

Revisión del estado del arte sobre la contaminación ambiental asociada a la minería  
auroargentífera en Santander

Oscar Julián Parra Jaimes

Dexy Daniela Quiñones Marín

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Químico

Director

Prof. Jhon Freddy Palacios

MSc. En Ingeniería Área Ingeniería Metalúrgica

MSc. En Ingeniería y Gestión Ambiental

Estudiante de doctorado en Ing. de Materiales

Codirectora

Prof. Viviana Sánchez Torres

Ph.D. en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2022

## Tabla de contenido

Introducción .....	1
1. Objetivos .....	3
1.1 Objetivo general .....	3
1.2 Objetivos específicos .....	3
2. Marco conceptual .....	4
2.1 Procesos llevados a cabo en la extracción minera de oro y plata en Santander .....	4
2.1.1 Amalgamación .....	4
2.1.2 Cianuración .....	4
2.2 Cómo se llevan a cabo estos procesos en Vetas y California .....	5
3. Metodología .....	6
3.1 Búsqueda y selección de artículos .....	7
3.2 Extracción y gestión de los datos .....	9
4. Contaminantes que participan directamente en la minería auroargentífera .....	9
4.1 Mercurio .....	10
4.2 Cianuro .....	10
5. Contaminantes altamente tóxicos liberados por factores antropogénicos generados como subproducto no aprovechado del proceso de extracción minera .....	11
5.1 Plomo .....	12
5.2 Arsénico .....	12
5.3 Cromo .....	12
6. Resultados .....	13
6.1 Análisis bibliométrico .....	13
6.1.1 Resultados de la depuración con respecto a la información consultada .....	13

6.2	Problemas asociados a la minería auroargentífera en Santander .....	14
6.3	Diagnóstico de los contaminantes del proceso de extracción auroargentífero y sus respectivas concentraciones en suelo y agua .....	15
6.3.1	Mercurio .....	16
6.3.2	Cianuro .....	18
6.3.3	Cromo.....	19
6.3.4	Plomo .....	20
6.3.5	Arsénico .....	21
6.4	Estudio realizado por la AMB de la concentración de mercurio en agua.....	23
7.	Indicadores.....	25
7.1	Índice de calidad del agua (ICA) .....	25
7.2	Promedio de Sólidos Suspendidos Totales (PSST) .....	26
8.	Metodología empleada para medir los contaminantes de la minería que afectan el agua y suelo en la zona de interés.....	27
8.1	Estudio 1 .....	27
8.2	Estudio 2 .....	27
8.3	Estudio 3 .....	28
8.4	Estudio 4 .....	28
8.5	Estudio 5 .....	29
8.6	Estudio 6 .....	29
9.	Indicadores del agua .....	30
9.1	Indicador de calidad del agua (ICA).....	30
9.2	Promedio de sólidos suspendidos totales (PSST) .....	31

10. Efectos causados por la minería auroargentífera en el agua, suelo y a la salud humana en los municipios de Vetás y California del departamento de Santander..... 32

11. Conclusiones..... 35

Referencias bibliográficas..... 36

Apéndices..... 46

**Lista de tablas**

Tabla 1. <i>Ecuaciones de búsqueda</i> .....	7
Tabla 2. <i>Legislaciones de sustancias contaminantes con sus respectivos valores límite para sedimentos y agua.</i> .....	15
Tabla 3. <i>Indicadores de calidad del agua.</i> .....	25
Tabla 4. <i>Promedio de sólidos suspendidos.</i> .....	26
Tabla 5. <i>Variables que determinan la importancia del indicador.</i> .....	30

### Lista de Figuras

Figura 1. <i>Esquema de la metodología empleada para el desarrollo del proyecto.</i> .....	7
Figura 2. <i>Esquema del proceso de selección.</i> .....	13
Figura 3. <i>Concentración de mercurio en agua vs estudios consultados.</i> .....	16
Figura 4. <i>Concentración de mercurio en sedimentos y suelos vs estudios consultados.</i> ..	17
Figura 5. <i>Concentración de cianuro en agua vs estudios consultados.</i> .....	18
Figura 6. <i>Concentración de cromo en sedimentos vs estudios consultados.</i> .....	19
Figura 7. <i>Concentración de plomo en agua vs estudios consultados.</i> .....	20
Figura 8. <i>Concentración de plomo en sedimentos vs estudios consultados.</i> .....	21
Figura 9. <i>Concentración de arsénico en agua vs estudios consultados.</i> .....	22
Figura 10. <i>Concentración de arsénico en sedimentos vs estudios consultados.</i> .....	23
Figura 11. <i>Concentración de mercurio en agua vs estudios consultados.</i> .....	24

