

Análisis de concentraciones de Cadmio asociado a la explotación minera subterránea de oro de veta en el Distrito Minero Segovia Remedios (DMSR)

Oscar Muñoz Aguirre

Cohorte XXIII

Correo: geoestadistica@gmail.com

RESUMEN

La generación de drenajes ácidos, consecuencia de intensa actividad minera en el Distrito Minero Segovia Remedios (DMSR) y su vertimiento a fuentes de agua, exponen un escenario de riesgo ambiental por contaminación de metales pesados, como el Cadmio, para ecosistemas terrestres y acuáticos. El Cadmio es un tóxico fuerte, por sus propiedades fisicoquímicas amenaza la salud vegetal, animal y humana así como la seguridad alimentaria. El vertimiento ocurre por la aplicación de técnicas mineras inadecuadas siendo pertinente optar por métodos de tratamiento ecoambientales. Es necesario determinar si las corrientes de agua superficiales están siendo contaminadas por Cadmio y establecer una línea base que permita tratar el problema con nuevas investigaciones enfocadas en remediar y prevenir el problema. El objetivo de esta investigación fue analizar concentraciones de Cadmio asociado a la extracción aurífera de la zona. La metodología se basó en la toma de muestras de agua de las quebradas Cianurada y Marmajón. La concentración de Cadmio se analizó en el Laboratorio certificado de Diagnóstico y Control de Contaminación de la Universidad de Antioquia, mediante absorción atómica. Se identificaron los puntos en un plano con la ubicación y concentración de Cadmio, empleando Autocad. Posteriormente, se realizó la caracterización ambiental del punto de mayor contaminación por quebrada. Finalmente, se contrastaron los resultados con la Norma Colombiana. Para la quebrada Cianurada el valor máximo de Cadmio fue de 1,340 mg/L y para la quebrada Marmajón de 0,5620 mg/L, con valores promedio de 0,0866 mg/L y de 0,0265 mg/L respectivamente, con valores mínimos de 0,0020 mg/L para ambos drenajes. Resultados que muestran contaminación por Cadmio en ambas quebradas. Los puntos con mayores concentraciones se ubican en sectores donde predominan plantas de tratamiento mineral y los de menor valor hacia los nacimientos de las microcuencas.

Palabras claves: Cadmio, ecodispersión, ecotoxicidad, explotación aurífera.

ABSTRACT

The generation of acid drainage, as a result of intense mining activity in the Segovia Remedios Mining District (SRMD) and its discharge into water sources, expose an environmental risk scenario due to contamination of heavy metals, such as Cadmium, for terrestrial and aquatic ecosystems. Cadmium is a strong toxicant, due to its physicochemical properties it threatens plant, animal and human health as well as food safety. The dumping occurs due to the application of inadequate mining techniques, and it is pertinent to opt for eco-environmental treatment methods. It is necessary to determine if the surface water currents are being contaminated by Cadmium and establish a baseline that allows treating the problem with new research focused on remedying and preventing the problem. The objective of this research was to analyze Cadmium concentrations associated with gold mining in the area. The

methodology was based on taking water samples from the Cyanurada and Marmajón streams. The concentration of Cadmium was analyzed at the certified Diagnosis and Contamination Control Laboratory of the University of Antioquia, by means of atomic absorption. Points were identified on a plane with the location and concentration of Cadmium, using Autocad. Subsequently, the environmental characterization of the point of greatest contamination by creek was carried out. Finally, the results were compared with the Colombian Standard. For the Cyanurada stream, the maximum value of Cadmium was 1.340 mg/L and for the Marmajón stream it was 0.5620 mg/L, with average values of 0.0866 mg/L and 0.0265 mg/L, respectively, with values minimum of 0.0020 mg/L for both drains. Results that show Cadmium contamination in both streams. The points with the highest concentrations are located in sectors where mineral treatment plants predominate and those with the lowest value are located towards the sources of the micro-basins.

Keywords : Cadmiun, gold mining, ecodispersion, ecotoxicity.

1. INTRODUCCIÓN

La extracción aurífera es el centro del desarrollo social y político de los pobladores desde la fundación de los municipios de Segovia y Remedios. Ha existido como actividad económica antes de que existieran códigos y normatividad minera en el país. Así el nivel de informalidad es alto, situación que genera que la extracción y beneficio se realice sin seguir lineamientos de protección ambiental y debido a los bajos niveles de capacitación en técnicas mineras, son utilizadas prácticas que resultan inadecuadas por el alto costo ambiental que representan. Una práctica inadecuada es el vertimiento de aguas residuales de mina y plantas de beneficio a cursos de agua sin tratamiento previo generando impactos ambientales considerables.

El vertimiento de drenajes ácidos a cuerpos de agua sin tratamiento previo trae alteraciones ambientales importantes debido al contenido de metales pesados que caracterizan estos efluentes. La presente investigación se centra en el Cadmio por ser un tóxico fuerte y por el riesgo que presenta para la población y ecosistemas, debido a su resistencia a la degradación natural y capacidad de ser absorbido por organismos vivos.

Al ser alteradas las aguas superficiales y subterráneas por el vertimiento de Cadmio, el suelo de manera inminente es contaminado, ya que el Cadmio tiene una solubilidad mayor que la de los otros metales pesados y por eso fácilmente transferido a Biosistemas (Awal, 2019). De acuerdo con Alam *et al.*, (2020) las plantas tienen la capacidad de absorber numerosos elementos del suelo y al ser la base de la cadena alimentaria es muy posible que los metales tóxicos acumulados en las plantas puedan moverse a otros estratos de la cadena alimenticia; al ingresar a sistemas tróficos, aumenta el peligro de salud para los seres vivos. Reyes *et al.*, (2016) resaltan el riesgo para la seguridad alimentaria debido a la pérdida de la calidad del aire, del recurso hídrico y de suelos disponibles para actividad agrícola por contaminación de metales pesados ya que movilizan fácilmente en matrices de agua, suelo y aire.

Con relación al riesgo que representa para la seguridad alimentaria Madeddu (2005) afirma que el Cadmio es uno de los metales que mejor absorben las plantas, principalmente el arroz, el trigo y en menor cantidad el maíz. Dato por demás preocupante ya que estos cereales son la base de la alimentación humana. Según Mancera *et al.*, (2006) la contaminación por metales pesados es una de las más peligrosas para los ecosistemas acuáticos y las especies presentes. Los peces tienen la capacidad de acumular cantidades mayores de Cadmio (biomagnificación) que la

presente en el ambiente poniendo en peligro los seres que se alimenten de este recurso. La misma situación ocurre para moluscos, crustáceos y algas.

Con relación a la salud humana Madeddu (2005), considera el Cadmio como uno de los tóxicos más peligrosos para el ambiente y la salud, por ser teratógeno y potencial cancerígeno comprobado. Una vez absorbido el metal se acumula en órganos y tejidos, principalmente el hígado y riñón, también se afectan los pulmones, la hipófisis, el páncreas, la glándula tiroides, músculos, testículos, glándulas salivales y tejido óseo. También el autor afirma que el ritmo de excreción es lento, lo estima entre 20 a 35 años además que la contaminación por Cadmio puede permanecer así se suspenda la exposición. La estrecha relación entre la exposición de Cadmio y el desarrollo de tumores cancerígenos en células humanas es reseñado en Zhan *et al.*, (2016).

