S. A., R. J. Herrington, J. Durango, C. A. Velásquez, G. Koll. 2004. "The Mineralogy and Geochemistry of the Cerro Matoso S.A. Ni Laterite Deposit, Montelíbano, Colombia." *Economic Geology* 99(6): 1197–1213. <https://doi.org/10.2113/99.6.1197>.
- Goyer, R. A. (1990). *Toxic effects of metals*. In C. D. Klaassen (Ed.), *Casarett & Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons* (4th ed., pp. 691–736). Macmillan. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4427717/>
- Hernández, Y., Carriazo, J. G., Almanza, O. (2006). Characterization by XRD and electron paramagnetic resonance (EPR) of waste materials from “Cerro Matoso” Mine (Colombia). *Materials characterization*, 57(1), 44-49.
- Hudson Institute of Mineralogy. s.f. "Mindat.org - The Mineral Database." Accedido el [fecha de acceso]. <https://www.mindat.org/>.
- Iaquinta, F., Álvarez, C., Cousillas, A., Mañay, N. (2019). Desarrollo y optimización de una metodología para la determinación de metales y semimetales en cabello. *INNOTEC*, (18), 142–153. <https://doi.org/10.26461/18.01>
- Iribarren, I., Alvaro, Pinilla, P., Instituto Geológico y Minero de España, & Ministerio de Educación y Ciencia (Eds.). (2008). DETERMINACION DE NIVELES DE FONDO Y NIVELES GENERICOS DE REFERENCIA PARA METALES EN SUELOS DE LA COMUNIDAD AUTONOMA DE ARAGON (PROYECTO No 406: ASISTENCIA TECNICA A LA COMUNIDAD AUTONOMA DE ARAGON EN MATERIA DE

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

SUELOS

CONTAMINADOS).

https://info.igme.es/SidPDF/130000/253/130253_0000003.pdf

Idrovo, A. J., Rivero-Rubio, C., & Amaya-Castellanos, C. (2017). Perception of pollution and arsenic in hair of indigenous living near a ferronickel open-pit mine (Córdoba, Colombia): Public health case report. *Revista de la Universidad Industrial de Santander. Salud*, 49(1), 115-123.

Jaguazul S.A. E.S.P. (s.f.). *Nuestra reseña*. Recuperado de <https://www.jaguazul.com.co/resena-jaguazul/>.

Jarup, L. (2003). *Hazards of heavy metal contamination*. *British Medical Bulletin*, 68(1), 167–182.
<https://academic.oup.com/bmb/article/68/1/167/421303>

Kabata-Pendias, A., & Mukherjee, A. B. (2007). *Trace elements from soil to human*. Springer.

Kalatha, S., Perraki, M., Economou-Eliopoulos, M., & Mitsis, I. (2017). On the origin of bastnaesite-(La, Nd, Y) in the Nissi (Patitira) bauxite laterite deposit, Lokris, Greece. *Minerals*, 7(3), 45.

Lenntech. (s. f.). Tabla periódica de los elementos. Recuperado 25 de abril de 2023, de <https://www.lenntech.es/periodica/tabla-periodica.htm>

Liu, Y., Han, Y., Shi, L., Wang, J., & Zhang, X. (2022). Evaluation of five digestion methods for multi-element analysis in human hair using ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 37(12), 2521-2530. <https://doi.org/10.1039/D2JA00271A>

Macías Vázquez, F., & Calvo De Anta, R. (2008). Niveles genéricos de referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de Galicia. Xunta De Galicia, Consellería De

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Medio Ambiente E Desenvolvimento Sostible.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=700884>

Macías Vázquez, F., Luis Calvo, E., Gonzales Suárez, C., Pena Pérez, J., Lado, L. R., Calvo de Anta, R., Pérez Llaguno, C., Mantilla Mosquera, N., Rodríguez Lado, L., & Lomba Martínez, X. (2016). Niveles genéricos de referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de Galicia. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2047.0644>

Martínez-Sánchez, J., Pérez-Torres, I., & Cruz-González, P. (2023). Cardiovascular effects of heavy metal exposure: mechanisms and clinical implications. *Journal of Environmental Cardiology*, 10(2), 98–112.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1018364722000465>

Maya, M., Gonzalez, H. (1995). Unidades litodémicas en la Cordillera Central de los Andes Colombianos. *Boletín Geológico INGEOMINAS* 35 (2-3):1-145. Santafé de Bogotá.

Mejía A, V., Durango, R. (1982). Geología de lateritas níquelíferas de Cerro Matoso S.A. Universidad Nacional de Colombia. *Boletín geológico*.

Mikulewicz, R., Chojnacka, K. W., Gedrange, T., & Górecki, H. (2013). Reference values of elements in human hair: A systematic review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 36(3), 1077–1086. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2013.09.012>

Montaser, L., Golightly, D. W. (1998). *Inductively coupled plasma in analytical atomic spectrometry* (2.^a ed., pp. 300–330). Wiley-Interscience.

Patiño, A., Pinilla, A., Cristancho, A., Ibáñez Peña, R., Savanier, D., Orozco, L. A., Dávila Gómez, C., López, C., Quiñonez, C., Ramos, J. A., Gil, C. A., Ramos, K. G., Román, J. A., Sotelo Salas, A. P., López, J. A., Cortés Castillo, E., Lozano Gutiérrez, L., Gómez Medina, D.,