Respecto a los efectos del Cadmio en la salud animal se obtuvieron resultados adversos de pruebas de laboratorio en toros en un centro de inseminación sometidos a dietas con elevados niveles de Cadmio. Algunas afectaciones tuvieron que ver con inapetencia, debilidad, pérdida de peso, anemia, disminución de libido y trastornos en pezuñas y cuernos. Así se puede entender el peligro que representa para la seguridad alimentaria el pastoreo en pastos contaminados por Cadmio (Londoño *et al.*, 2016).

Es importante determinar la contaminación por este elemento nocivo para la salud, debido al problema que representa su vertimiento al ambiente En concordancia directa con los Objetivos de Desarrollo Sostenible para garantizar el suministro de agua limpia (ODS6) y la protección de ecosistemas terrestres (ODS15) y de manera indirecta con los objetivos 3 y 14 para garantizar una vida sana (ODS3) y proteger océanos, mares y vida marina (ODS14) respectivamente. De acuerdo con lo anteriormente planteado, a través de muestras representativas de agua de las quebradas Marmajón y Cianurada, se pretende analizar concentraciones de Cadmio asociado a la extracción aurífera en el distrito minero Segovia – Remedios.

2. MARCO TEÓRICO

El Cadmio (Cd) es un metal de color plateado, maleable y blando, de dureza 2 en la escala de Mohs, número atómico 48, masa atómica 112,4 g/mol, densidad 8,64 g/cm³, punto de ebullición 765° C y punto de fusión 321°C. En la tabla periódica se ubica en el grupo IIb metales de transición junto con zinc y mercurio. En la naturaleza se encuentran 8 isotopos estables y en laboratorio 11 radioisótopos inestables. El Cadmio es divalente en todos sus compuestos estables (Garces, 1995). Según sus propiedades químicas y físicas tiene las características básicas de un tóxico fuerte: bioacumulación en organismos vivos, persistencia en el ambiente y fácil transporte a través de cursos de agua y viento (Madeddu, 2005).

La actividad minera subterránea aurífera de veta comprende cuatro etapas principales: (i) prospección y exploración; (ii) explotación; (iii) beneficio y (iv) cierre (Ministerio de Minas y Energía, 2002). En la fase de prospección y exploración se definen mineralizaciones de manera cuantitativa y cualitativa con el fin de realizar evaluaciones económicas y caracterizar el producto a extraer, también se buscan nuevos prospectos que aumenten la vida útil de la mina, por eso su duración es hasta el cierre de la extracción.

La etapa de explotación consiste en la construcción de galerías subterráneas sobre el cuerpo mineralizado, que necesariamente al ser excavadas bajo niveles piezométricos involucran gran cantidad de agua, debido a que las líneas tienden a dirigirse a sitios de menor presión, para este

caso el túnel, así al interactuar con la roca al momento de la voladura, es posible que por el contenido de metales pesados asociados a ésta, se generen drenajes ácidos (Alcolea *et al.*, 2012).

Una de las actividades principales durante esta fase es el continuo desagüe de la mina a través de sistemas de bombeo y su vertimiento a fuentes hídricas generalmente sin tratamiento, para poder llevar a cabo labores propias de extracción del mineral de interés. De todos los contaminantes de los cursos de agua, quizás el drenaje ácido de mina sea uno de los más graves, por su naturaleza, extensión y difícil resolución (Díaz, 2013). También se generan drenajes ácidos cuando el mineral extraído, antes de ser llevado a beneficio es acumulado en pilas en superficie y entra en contacto con agentes meteóricos. Durante el proceso de beneficio también se generan efluentes que se vierten a fuentes hídricas (Ayora *et al.*, 2013).

Actualmente se aplican técnicas basadas en la naturaleza para tratar los drenajes ácidos, tal es el caso de la utilización microorganismos y plantas con efectos comprobados en la detoxificación de Cadmio en agua y suelos. En estas técnicas la biosorción actúa como mecanismo de quelación superficial y microprecipitación. Los microorganismos actúan como biosorbentes aislados de ecosistemas contaminados, capturan metales pesados en intervalos de tiempo cortos, sin requerir adición de nutrientes al sistema porque dichos organismos no necesitan metabolismo activo y la biomasa es extraída de manera sencilla de sistemas acuosos según Rajendran *et al.*, (2003). Ejemplo de esto son biofiltros elaborados con microalgas y bacterias para bioremediación por contaminación de Cadmio como lo reseñan Loutseti *et al.*, (2009). Las células vivas pueden sufrir envenenamiento al ser utilizadas para eliminar metales pesados por eso Cañizares (2000) sugiere el uso biomasa muerta o sus productos para eliminar el problema toxicidad. Esta misma autora recomienda hongos para tratar contaminación por metales pesados aprovechando que la biomasa fúngica como subproducto de fermentaciones industriales. Las técnicas se centran la relación que tienen bacterias, algas y hongos con el medio, respecto a su capacidad para remover elementos contaminantes y que resulta superior a la reportada por métodos fisicoquímicos, de acuerdo con Zhu *et al.*, (2008) es posible aplicar métodos alternativos eco-amigables al vertimiento de Cadmio al ambiente.

En (Feng, C; *et al.*, 2020) proponen un método económico y eficiente para remover plomo, zinc y cadmio en suelos contaminados por minería a través del lavado de suelos. Tomando muestras de estos y realizando pruebas de laboratorio consistentes en la aplicación de extractos de dos plantas (*Fagopyrum esculentum* y *Fordiophyton fabery*) como agente de lavado y cuyos resultados probaron ser un método de alta eficiencia, bajo costo y ecológico además que puede aumentar el carbono orgánico y los nutrientes después de incorporado al suelo.

Un tratamiento formulado no solo para eliminar sino para recuperar metales pesados de AMD es mediante un sistema bioelectroquímico (BES) inoculado con un nuevo exoelectrógeno (*Pseudomonas sp.E8*) donde pudieron recuperar iones de Cadmio con una celda de combustible microbiana (MFC) y una celda de electrólisis microbiana (MEC) que demostró recuperar selectivamente iones de Cadmio por reducción electroquímica microbiana de acuerdo con Ai, C *et al.*, (2020). Este tipo de métodos ofrecen la capacidad de generar agua potable de acuerdo con Rodríguez *et al.*, (2019).

Dos métodos sustentables para eliminar el riesgo de contaminación de metales pesados por efluentes AMD de minas abandonadas, consisten en rellenar bien sea con escombros de construcción o con estéril (roca sin contenido aurífero) de la misma explotación, los socavones abandonados. De esta forma también se resuelve el problema de la disposición final de escombros provenientes de construcciones civiles y estériles de mina, fundamentado en la

reacción entre el concreto y la roca estéril (CaOH) con los AMD (SO₂) que produce sulfato de calcio (CaSO₄) y agua (H₂O) (Behnaz, R; Austin, A; 2020).