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

- Salazar Ortiz, E. A., Martínez, E. A., García, G. D., Forero, A. J., Cetina, L. M., Duarte, J. A., Parra C., R. A., Patiño, H. A., & Torres, E. M. (2019). Memoria explicativa de la Plancha 92 – Tierradentro (1:100.000), Departamentos de Córdoba y Antioquia [Mapa geológico]. Servicio Geológico Colombiano.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2014). Perfil productivo de Montelíbano. PNUD Colombia. https://issuu.com/pnudcol/docs/perfil_productivo_montel_bano
- Quiñones Argote, L. M. (2024). Seguimiento de las operaciones mineras, cartografía geológica de los mantos de carbón e interpretación de registros de pozos de la mina Las Palmeras ubicada en el municipio de Puerto Libertador, Córdoba [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander]. <https://noesis.uis.edu.co/items/31280ee3-aae8-4adb-a718-c17bf7d90977>
- Ruiz Cruz, R. A. (2014). Comportamiento epidemiológico de las concentraciones de metales pesados y oligoelementos en muestras de cabello de niños en edad escolar de la ciudad de Elche. (Doctor). Universidad Miguel Hernández de Elche. Recuperado de <http://dspace.umh.es/handle/11000/1633?mode=full>
- Ruiz-Quintana, Juan, Alain Carballo-Peña, José Nicolás Muñoz-Gómez, y Gerardo Antonio Orozco-Melgar. 2020. "Concentraciones anómalas de escandio y samario en el depósito laterítico de níquel Cajálbana." *Minería y Geología* 36(2): 124-136.
- Saz, P., Gálves, J. J., Ortiz, M., & Saz, S. (2010). Oligoterapia. fundamentos. *Offarm*, 29–6, 86–91. <https://www.elsevier.es/pt-revista-offarm-4-articulo-oligoterapia-fundamentos-X0212047X10875698#:~:text=Macrolementos%20o%20elementos%20abundantes%3A%20ox%C3%ADgeno,%20cloro%20hierro%20y%20magnesio.&text=Element>

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

[os%20traza%20\(oligoelementos\)%3A%20f%20C3%BAor,%20molibdeno%20cr
omo%20y%20cobalto.](#)

Smith, D., Jones, M. (2010). *Trace elements in human health: essentiality and toxicity*. International Journal of Environmental Health Research, 20(2), 113–127.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16125765/>

Tobón Mazo, M, J., (2018). Geoquímica y mineralogía de los elementos del grupo del platino (EGP) en las lateritas niquelíferas de cerro matoso y planeta rica, Colombia. Universidad Nacional de Colombia.

Unidad de Planeación Minero Energética. (2009). El níquel en Colombia. UPME.
https://www1.upme.gov.co/Hemeroteca/Impresos/Niquel_colombia_2009.pdf

Walco Agro S.A.S. (s.f.). Procesos de aplicación de fertilizantes y productos agrícolas en cultivos colombianos. Recuperado de <https://walcoagrosas.com/procesos-de-aplicacion-de-fertilizantes-y-productos-agricolas-para-los-diferentes-cultivos-colombianos-adaptacion-a-las-condiciones-de-los-departamentos-y-sus-variables-de-temperatura/>.

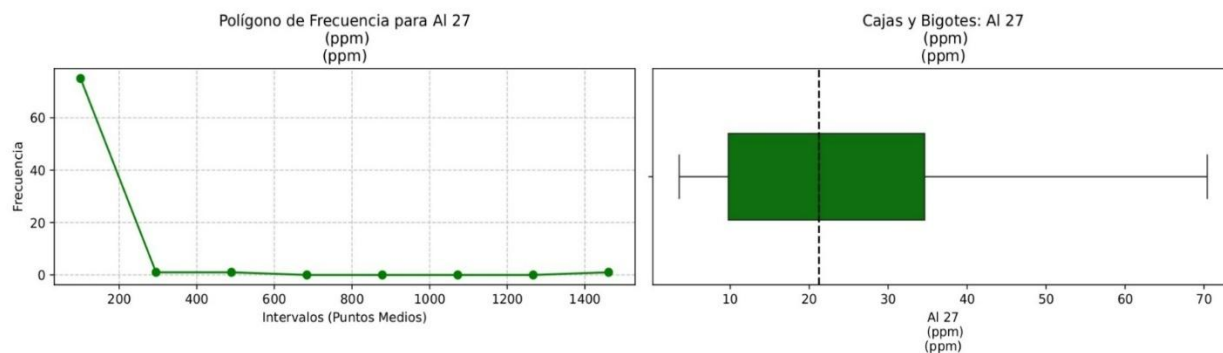
Wang, X., Li, Z., & Chen, Q. (2022). Peripheral arterial disease and heavy metal exposure: a meta-analysis. *Journal of Vascular Health*, 18(2), 77–85.
<https://doi.org/10.1016/j.jvasc.2021.10.011>

Zhang, R., Sun, D., & Huang, J. (2023). Cardiometabolic toxicity of cadmium and lead: pathways to disease. *Chemico-Biological Interactions*, 373, 110344.
<https://doi.org/10.1016/j.cbi.2023.110344>

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Apéndice

Apéndice A. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Aluminio.

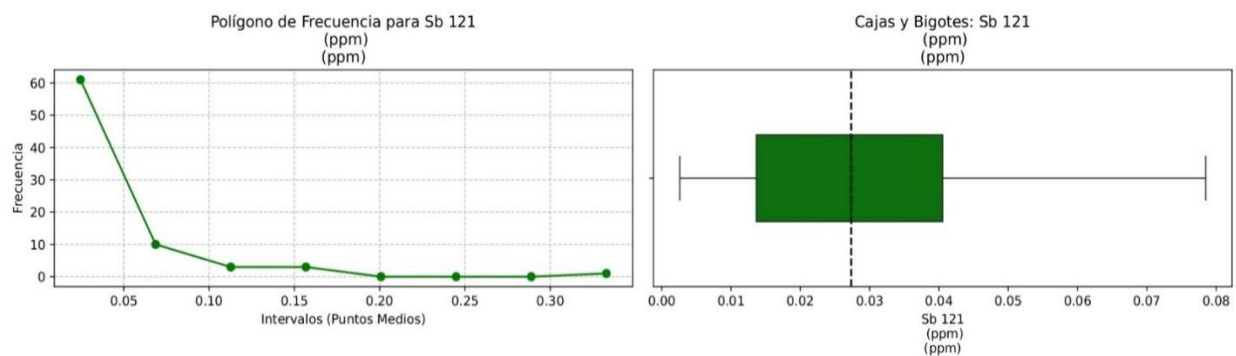


Apéndice B. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Aluminio.

	Al (ppm)
Media	58.448
Mediana	21.234
Moda	3.527
Desv. Estándar	185.949
Mínimo	3.527
Máximo	1.558.477
Cuartil 1	9.750
Cuartil 2	21.234
Cuartil 3	34.616
Rango intercuartil	24.866
Valor atípico C1	9.750
Valor atípico C3	34.616
Rango	1.554.950
Amplitud	222.136

Tabla de frecuencia absoluta	
Clase	Frecuencia
[3.527, 225.663]	75
[225.663, 447.798]	1
[447.798, 669.934]	1
[669.934, 892.07]	0
[892.07, 1114.205]	0
[1114.205, 1336.341]	0
[1336.341, 1558.477]	1
Total	78

Apéndice C. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Antimonio.



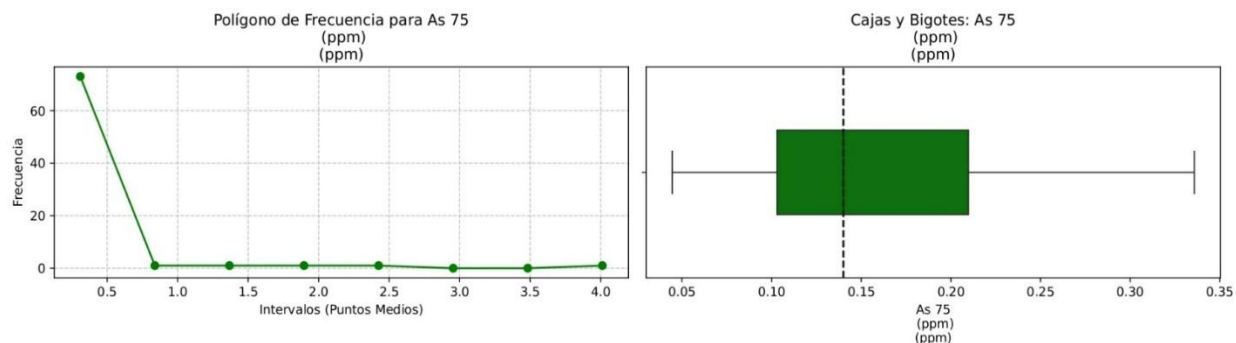
QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Apéndice D. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Antimonio.

	Sb (ppm)
Media	0.039
Mediana	0.027
Moda	0.003
Desv. Estándar	0.050
Mínimo	0.003
Máximo	0.355
Cuartil 1	0.014
Cuartil 2	0.027
Cuartil 3	0.041
Rango intercuartil	0.027
Valor atípico C1	0.014
Valor atípico C3	0.041
Rango	0.352
Amplitud	0.050

Tabla de frecuencia absoluta	
Clase	Frecuencia
[0.003, 0.053]	64
[0.053, 0.103]	9
[0.103, 0.154]	2
[0.154, 0.204]	2
[0.204, 0.254]	0
[0.254, 0.305]	0
[0.305, 0.355]	1
Total	78

Apéndice E. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Arsénico.



Apéndice F. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Arsénico.

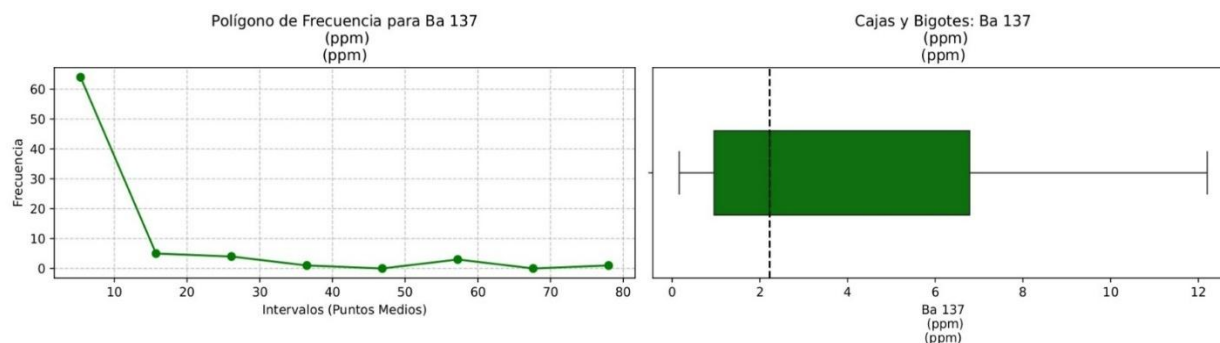
	As (ppm)
Media	0.293
Mediana	0.140
Moda	0.045
Desv. Estándar	0.594
Mínimo	0.045
Máximo	4.276
Cuartil 1	0.103
Cuartil 2	0.140
Cuartil 3	0.210
Rango intercuartil	0.107
Valor atípico C1	0.103

Tabla de frecuencia absoluta	
Clase	Frecuencia
[0.045, 0.649]	73
[0.649, 1.254]	1
[1.254, 1.858]	1
[1.858, 2.463]	2
[2.463, 3.067]	0
[3.067, 3.672]	0
[3.672, 4.276]	1
Total	78

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Valor atípico C3	0.210
Rango	4.232
Amplitud	0.605

Apéndice G. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Bario.