De igual forma Awual., (2019) propone mejorar la captura de iones de Cadmio en aguas residuales, a través de la utilización de la preparación de un compuesto de sílica inorgánica con adición de polímeros, mejorando notablemente la detección, remoción y reutilización del metal pesado.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

El DMSR se encuentra ubicado a 227 kilómetros de la capital del departamento, con una población estimada en los dos municipios de 70.000 personas (Nuestro Municipio Segovia Antioquía, 2019). Limita al norte con el municipio de Zaragoza, al occidente con el municipio de Amalfi al oriente departamento de Bolívar y al sur los municipios de Vagachí y Yondó (IGAC, 2010) (Figura 1).

3.2. Tamaño de muestra

Se realizaron muestreos representativos en agua de las quebradas Marmajón y Cianurada que colectan las aguas residuales de la mayoría de extracciones informales mineras activas y abandonadas así como plantas de transformación metalúrgica del DMSR, con el fin de cuantificar las cantidades de Cadmio vertidos en drenajes ácidos a fuentes hídricas, residuo de la actividad extractiva y metalúrgica en la zona de estudio.

Para definir el tamaño óptimo de muestra se utilizó la fórmula: $n = [W - W^2 (Z\beta + 1,4 \times Z\alpha)^2] / W^2$ (1) (Lozano, 2011) donde:

N= Número de muestras; $Z\alpha$ = Valor nivel de confianza

$Z\beta$ = Poder estadístico; W: Eficiencia mínima esperada

Nivel de confianza 95%. Espera encontrar un mínimo de muestras con 30% de Cadmio.

Riesgo de error de 0,20.

$Z\alpha = 1,96$; $Z\beta = 0,842$; $W = 0,30$

Reemplazando en (1)

$n = [0,30 - 0,30^2 (0,842 + 1,4 \times 1,96)^2] / 0,30^2$

$n = 30$ muestras por sub-cuenca.

De acuerdo con el resultado se tomaron 30 muestras de agua por quebrada, para un total de 60 muestras. Los puntos seleccionados se ubican en los tributarios y cauces principales que ya han recibido los drenajes ácidos de 243 minas entre activas y abandonadas y en la zona de estudio (Figura 2).

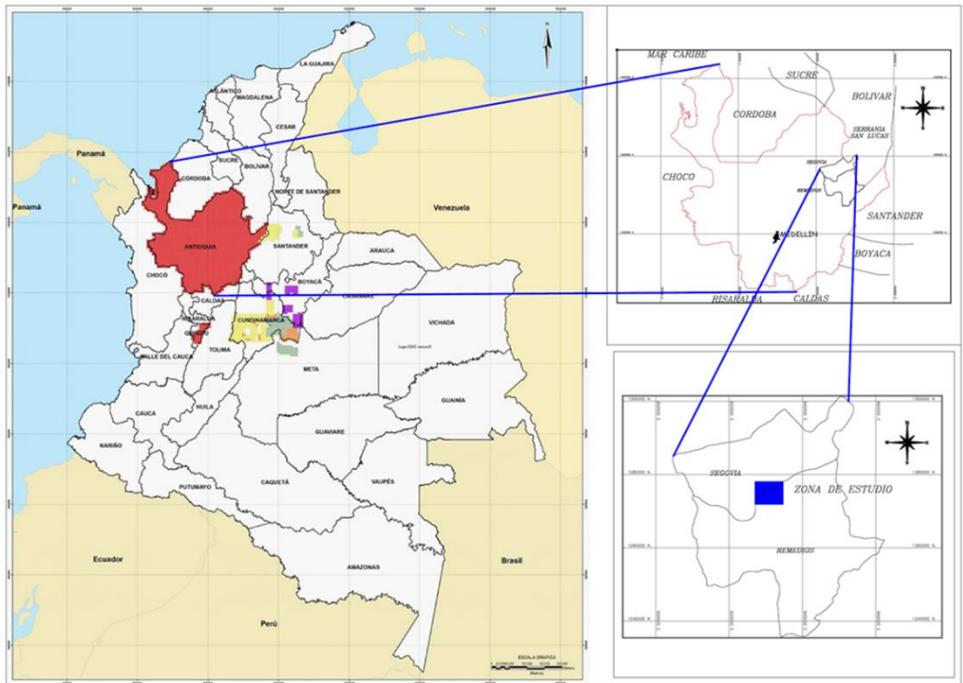
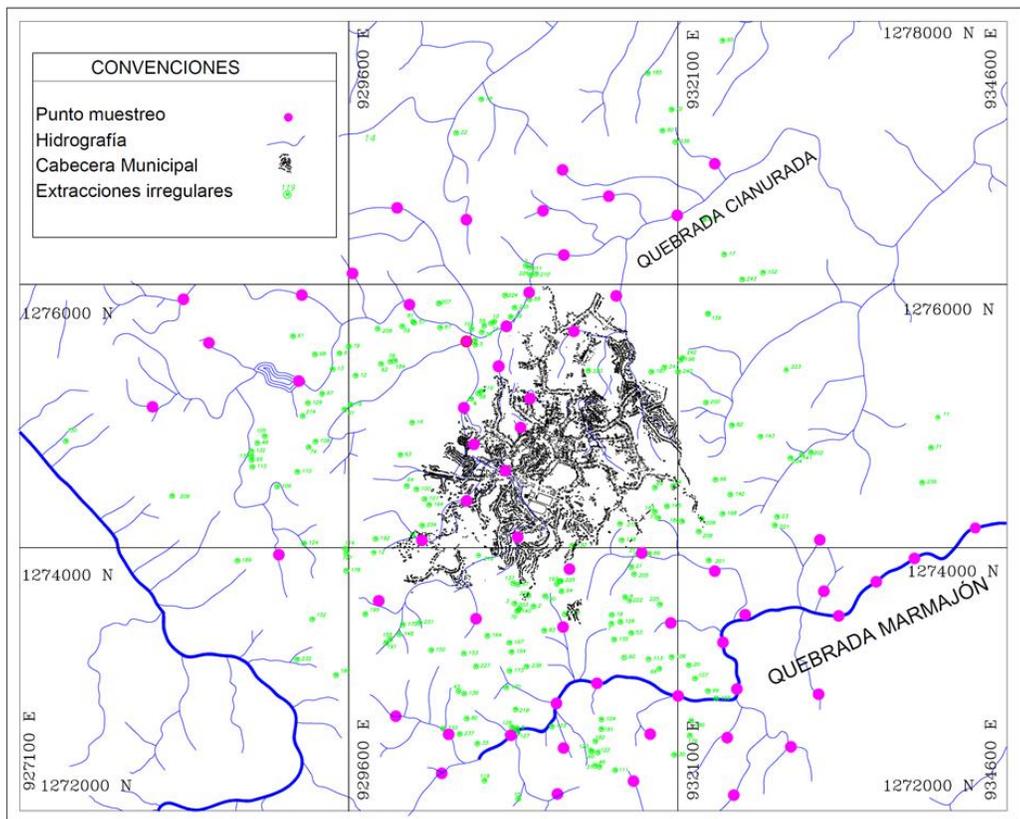


Figura 1. Ubicación zona de estudio.

Fuente: (Modificado Igac, 2018).

Figura 1. Diseño malla de muestreo con extracciones irregulares.



Fuente: Elaboración propia.

3.3. Fases de la investigación

Con el fin de analizar las concentraciones de Cadmio asociado a la extracción aurífera en la zona de estudio, se realizaron muestreos representativos de agua en las quebradas Cianurada y Marmajón que colectan las aguas residuales de la mayoría de las extracciones mineras del distrito. Se siguieron las metodologías sugeridas por el Ideam (2007) para la toma de muestras de agua residual. Las muestras de agua fueron enviadas al laboratorio de Diagnóstico y Control de Contaminación de la Universidad de Antioquia para ser analizados mediante espectrofotometría de absorción atómica y determinar la concentración de Cadmio. El Laboratorio cuenta con la certificación para este análisis. Cada muestra fue marcada con un código para ser registrada en los certificados de laboratorio. Además el código va asociado a una ubicación geográfica que permitió plasmarlo en la materialización del plano de resultados. Para identificar los puntos de contaminación por Cadmio en cada drenaje, se materializó un plano con la ubicación y la concentración de Cadmio. Se utilizó para este fin el software Autocad. Adicionalmente, se realizó una caracterización ambiental del punto de mayor contaminación por quebrada, haciendo énfasis en el uso de suelo, magnitud de la afectación y densidad poblacional. Finalmente se contrastaron los resultados obtenidos con la normatividad colombiana con relación a parámetros y límites permisibles para vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales en actividades mineras.

3.4. Análisis de la información

Para el tratamiento de resultados de laboratorio, se elaboraron bases de datos en Excel con los puntos de muestreo debidamente georeferenciados y el código que lo identifica en planos (asignado desde la toma de la muestra). Posteriormente se realizó un análisis exploratorio de los datos con técnicas de estadística de posición y dispersión, con el fin de obtener promedios, valores máximos y mínimos, desviación estándar y varianzas. Para la visualización de resultados se materializó un mapa con los puntos de muestreo y respectivos contenidos de Cadmio, procesados a través software Autocad.

4. Resultados y discusión

4.1. Análisis de concentraciones de Cadmio

La totalidad de los resultados mostraron contenidos de Cadmio en los análisis de agua, siendo más elevados (valores contaminantes), en zonas con operaciones metalúrgicas y minas abandonadas e inundadas. Los valores mínimos se ubican en las cabeceras de los tributarios de las sub-cuencas donde aún no han colectado aguas residuales de mina. Así se establece una relación entre la contaminación por Cadmio en las quebradas asociado a la actividad extractiva. En general diez muestras estuvieron por encima de los límites permisibles estatales (0.05 mg/L), ocho muestras entre 0.02 y 0.05 mg/L, que superan límites internacionales y las cuarenta y dos restantes por debajo de 0.02 mg/L. Los resultados de la concentración de Cadmio de las sesenta muestras tomadas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados muestreo agua quebradas Cianurada y Marmajón.

| ID | Cd (mg/l) |
|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
| AR-1 | 0,1280 | AR-16 | 0,0051 | AR-31 | 0,0020 | AR-46 | 0,0020 |
| AR-2 | 0,1480 | AR-17 | 0,0020 | AR-32 | 0,5620 | AR-47 | 0,0020 |
| AR-3 | 0,0478 | AR-18 | 0,0449 | AR-33 | 0,0079 | AR-48 | 0,0097 |
| AR-4 | 0,0531 | AR-19 | 0,0221 | AR-34 | 0,0020 | AR-49 | 0,0103 |
| AR-5 | 0,0564 | AR-20 | 0,0475 | AR-35 | 0,0403 | AR-50 | 0,0098 |
| AR-6 | 0,0412 | AR-21 | 0,0253 | AR-36 | 0,0020 | AR-51 | 0,0092 |
| AR-7 | 0,0328 | AR-22 | 0,0527 | AR-37 | 0,0026 | AR-52 | 0,0091 |
| AR-8 | 0,3310 | AR-23 | 1,3430 | AR-38 | 0,0020 | AR-53 | 0,0020 |
| AR-9 | 0,1230 | AR-24 | 0,0645 | AR-39 | 0,0141 | AR-54 | 0,0020 |
| AR-10 | 0,0032 | AR-25 | 0,0021 | AR-40 | 0,0117 | AR-55 | 0,0020 |
| AR-11 | 0,0035 | AR-26 | 0,0020 | AR-41 | 0,0109 | AR-56 | 0,0020 |
| AR-12 | 0,0020 | AR-27 | 0,0026 | AR-42 | 0,0177 | AR-57 | 0,0090 |
| AR-13 | 0,0020 | AR-28 | 0,0020 | AR-43 | 0,0092 | AR-58 | 0,0108 |
| AR-14 | 0,0020 | AR-29 | 0,0020 | AR-44 | 0,0153 | AR-59 | 0,0118 |
| AR-15 | 0,0033 | AR-30 | 0,0020 | AR-45 | 0,0020 | AR-60 | 0,0020 |

Fuente: Elaboración propia (2021).

En la tabla 2 se presentan estadísticas descriptivas de los resultados de las sesenta muestras evaluadas, tomando ambas quebradas dentro del mismo análisis, donde se observa un valor promedio de 0,0565 mg/L, un valor mínimo de 0,0020 mg/L y máximo de 1,3430 mg/L. Así, evaluando resultados de manera general, el promedio de los datos se encuentra sobre el límite permisible colombiano para vertimientos puntuales de aguas residuales provenientes de actividades extractivas (MMADS.,2017).

Tabla 2. Valores estadística descriptiva aplicada a totalidad de resultados.

| Variable | N. de muestras | Mín. (mg/l) | Máx. (mg/l) | Promedio (mg/l) | Std. Dev | Varianza | C. Variación | Skewness | Kurtosis |
|----------|----------------|-------------|-------------|-----------------|----------|----------|--------------|----------|----------|
| Cadmio | 60 | 0,0020 | 1,3430 | 0,0565 | 0,1895 | 0,0352 | 3,32 | 5,72 | 37,60 |

Fuente: Elaboración propia (2022).

También se realizó un análisis estadístico descriptivo para cada quebrada, treinta datos por drenaje. En la Tabla 3 se discriminan por quebrada las estadísticas, encontrándose en ambas valores mínimos de 0,020 mg/L. Para la quebrada Cianurada el valor máximo de Cadmio fue de 1,3430 mg/L y para la quebrada Marmajón de 0,5620 mg/L, con valores promedio de 0,0866 mg/L y de 0,0265 ppm, respectivamente. Nótese que ambos valores máximos superan el límite estatal establecido. En cuanto a los valores promedio la quebrada Cianurada permanece sobre 0.05 mg/L de Cadmio y Marmajón bajo este umbral. En parte los contenidos inferiores de la quebrada Marmajón, respecto a la Cianurada, puede explicarse porque, al parecer el bombeo de las extracciones subterráneas evita que el agua evacuada de la mina permanezca a baja temperatura y no se active químicamente, evitando concentrar metales pesados (Malolepszy.,2003). Así, la quebrada Marmajón al tener al momento de la investigación mayor número de extracciones activas, refleja menor contenido de Cadmio que la quebrada Cianurada.