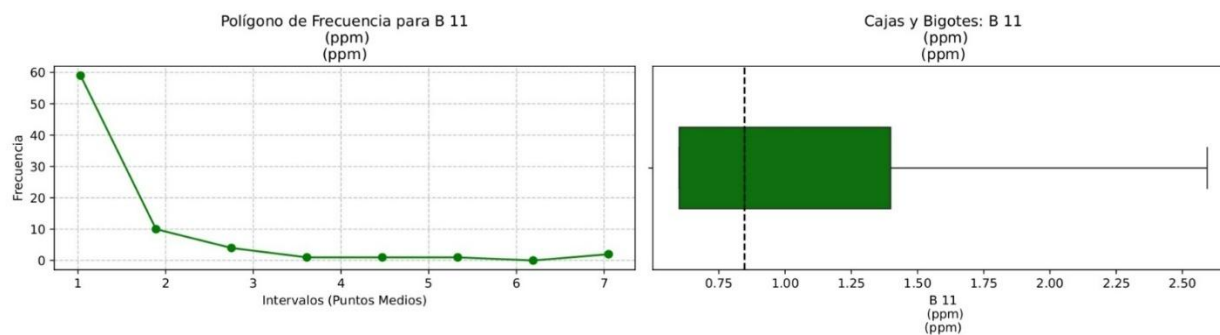


Apéndice H. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Bario.

	Ba(ppm)
Media	8.113
Mediana	2.224
Moda	0.161
Desv. Estándar	15.393
Mínimo	0.161
Máximo	83.183
Cuartil 1	0.957
Cuartil 2	2.224
Cuartil 3	6.786
Rango intercuartil	5.829
Valor atípico C1	0.957
Valor atípico C3	6.786
Rango	83.022
Amplitud	11.860

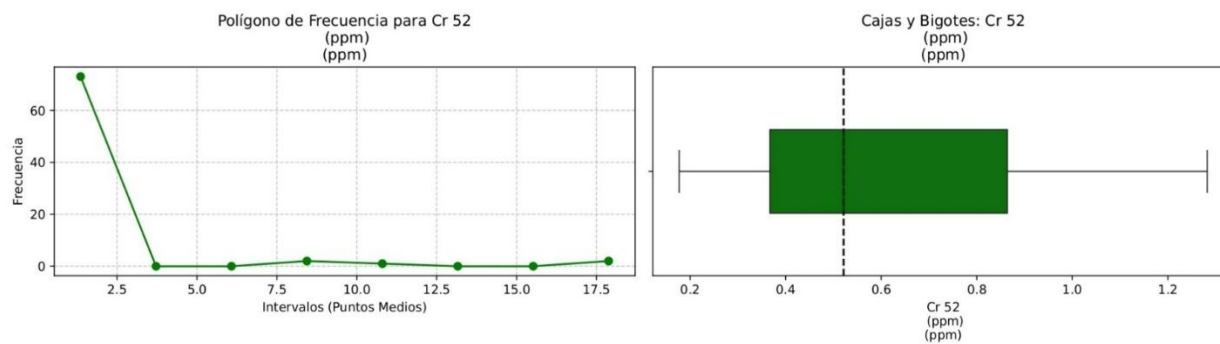
Tabla de frecuencia absoluta	
Clase	Frecuencia
[0.161, 12.021]	67
[12.021, 23.881]	4
[23.881, 35.742]	3
[35.742, 47.602]	0
[47.602, 59.462]	1
[59.462, 71.323]	2
[71.323, 83.183]	1
Total	78

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Apéndice I. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Boro.**Apéndice J.** Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Boro.

	B (ppm)
Media	1.312
Mediana	0.847
Moda	0.600
Desv. Estándar	1.344
Mínimo	0.600
Máximo	7.482
Cuartil 1	0.600
Cuartil 2	0.847
Cuartil 3	1.398
Rango intercuartil	0.798
Valor atípico C1	0.600
Valor atípico C3	1.398
Rango	6.882
Amplitud	0.983

Tabla de frecuencia absoluta	
Clase	Frecuencia
[0.6, 1.583]	59
[1.583, 2.566]	11
[2.566, 3.549]	3
[3.549, 4.532]	1
[4.532, 5.516]	1
[5.516, 6.499]	1
[6.499, 7.482]	2
Total	78

Apéndice K. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Cromo.

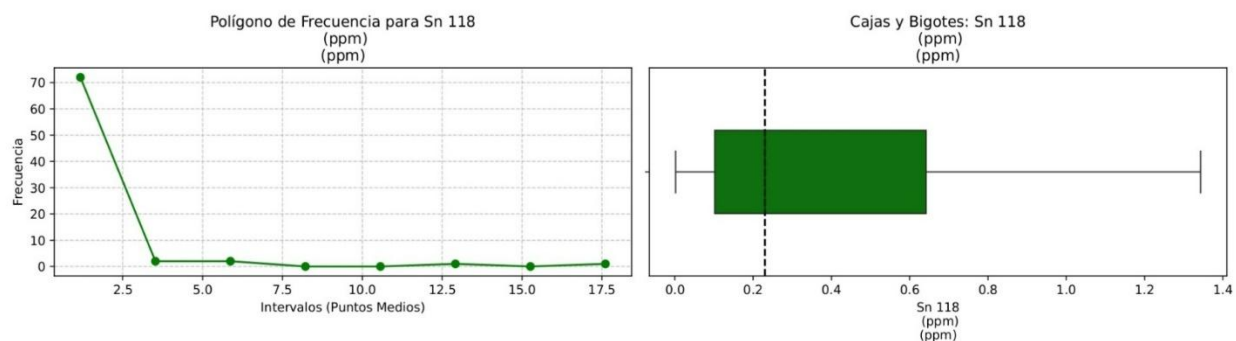
QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Apéndice L. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Cromo.