Tabla 3. Valores estadística descriptiva por quebrada.

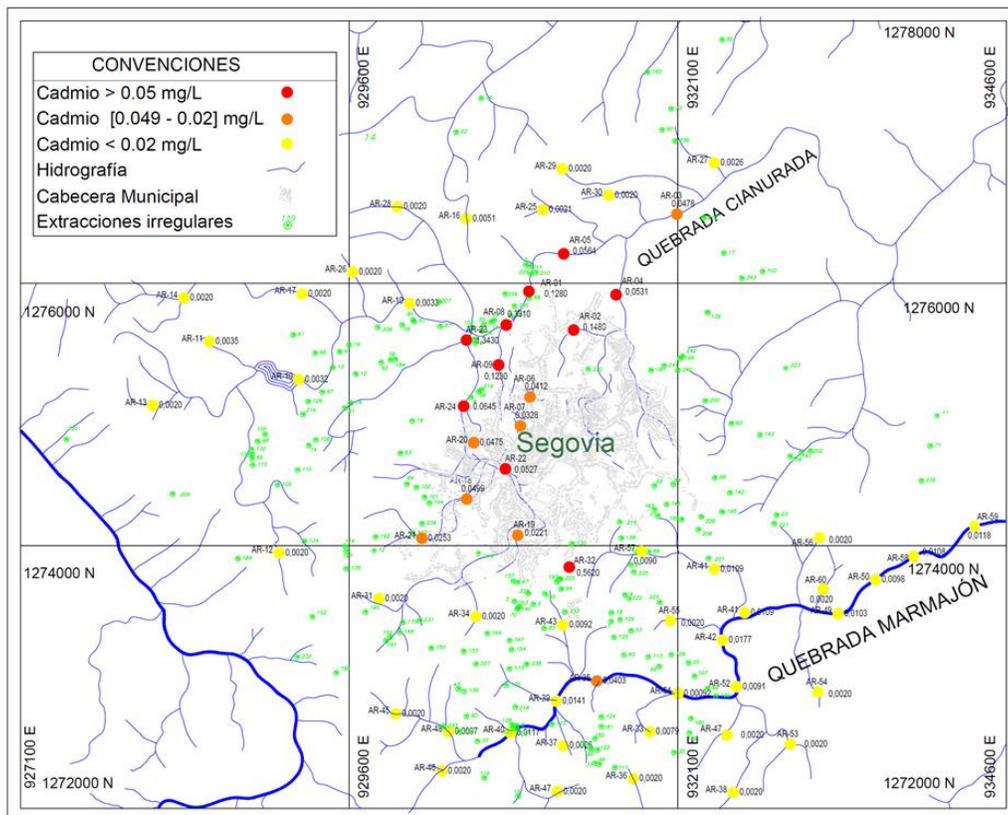
| Quebrada | N. de muestras | Mín. (mg/) | Máx. (mg/l) | Promedio (mg/l) | Std. Dev | Varianza | C. Variación | Skewness | Kurtosis |
|-----------|----------------|------------|-------------|-----------------|----------|----------|--------------|----------|----------|
| Cianurada | 30 | 0,0020 | 1,3430 | 0,0866 | 0,2467 | 0,0588 | 2,80 | 4,64 | 24,03 |
| Marmajón | 30 | 0,0020 | 0,5620 | 0,0265 | 0,1014 | 0,0099 | 3,76 | 5,15 | 27,71 |

Fuente: Elaboración propia (2021).

Los resultados muestran mayores concentraciones de Cadmio en la quebrada Cianurada, en contraste con la quebrada Marmajón que solo presentó dos muestras con valores altos. En la Figura 3 se muestra el mapa resultado de cantidades de Cadmio, expresadas en miligramos por litro (mg/L). Se definen tres intervalos de rangos de concentración de Cadmio: superiores a 0,05 mg/L en círculos rojos, entre 0,049 y 0,02 mg/L en círculos naranjas y menores a 0,02 mg/L en círculos amarillos. Los intervalos se definieron de acuerdo con los límites máximos permisibles para vertimientos de aguas residuales de minería a corrientes superficiales de agua en Colombia (círculos rojos), en otros países de la América como Estados Unidos y Canadá (círculos naranjas) y por debajo del umbral se ilustra en círculos amarillos. También se muestra la hidrografía de la zona y las extracciones mineras irregulares.

Los resultados son concordantes con el trabajo realizado por Anyanwu et al., (2018) quienes afirman que las actividades mineras y metalúrgicas son la principal fuente de emisiones de metales pesados al medio ambiente.

Figura 3. Puntos de muestreo con resultados de análisis de Cadmio.



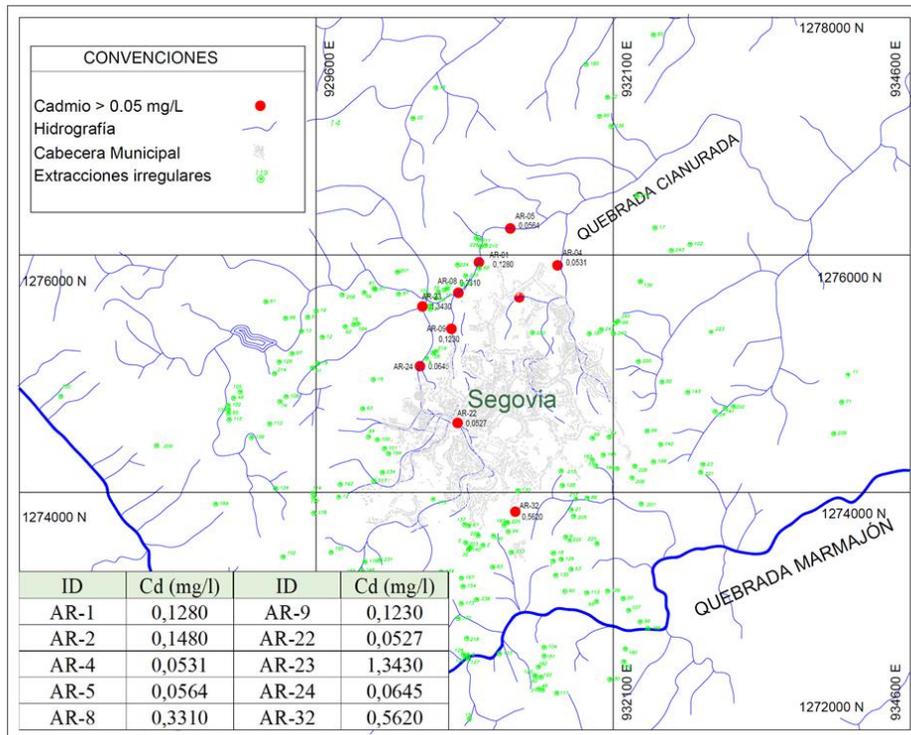
Fuente: Elaboración propia (2021).

Identificación puntos de contaminación por Cadmio: La normativa Colombiana, en la resolución 0631 del 17 de marzo de 2015, establece el valor máximo permisible, para vertimientos de aguas residuales provenientes de minería en 0,05 mg/L de Cadmio. Los valores por encima se consideran contaminantes. En la Figura 4 se muestran estos puntos y se tabulan valores. Se pueden identificar 10 puntos que exceden los valores permisibles para vertimientos puntuales de Cadmio, que corresponden a zonas con plantas de tratamiento mineral, donde a

través de operaciones metalúrgicas se beneficia el metal útil y también en sectores con minas abandonadas e inundadas, que no fueron cerradas adecuadamente y continúan vertiendo drenajes ácidos a corrientes superficiales de agua.

En zonas con extracciones abandonadas inundadas, ocurre un fenómeno que puede explicar los altos valores de Cadmio, ya que el agua estancada, toma rangos de temperatura entre 6 y 28°C. De acuerdo con Malolepszy (2003) el aumento de temperatura provoca que aumente la oxidación de sulfuros con generación de ácido sulfúrico, bajos valores de pH y altas concentraciones de metales pesados. Además de concentrar metales pesados, el efecto del bajo pH causa que el agua residual se empiece a neutralizar con la precipitación de óxidos e hidróxidos de hierro bajo la forma de una capa ocre (Ochre) que se deposita en el fondo de ríos y quebradas, impidiendo que los organismos que allí habitan se puedan alimentar y al ser estos la base de la cadena alimenticia se afectará todo el ecosistema (Simate & Ndlovu, 2014). La asociación de Malolepszy (2003) respecto al pH como factor detonante en la movilidad del Cadmio relacionado a la actividad minera, se pudo confirmar en el desarrollo de la investigación debido que para efectos de preservación de la muestra, se acidificó a $\text{pH} < 3$, lo cual implicaba realizar una prueba de pH al momento de tomarla, resultando con menor pH las muestras AR-23 y AR-32 las cuales fueron las de mayor valor de Cadmio por quebrada ambas con $\text{pH}=5$. El resto de muestras tenían $\text{pH}=6$. En la zona de estudio se han detectado 160 extracciones abandonadas, ubicadas con puntos verdes en Figura 4. De acuerdo con los resultados obtenidos, se estima que el problema es importante, lo cual concuerda con el análisis de Behnaz & Austin, (2020)³ quienes estiman que en el mundo entre 20.000 y 50.000 minas abandonadas están liberando drenajes ácidos afectando 6.400 kilómetros de ríos y entre 8.000 y 16.000 kilómetros de quebradas residuos de minería metálica.

Figura 4. Puntos de contaminación por Cadmio en DMSR.



Fuente: Elaboración propia (2021).

Caracterización ambiental puntos de mayor contaminación por quebrada: Según los resultados se pueden distinguir dos puntos con altos valores de Cadmio por quebrada. Puntos que corresponden con plantas de procesamiento mineral tecnificadas y artesanales. En las plantas de tratamiento se llevan a cabo las operaciones metalúrgicas con el fin de transformar el mineral y obtener el oro, a través de procesos mecánicos de reducción de tamaño del material, ataque químico y fundición. En el proceso, se acumula la concentración natural de Cadmio de la roca aurífera y al no ser neutralizada de manera adecuada se vierte al ambiente en forma de drenaje ácido (Ayora *et al.*, 2013).

Quebrada Cianurada: El punto de mayor contaminación por Cadmio (AR-23: 1.3430 mg/L), corresponde a la descarga de una planta metalúrgica de una multinacional asentada en la zona (Figura 5).

El área aproximada de afectación de la planta de tratamiento mineral es superior a 3 Ha. Las instalaciones se encuentran aisladas de centros urbanos, debido al cerramiento del complejo metalúrgico. Sin embargo, aguas abajo hay pequeñas viviendas rurales con cultivos de pan coger que definitivamente toman estas aguas para riego.

La planta de tratamiento metalúrgico procesa 1.500 toneladas de roca/día. La locación cuenta con plazas de almacenamiento de pilas de mineral, que como se reseñó en el marco teórico, generan drenajes ácidos al entrar en contacto con agentes meteóricos. De igual forma, el proceso de beneficio propiamente genera efluentes ácidos (Ayora *et al.*, 2013).

Figura 5. Punto de mayor contaminación por Cadmio quebrada Cianurada.



Fuente: Modificado Anna minería (2022).

De manera general el proceso metalúrgico que se lleva a cabo para beneficiar el oro, consta de cuatro etapas principales que son: disminución de tamaño de mineral, concentración, dilución y fundición. Los efluentes generados en las etapas sucesivas son neutralizados con peróxido de hidrogeno y sulfato de cobre (Araus., 2019), pero esto actúa solo sobre el cianuro, quedando sin tratamiento metales pesados, para este estudio, el Cadmio.

Quebrada Marmajón: El punto de mayor contaminación por Cadmio (AR-32 0.5620 mg/L), corresponde a una zona con alrededor de 20 pequeñas plantas de beneficio irregulares, conocidas en la región como entables. El área afectada es de 2 Ha y está densamente poblada ya que se ubica en zona urbana y adyacente a barrios residenciales (Figura 6).

El proceso es similar al de plantas metalúrgicas regulares, pero éstas son abiertas al público y se establece tácitamente un contrato donde el extractor lleva el mineral y solo participa hasta la etapa de disminución de tamaño, obteniendo alrededor del 45 % de material aurífero. La fracción restante queda para el dueño del entable, quien concentra, diluye y funde. De igual forma no hay controles de vertimientos de metales pesados a corrientes superficiales.

Figura 6. Puntos de contaminación por Cadmio en DMSR.



Fuente: Elaboración propia (2022).

Alrededor del proceso artesanal de beneficio aurífero, se mueve una economía informal, que indirectamente favorece a personas ajenas al proceso extractivo. Por eso en la zona de estudio hay masificación de estas pequeñas plantas de tratamiento mineral y son aceptadas y bien vistas por la comunidad, en contraste con la planta metalúrgica de la multinacional.

En general es pertinente agregar que durante el proceso de fundición también se puede estar liberando Cadmio a la atmósfera, debido que el punto de fusión del oro es mayor que el del Cadmio. De acuerdo con la diferencia de temperatura de fusión entre el Cadmio 321°C y oro 1.064°C (Garces, 1995), al alcanzar las temperaturas necesarias para fundir el oro el Cadmio ya se habrá evaporado si no hay el recurso tecnológico para tratar este problema. Sería importante determinar con nuevas investigaciones la cantidad de Cadmio en emisiones atmosféricas, producto de fundición de oro.