	Cr (ppm)
Media	1.415
Mediana	0.521
Moda	0.177
Desv. Estándar	3.214
Mínimo	0.177
Máximo	19.062
Cuartil 1	0.367
Cuartil 2	0.521
Cuartil 3	0.864
Rango intercuartil	0.497
Valor atípico C1	0.367
Valor atípico C3	0.864
Rango	18.885
Amplitud	2.698

Tabla de frecuencia absoluta	
Clase	Frecuencia
[0.177, 2.875]	73
[2.875, 5.573]	0
[5.573, 8.271]	1
[8.271, 10.969]	2
[10.969, 13.666]	0
[13.666, 16.364]	0
[16.364, 19.062]	2
Total	78

Apéndice M. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Estaño.



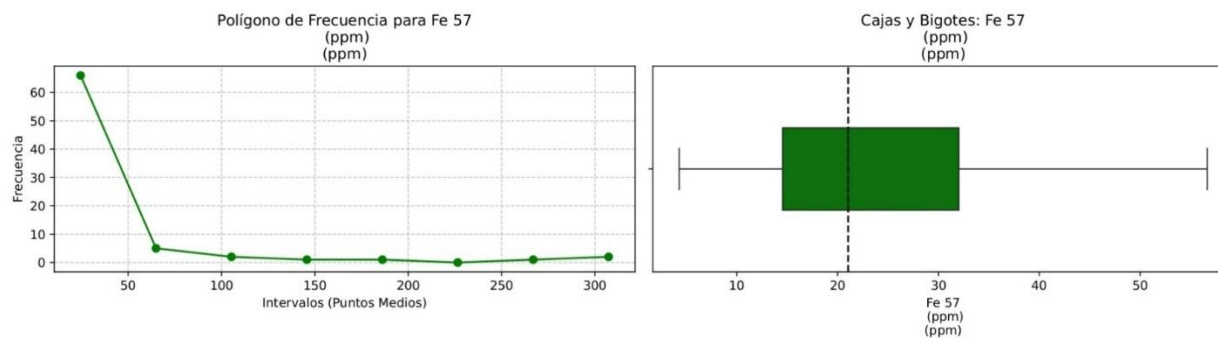
Apéndice N. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el estaño.

	Sn (ppm)
Media	0.975
Mediana	0.230
Moda	0.002
Desv. Estándar	2.656
Mínimo	0.002
Máximo	18.783
Cuartil 1	0.102
Cuartil 2	0.230
Cuartil 3	0.642
Rango intercuartil	0.540
Valor atípico C1	0.102

Tabla de frecuencia absoluta	
Clase	Frecuencia
[0.002, 2.685]	73
[2.685, 5.368]	1
[5.368, 8.051]	2
[8.051, 10.734]	0
[10.734, 13.417]	1
[13.417, 16.1]	0
[16.1, 18.783]	1
Total	78

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Valor atípico C3	0.642
Rango	18.781
Amplitud	2.683

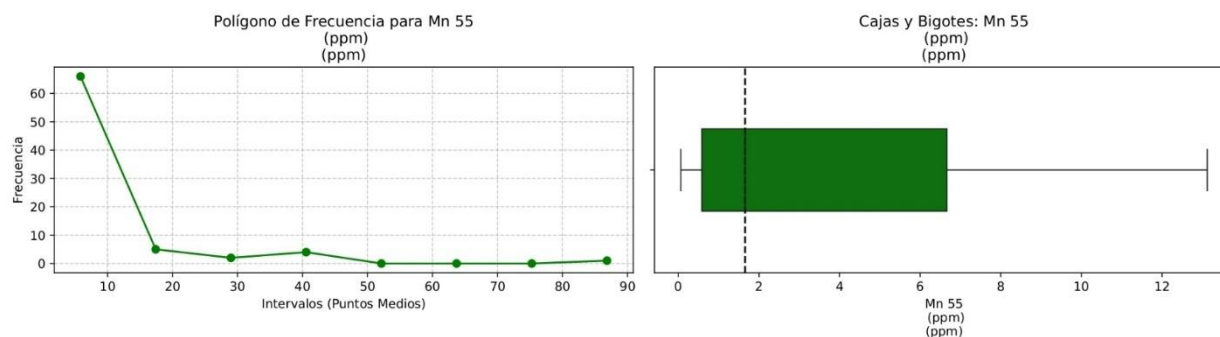
Apéndice O. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Hierro.**Apéndice P.** Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Hierro.

	Fe (ppm)
Media	39.462
Mediana	21.043
Moda	4.285
Desv. Estándar	58.919
Mínimo	4.285
Máximo	327.560
Cuartil 1	14.542
Cuartil 2	21.043
Cuartil 3	32.026
Rango intercuartil	17.484
Valor atípico C1	14.542
Valor atípico C3	32.026
Rango	323.275
Amplitud	46.182

Tabla de frecuencia absoluta	
Clase	Frecuencia
[4.285, 50.467]	66
[50.467, 96.649]	5
[96.649, 142.831]	2
[142.831, 189.013]	2
[189.013, 235.196]	0
[235.196, 281.378]	1
[281.378, 327.56]	2
Total	78

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Apéndice Q. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Manganeso.

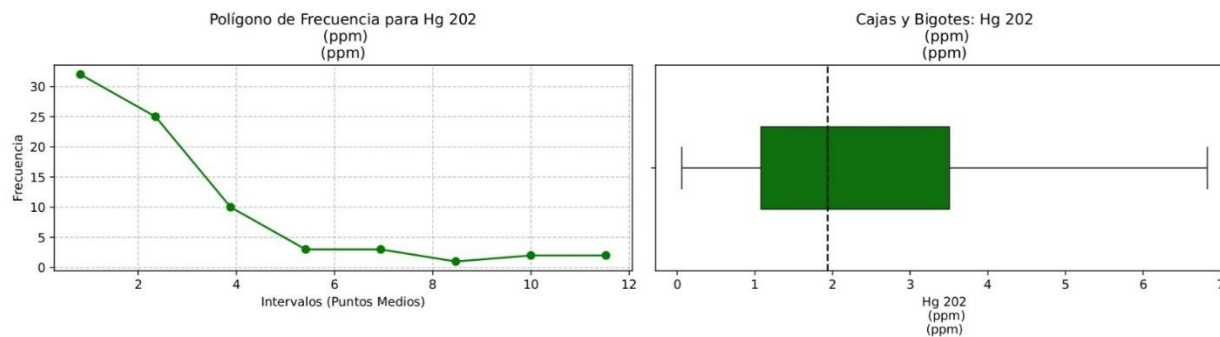


Apéndice R. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Manganeso.