Contraste de resultados obtenidos respecto a normatividad colombiana: Como se había mencionado, mediante la resolución 0631 del 17 de marzo de 2015, se establecen parámetros y valores límites máximos permisibles para los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales. En el artículo 10 referente a minería, se define un valor límite de 0,05 mg/L de

Cadmio. Sobre este límite se encontró el 17% de las muestras analizadas, de las cuales nueve puntos corresponden a la quebrada Cianurada y una sobre la quebrada Marmajón (AR-32). En la Tabla 4 se presentan los resultados. El promedio de concentración de Cadmio de la sub-cuenca Cianurada está muy por encima de este umbral, alcanzando un valor promedio de 0,0866 mg/L. No obstante, se debe tener en cuenta que otros países, han adoptado umbrales más bajos para garantizar la salud humana y protección de ecosistemas. Tal es el caso de Estados Unidos, Canadá y Holanda donde el límite máximo permisible es de 0,02 mg/L de Cadmio (Ramos & Salas, 2015). Así, para efectos de esta investigación, el 30% de las muestras estarían sobre límite.

Tabla 4. Valores de estadística descriptiva por quebrada.

| ID | Cd (mg/l) | ID | Cd (mg/l) |
|------|-----------|-------|-----------|
| AR-1 | 0,1280 | AR-9 | 0,1230 |
| AR-2 | 0,1480 | AR-22 | 0,0527 |
| AR-4 | 0,0531 | AR-23 | 1,3430 |
| AR-5 | 0,0564 | AR-24 | 0,0645 |
| AR-8 | 0,3310 | AR-32 | 0,5620 |

5. Conclusiones

La presencia de Cadmio en cantidades anómalas en aguas superficiales de las quebradas Cianurada y Marmajón, se relacionan con la extracción y beneficio aurífero de la zona, no hay otras actividades económicas que puedan aportar este elemento. Los resultados del muestreo en sectores con pocas extracciones (hacia las cabeceras), mostraron bajos valores de Cadmio en contraste con sectores donde se intensifica la actividad.

Los puntos con mayores concentraciones de Cadmio se ubican en sectores donde predominan operaciones metalúrgicas y extracciones irregulares abandonadas sin un cierre adecuado, estas últimas se convierten en un pasivo ambiental sobre el que no hay responsables.

Las poblaciones en el área de influencia, no cuentan con cobertura total de acueducto, por eso para proveerse del líquido parte de la comunidad, se vale de aljibes. Estos pozos artesanales no son profundos y épocas de lluvia son recargados por las corrientes superficiales de agua, que al estar contaminadas por Cadmio exponen un panorama de riesgo para las personas que consumen esta agua.

Se debe tener en cuenta que la zona de estudio, geográficamente se enmarca en las estribaciones de la serranía de San Lucas, cordillera central vertiente oriental, esta posición indica que todo el sistema hidrográfico pertenece a la cuenca del río Magdalena y toda el agua superficial y subterránea converge a este río, que fue y sigue siendo el eje principal de desarrollo del país. Preocupante este hecho de contaminación en acuíferos, suelos cultivables y fauna respecto a la seguridad alimentaria y salud pública, consecuencia de la actividad extractiva aurífera de la zona.

Los resultados obtenidos hacen necesario considerar revisar las bases científicas, jurídicas, ambientales y económicas, respecto a los límites máximos permisibles para vertimientos de aguas residuales provenientes de minería. El agua es un derecho fundamental, básico para alcanzar un desarrollo sostenible, por eso esta investigación y sus resultados pretenden demostrar cuantitativamente la contaminación del patrimonio natural a causa de una actividad

económica, que de acuerdo a las deducciones realizadas, los responsables de los vertimientos con mayores concentraciones de Cadmio son minería legal y formal, regulada por el estado, que más que procurar por que se cumplan con los valores estipulados en la resolución 0631, multan la empresa y da la sensación que en lugar de propender por la conservación de ecosistemas, ponen a circular derechos de contaminación.

Es necesario garantizar la protección del patrimonio natural, proteger la salud pública y restaurar ecosistemas. Las soluciones basadas en la naturaleza ofrecen procedimientos de bajo costo y más efectivas para el tratamiento de drenajes ácidos que los métodos tradicionales.

Las discusiones en torno a la minería deben fortalecer su soporte científico ya que se han basado en la percepción. La continuidad de investigaciones en torno al vertimiento de Cadmio y otros metales pesados al ambiente permitirá ampliar la base científica que pueda conducir sino a la sostenibilidad, por lo menos a ejercer la minería como una actividad responsable.

La falta de gobernanza del sector, la falta de articulación entre los códigos minero-ambientales y las entidades de control, la inercia política, los estatutos coloniales y el exceso de beneficios tributarios han hecho que la minería no haya sido motor de desarrollo para los territorios. Por el contrario, la contaminación de ecosistemas, la exclusión social y el empobrecimiento de poblaciones mineras han sido el común denominador de esta actividad económica. Es momento de examinar la minería bajo la lupa de los servicios eco-sistémicos que se comprometen y el beneficio que pueda generar la extracción aurífera.

6. Bibliografía

- Ai, C .; Hou, S .; Yan, Z .; Zheng, X .; Amanze, C .; Chai, L .; Qiu, G .; Zeng, W. (2020). Recovery of Metals from Acid Mine Drainage by Bioelectrochemical System Inoculated with a Novel Exoelectrogen, *Pseudomonas sp.* E8. *Microorganism*, 8(1), 8, 41.
- Alam, M; Hussain, Z; Khan, A; Khan, M; Rab, A; Asif, M; Shah, A; Asim, M;. (2020). The effects of organic amendments on heavy metals bioavailability in mine impacted soil and associated human health risk. *Scientia Horticulturae* (262), 2-8.
- Alcolea, A; Vazquéz, M; Caparrós, A; Ibarra, I; García, C; Linares, R; Rodríguez, R;. (2012). Heavy metal removal of intermittent acid mine drainage with an open limestone channel. *Minerals Engineering*(26), 86, 98.
- Alfaro S, M. A. (18 de Octubre de 2014). *Manual de Muestreo*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/lesliejoaquincotrado/manual-de-muestreo>
- Alzogaray, R. (15 de Agosto de 2009). Un veneno llamado Cadmio. *Página 12*.
- Anyanwu, B; Ezejiolor, A; Igweze, O; Orisakwe, Z;. (2018). Heavy metal mixture exposure and effects in developing nations: an update. *Toxics*, 65.
- Awual, R. (2019). A facile composite material for enhanced cadmium (II) ion capturing from wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering* (7), 1-11.

- Ayora, C; Caraballo , M; Macias , F; Rotting, T; Carrera, J; Nieto, J;. (2013). Acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt: 2. Lessons learned from recent passive remediations experiences. *Enviromental Science and Pollution Research*(20), 7837-7853.
- Behnaz, R; Austin, A;. (2020). Sustainable resolutions for enviromental threat of the acid mine drainage. *Science Total Environment*, 125-152.
- Bolan, N; Kunhikrishnan, A; Thangarajan, R; Kumpiene, J; Park, J; Makino, T; Kirkham, MB; Scheckel, K;. (2014). Remedation of heavy metal (loid)s contaminated soils to mobilize or to immobilize. *Journal of Hazardous Materials*, 141-166.
- Cañizares, R. (2000). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latina de Microbiología*, 131-143.
- Castro, J., Chirinos, D., Rios, E., Machuca, M., & Campuzano, E. (2021). Dietary risk of milk contaminated with lead and cadmium in areas near mining-metallurgical industries in the Central Andes of Peru. *Ecotoxicology and Environmental Safety*.
- Congreso. (15 de Julio de 2013). Ley 1658. Bogotá DC, Colombia.
- Contreras, G. (2005). *Paragénesis mineral y consideraciones acerca del modelo evolutivo en el distrito aurífero Segovia Remedios*. Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín.
- CooperAcción. (2016). *Metales pesados y salud pública: el caso de Espinar*. Lima.
- Diaz, J. (2013). *Tratamiento biológico como alternativa para disminuir el impacto ambiental ocasionado por el drenaje ácido de una mina, generado por la actividad minera en el municipio de Marmato - Caldas*. Tesis de Maestría, Universidad de Manizales, Manizales.
- Echeverry, S; Cardenas, A; Ordoñez, O; Muñoz, O;. (2009). Aspectos estructurales y relaciones de algunos sistemas vetiformes del distrito minero Segovia Remedios. *Boletín Ciencias de la Tierra*(26), 19, 28.
- Editorial Vivir. (8 de Mayo de 2013). El monstruo dormido en Segovia. *El Espectador*.
- Estrada, C. (2019). *Evaluación de la remoción de cianuro y metales pesados en efluentes líquidos provenientes del beneficio del oro de la pequeña minería mediante adsorción de carbón activado y peróxido de hidrógeno*. Tesis de Maestría , Universidad de Manizales , Manizales.
- Feng, C; Chen, Y; Zhang, S; Wang, G; Zhong, Q; Zhou, W; Xu, X; Li, T. (2020). Removal of lead, zinc and cadmiun from contaminated soils with two plant extracts: Mechanism and potential risks. *Ecotoxicology and Enviromental Safety*(187), 1-9.
- Garces, H. (1995). *Geología económica de los yacimientos minerales*. Medellín: Clave.
- García, C. (28 de 03 de 2017). El alto precio del oro, un metal inútil. *Semana Sostenible*.

- Hernández S, R., Fernández C, C., & Baptista L, P. (2014). *Metodología de la investigación*. México: Mc Graw Hill.
- IDEAM. (10 de Septiembre de 2007). Obtenido de http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma_Muestras_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428
- IGAC. (2010). *Diccionario Geográfico de Colombia*. Bogotá DC, Colombia.
- Klein, C. (1997). *Manual of Mineralogy*. Neew York: Reverté S.A.
- Londoño, L; Londoño, P; Muñoz, F;. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145-163.
- Loutseti, S; Danielidis, D; Economou-amili, A; Katsaros, C; Santas, R; Santas, P;. (2009). The application of a micro-algal/bacterial biofilter for the detoxification of cooper and cadmiun metal wastes. *Bioresource Technology*, 2099-2105.
- Madeddu, R. (2005). *Estudio de la influencia del Cadmio sobre el medio ambiente y el organismo humano: perspectivas experimentales, epidemiológicas y morfofuncionales en el hombre y los animales de experimentación*. Universidad de Granada Facultad de Medicina. Universidad de Granada.
- Malolepszy, Z. (2003). Low Temperature, Man-made Geothermal Reservoirs In Abandoned Workings Of Underground Mines. *Proceedings: Twenty-Eight Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 7.
- Mancera , N; Alvarez, R;. (2006). Estado del conocimiento de las concentraciones de mercurio y otros metales en peces dulceacuícolas de Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 11(1), 3-23.
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (17 de Marzo de 2015). Resolución 0631. 11. Bogota DC, Colombia.
- MME; MMADS;. (16 de Octubre de 2002). *Guía Minero Ambiental*. Bogotá DC, Colombia.
- Nuestro Municipio Segovia Antioquia*. (2019). Obtenido de <http://www.segovia-antioquia.gov.co/municipio/nuestro-municipio>
- ONU-DAES. (2015). *Objetivos del Desarrollo Sostenible*.
- Peláez, M; Bustamante, John; Gómez, E;. (Julio - Diciembre de 2016). Presencia de cadmio y plomo en suelos y su bioacumulación en tejidos vegetales en especies de Brachiaria en el Magdalena medio Colombiano. *Luna Azul*, 82-101.
- Prieto, G; Espinosa, A;. (2014). *MANUAL DE GEOQUÍMICA MUESTREO DE ULTRA BAJA DENSIDAD Y DE BAJA, MEDIA Y ALTA DENSIDAD*. Bogotá: Colección GUÍAS Y MANUALES IGAC.

- Qinhui, L; Xiaohang, X; Lin, L; Zhuo, C; Xian, D; Guangle, Q. (2019). Cadmium contamination in a soil-rice system and the associated health risk: An addressing concern caused by barium mining. *Ecotoxicology and Environmental Safety*.
- Quiroga, C. (2014). *Construcción del territorio minero campesino en el nordeste de Antioquia, Colombia, movimientos socioterritoriales y derechos humanos en contra del modelo económico multinacional 1970-2010*. Tesis, Universidad de los Andes Grupo Cultura y Ambiente (SIMAT), Cundinamarca, Bogotá.
- Rajendran, P; Muthukrishnan, J;. (2003). Microbes in heavy metal remedation. *Indian Journal of Experimental Biology*, 935-944.
- Reyes, Y; Vergara, I; Torres, O; Diaz, M; González, E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66-77.
- Rodriguez, M; Baena, F M; Vázquez , S; Arroyo, F; Vilches, L F; Zhang , Z;. (2019). Remediation of acid mine drainage. *Environmental Chemistry Letters*, 1529-1538.
- Salazar, H. (2018). *Análisis de las concentraciones de Mercurio, Arsénico, Cadmio y Níquel generados por la minería aurífera en el occidente y norte de Colombia, con el fin de realizar una propuesta de niveles permisibles en los sedimentos de actividades mineras extractivas*. Tesis de Maestría, Universidad de Manizales, Manizales.
- Santos, J; Romero, F; Arguelles, R; Cervantes, A; Goslinga, J;. (2018). Acid drainage neutralization and trace metals removal by two-step system with carbonated rocks, Estado de Mexico, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 77(86).
- Shiva, V. (2003). *Las guerras del agua: privatización, contaminación y lucro*. Mexico: Siglo XXI.
- Simate, G; Ndlovu, S;. (2014). Acid mine drainage: Challenges and opportunities . *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1785-1803.
- Yeyu, Y; Cheng, L; Zhongfang, Y; Tao, Y; Hongyu, J; Liua, W; Qizuan, Z. (2021). Application of cadmium prediction models for rice and maize in the safe utilization of farmland associated with tin mining in Hezhou, Guangxi, China. *Environmental Pollution*.
- Zhan, R; Wang, L; Garret, S; Sens, D; Dunlevy, J; Zhou, X; Somji, S. (2016). Elevated connexin 43 expression in arsenite-and cadmiun- transformed human bladder cancer cells, tumor transplants and selected high grade human bladder cancers. *Exp Toxicol Pathol*, 479-491.
- Zhu, Y; Fang, X; Ye, Z; Li, Y; Cai, W;. (2008). Biosorption of Cu (II) on extracelular polymers from Bacillus sp. F19. *Journal Environmental Science*, 1288-1293.