	Mn (ppm)
Media	6.800
Mediana	1.656
Moda	0.061
Desv. Estándar	13.654
Mínimo	0.061
Máximo	92.634
Cuartil 1	0.583
Cuartil 2	1.656
Cuartil 3	6.664
Rango intercuartil	6.081
Valor atípico C1	0.583
Valor atípico C3	6.664
Rango	92.573
Amplitud	13.225

Tabla de frecuencia absoluta	
Clase	Frecuencia
[0.061, 13.286]	69
[13.286, 26.51]	3
[26.51, 39.735]	3
[39.735, 52.96]	2
[52.96, 66.184]	0
[66.184, 79.409]	0
[79.409, 92.634]	1
Total	78

Apéndice S. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Mercurio.



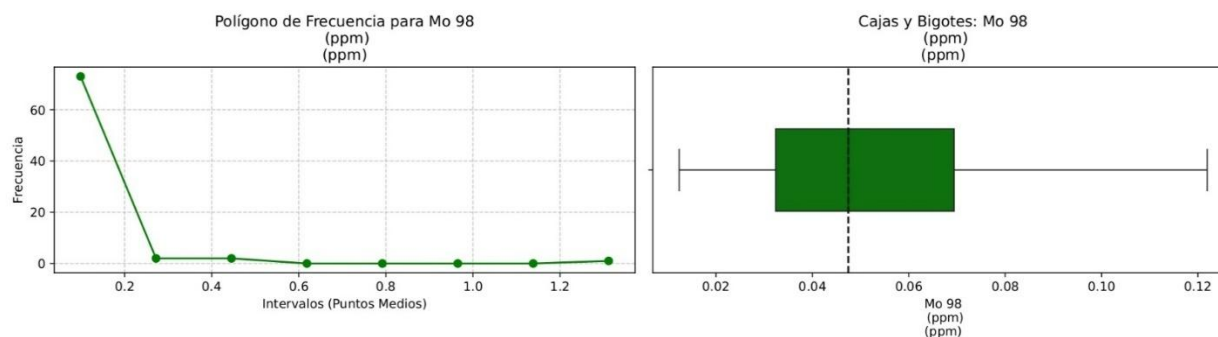
QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Apéndice T. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Mercurio.

	Hg (ppm)
Media	2.765
Mediana	1.938
Moda	0.059
Desv. Estándar	2.623
Mínimo	0.059
Máximo	12.292
Cuartil 1	1.078
Cuartil 2	1.938
Cuartil 3	3.506
Rango intercuartil	2.428
Valor atípico C1	1.078
Valor atípico C3	3.506
Rango	12.233
Amplitud	1.748

Tabla de frecuencia absoluta	
Clase	Frecuencia
[0.059, 1.807]	36
[1.807, 3.554]	23
[3.554, 5.302]	9
[5.302, 7.049]	4
[7.049, 8.797]	2
[8.797, 10.545]	1
[10.545, 12.292]	3
Total	78

Apéndice U. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Molibdeno.



Apéndice V. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Molibdeno.

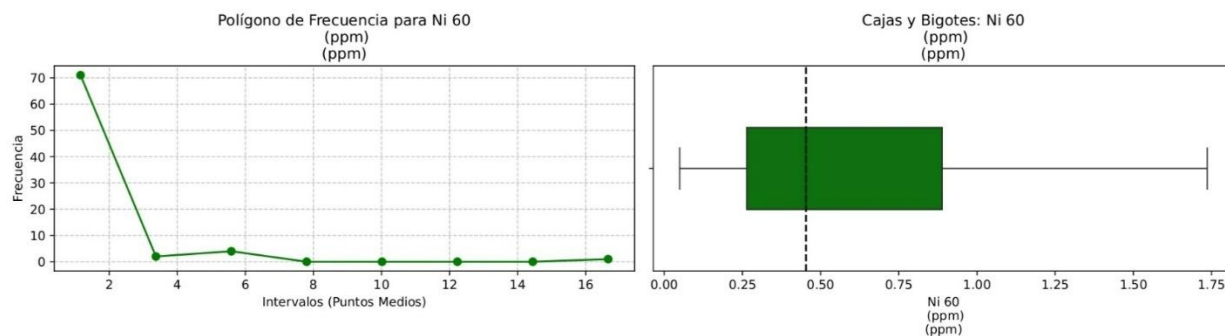
	Mo (ppm)
Media	0.085
Mediana	0.047
Moda	0.012
Desv. Estándar	0.169
Mínimo	0.012
Máximo	1.399
Cuartil 1	0.032
Cuartil 2	0.047
Cuartil 3	0.069
Rango intercuartil	0.037
Valor atípico C1	0.032

Tabla de frecuencia absoluta	
Clase	Frecuencia
[0.012, 0.21]	73
[0.21, 0.408]	2
[0.408, 0.606]	2
[0.606, 0.804]	0
[0.804, 1.002]	0
[1.002, 1.201]	0
[1.201, 1.399]	1
Total	78

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Valor atípico C3	0.069
Rango	1.386
Amplitud	0.198

Apéndice W. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Níquel.



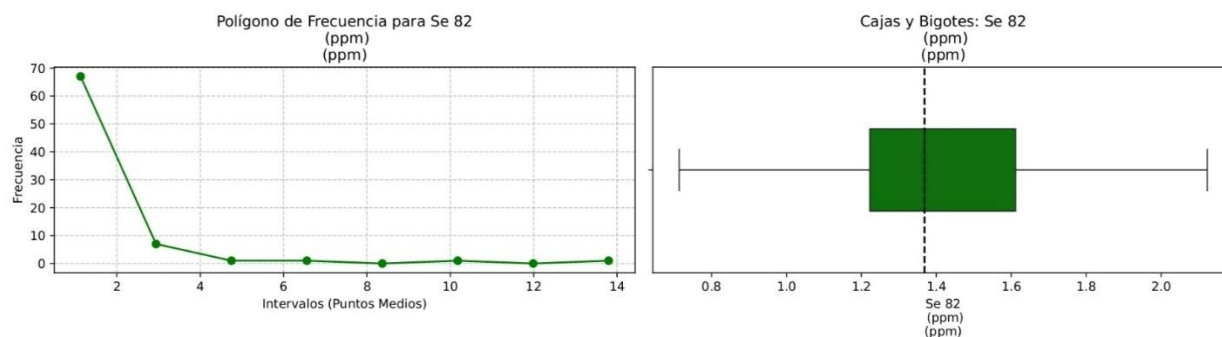
Apéndice X. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Níquel.

	Ni (ppm)
Media	1.073
Mediana	0.453
Moda	0.049
Desv. Estándar	2.244
Mínimo	0.049
Máximo	17.767
Cuartil 1	0.264
Cuartil 2	0.453
Cuartil 3	0.889
Rango intercuartil	0.625
Valor atípico C1	0.264
Valor atípico C3	0.889
Rango	17.718
Amplitud	2.531

Tabla de frecuencia absoluta	
Clase	Frecuencia
[0.049, 2.581]	71
[2.581, 5.112]	3
[5.112, 7.643]	3
[7.643, 10.174]	0
[10.174, 12.705]	0
[12.705, 15.236]	0
[15.236, 17.767]	1
Total	78

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Apéndice Y. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Selenio.

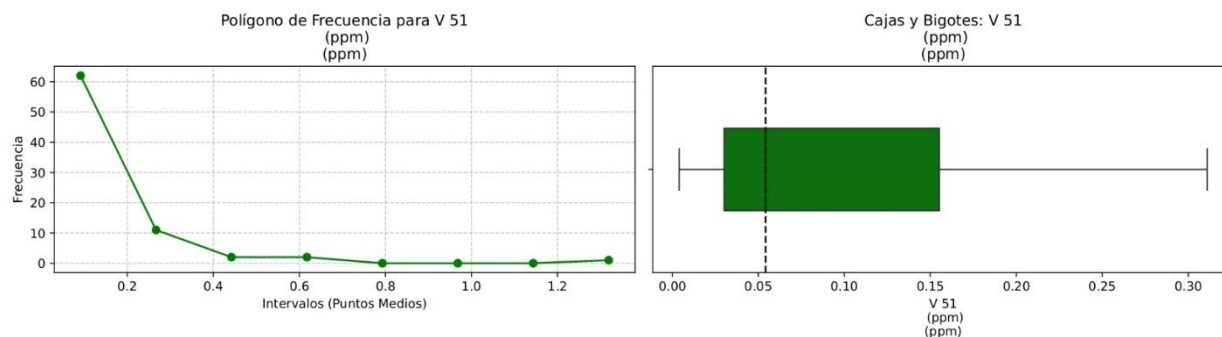


Apéndice Z. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Selenio.

	Se (ppm)
Media	1.817
Mediana	1.368
Moda	0.225
Desv. Estándar	1.989
Mínimo	0.225
Máximo	14.704
Cuartil 1	1.223
Cuartil 2	1.368
Cuartil 3	1.612
Rango intercuartil	0.389
Valor atípico C1	1.223
Valor atípico C3	1.612
Rango	14.479
Amplitud	2.068

Tabla de frecuencia absoluta	
Clase	Frecuencia
[0.225, 2.294]	69
[2.294, 4.362]	5
[4.362, 6.43]	1
[6.43, 8.499]	1
[8.499, 10.567]	1
[10.567, 12.635]	0
[12.635, 14.704]	1
Total	78

Apéndice AA. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Vanadio.



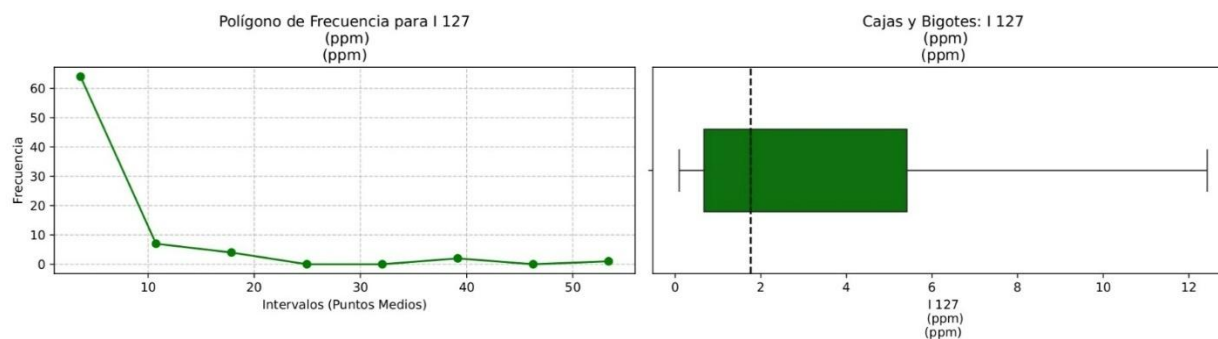
QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Apéndice BB. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Vanadio.

	V (ppm)
Media	0.123
Mediana	0.054
Moda	0.004
Desv. Estándar	0.192
Mínimo	0.004
Máximo	1.406
Cuartil 1	0.030
Cuartil 2	0.054
Cuartil 3	0.155
Rango intercuartil	0.125
Valor atípico C1	0.030
Valor atípico C3	0.155
Rango	1.402
Amplitud	0.200

Tabla de frecuencia absoluta	
Clase	Frecuencia
[0.004, 0.204]	66
[0.204, 0.405]	9
[0.405, 0.605]	1
[0.605, 0.805]	1
[0.805, 1.006]	0
[1.006, 1.206]	0
[1.206, 1.406]	1
Total	78

Apéndice CC. Gráfico de frecuencia absoluta y diagrama de cajas y bigotes para el Yodo.



Apéndice DD. Datos estadísticos y de frecuencia absoluta para el Yodo.

	I (ppm)
Media	5.305
Mediana	1.765
Moda	0.093
Desv. Estándar	9.462
Mínimo	0.093
Máximo	56.929
Cuartil 1	0.674
Cuartil 2	1.765
Cuartil 3	5.414
Rango intercuartil	4.739
Valor atípico C1	0.674

Tabla de frecuencia absoluta	
Clase	Frecuencia
[0.093, 8.213]	65
[8.213, 16.332]	7
[16.332, 24.451]	3
[24.451, 32.571]	0
[32.571, 40.69]	1
[40.69, 48.809]	1
[48.809, 56.929]	1
Total	78

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Valor atípico C3	5.414
Rango	56.835
Amplitud	8.119

Apéndice EE. Recopilación de la distribución geológica de los elementos con anomalía positiva su impactos en la salud y como impacta la minería e industria en su concentración.

Elemento	Geología y Yacimientos	Minería y Contaminación	Toxicidad y Salud
Bario (Ba)	Depósitos estratiformes, vetas hidrotermales y sulfuros masivos.	Aguas de minas de carbón pueden contener hasta 2.500 mg/L.	Se acumula en piel, hígado, huesos, sangre y orina. Puede causar hipertensión y arritmias.
Boro (B)	En fracción arcillosa y materia orgánica del suelo.	Emitido por minería de boratos y centrales de carbón.	Se acumula en riñón e hígado. Dosis letal: 4-5 g. Puede causar vómitos y dermatitis.
Magnesio (Mg)	En suelos volcánicos y basaltos (>4%).	En minería y metalurgia; en aguas calizas >100 mg/L.	Exceso puede causar hipotensión, arritmias y parálisis muscular.
Aluminio (Al)	Tercer elemento más abundante en la corteza terrestre (~8%).	Producción mundial 148 Mt en 2003; reciclaje 40%.	Se acumula en huesos y cerebro, asociado con Alzheimer.
Fósforo (P)	En suelos (200-2.000 mg/kg), minerales como apatita y fosforita.	Producción mundial 223 Mt (2020).	Exceso puede afectar riñones y huesos. El fósforo blanco (P ₄) es altamente tóxico.
Azufre (S)	En sulfuros metálicos como pirita y esfalerita.	Producción mundial 79 Mt (2020).	H ₂ S afecta el sistema nervioso central. Sulfatos >250 mg/L son letales en peces.
Calcio (Ca)	En calcita, dolomita y yeso.	Producción mundial 200 Mt (2020).	Exceso puede causar hipercalcemia y daño renal.
Vanadio (V)	En vanadinita, roscoelita y mottramita.	Producción mundial 43 kt (2000).	Exposición a V ₂ O ₅ irrita ojos y vías respiratorias.
Cromo (Cr)	En cromita y crocoíta.	Producción mundial 15,83 Mt (2003).	Cr(VI) es carcinogénico, afecta riñón e hígado.
Manganeso (Mn)	En pirolusita, manganita y hausmanita.	Producción mundial 24,35 Mt (2003).	Exposición crónica causa manganismo (similar al Parkinson).
Hierro (Fe)	En hematita, magnetita, limonita y siderita.	Producción mundial 2.500 Mt (2020).	Exceso en agua potable (>300 µg/L) causa problemas hepáticos y cardíacos.

QUÍMICA DE HABITANTES Y GEOQUÍMICA EN MONTELÍBANO

Cobalto (Co)	En cobaltita, eritrita y esmaltina.	Producción mundial 140 kt (2020).	Puede causar problemas pulmonares y cardíacos.
Níquel (Ni)	En pentlandita, millerita y garnierita.	Producción mundial 2,7 Mt (2020).	Aumenta el riesgo de cáncer de pulmón y causa dermatitis.
Arsénico (As)	En arsenopirita, orpimento y realgar.	Producción mundial 50 kt (2020).	Carcinogénico. Puede afectar el sistema nervioso y cardiovascular.
Selenio (Se)	En clauthalita, naumannita y tiemannita.	Producción mundial 3 kt (2020).	Exceso causa selenosis; deficiencia afecta la tiroides.
Estroncio (Sr)	En estroncianita y celestina.	Producción mundial 360 kt (2020).	Sr-90 es radiactivo y aumenta riesgo de cáncer óseo.
Molibdeno (Mo)	En molibdenita, wulfenita y powellita.	Producción mundial 300 kt (2020).	Exceso puede causar gota y alteraciones metabólicas.
Estaño (Sn)	En casiterita y estannita.	Producción mundial 310 kt (2020).	Compuestos orgánicos del Sn son neurotóxicos.
Antimonio (Sb)	En estibina y valentianita.	Producción mundial 150 kt (2020).	Puede causar daño renal y neurológico.
Yodo (I)	En caliches y fuentes hidrotermales.	Producción mundial 33 kt (2020).	Deficiencia causa bocio; exceso puede provocar arritmias.
Mercurio (Hg)	En cinabrio y calomelano.	Producción mundial 2 kt (2020).	Metilmercurio es neurotóxico y bioacumulativo.

Nota. Tomado de Kabata y Mukherjee (2007).