**Lista de apéndices**

Apéndice A. Coordenadas de los puntos de referencia para el estudio 1. ....	46
Apéndice B. Coordenadas de las muestras para el estudio 6.....	47
Apéndice C. Calidad del agua según clasificación ICA. ....	47
Apéndice D. Cumplimiento en las normatividades ambientales vigentes de los valores más altos consultados para las concentraciones. ....	47

## Resumen

**Título:** Revisión del estado del arte sobre la contaminación ambiental asociada a la minería auroargentífera en Santander

**Autores:** Oscar Julián Parra Jaimes y Dexy Daniela Quiñones Marín.

**Palabras clave:** Minería, contaminación ambiental, auroargentífera, Vetas-California.

**Descripción:** La presente investigación se enfocó en realizar una revisión del estado del arte que recopilara información acerca de la contaminación ambiental generada por la minería auroargentífera en los distritos mineros de Vetas y California, debido a los constantes llamados de atención de las autoridades ambientales por los elevados niveles de polución registrados por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB). Se propuso como objetivo identificar los contaminantes que participan en el proceso de la extracción de dichos minerales y sus concentraciones en suelo y agua, y por último se determinó el impacto en las zonas de interés propuestas y las afectaciones a la salubridad pública. No se encontró una metodología detallada para el tratamiento de las muestras, pero si los equipos que fueron utilizados, cuyo uso se rige por la norma del Standarth Methods.

Con el fin de cumplir con lo propuesto anteriormente, se utilizaron buscadores como Scopus para llevar a cabo la revisión, filtración y selección de los documentos, se hallaron un total de 2151 de los cuales se seleccionaron finalmente 67. En el análisis de los resultados se determinó que los contaminantes generados en el proceso minero auroargentífero son mercurio, cianuro, cromo, plomo y arsénico, siendo el primero el de mayor afectación por su uso desmedido y su bioacumulación en el cuerpo humano, que afecta la salud de los habitantes de la zona que se ven obligados a consumir alimentos contaminados, correspondiendo a una de las múltiples consecuencias provocadas.

Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Jhon Freddy Palacios. MSc. En Ingeniería Área Ingeniería Metalúrgica. Codirector: Viviana Sánchez Torres. Ph.D. en Ingeniería Química.

### **Abstract**

**Title:** Review of the state of the art on environmental pollution associated with gold-silver mining in Santander

**Authors:** Oscar Julián Parra Jaimes and Dexy Daniela Quiñones Marín.

**Keywords:** Mining, environmental contamination, gold silver, Vetas-California.

**Description:** The present investigation focused on carrying out a review of the state of the art that compiled information about the environmental contamination generated by gold-silver mining in the mining districts of Vetas and California, due to the constant calls for attention from the environmental authorities by the high levels of pollution recorded by the Metropolitan Aqueduct of Bucaramanga (AMB). It was proposed as an objective to identify the contaminants that participate in the extraction process of said minerals and their concentrations in soil and water, and finally the impact on the proposed areas of interest and the effects on public health were determined. A detailed methodology for the treatment of the samples was not found, but the equipment that was used was found, whose use is governed by the Standard Methods.

In order to comply with what was previously proposed, search engines such as Scopus were used to carry out the review, filtering and selection of the documents, a total of 2151 were found, of which 67 were finally selected. In the analysis of the results, determined that the pollutants generated in the auroargentiferous mining process are mercury, cyanide, chromium, lead and arsenic, the first being the most affected due to its excessive use and its bioaccumulation in the human body, which affects the health of the inhabitants of the area who are forced to consume contaminated food, corresponding to one of the many consequences caused.

## Introducción

La minería en Colombia está enraizada desde la época colonial por mineros que de generación en generación han transmitido sus conocimientos a sus hijos ya que esta actividad ha sido su medio de subsistencia para combatir la pobreza en zonas donde escasean las necesidades básicas (Martínez, A. 2012).

En el departamento de Santander, en los distritos mineros de Vetas y California, ubicados en la región central del Macizo de Santander en la Cordillera Oriental, al oriente del país, se presenta una mineralización auroargentífera reconocida como la única mineralización de oro y plata en el departamento (INGEOMINAS, 2001).

La minería practicada en estos distritos es artesanal ya que se lleva a cabo en condiciones bastante precarias con sustancias altamente tóxicas para la salud humana como lo son el cianuro y el Mercurio adquiridos por los galafardos de manera ilegal (Bustamante, J. 2012), En el 2013 con la declaración de Parque Nacional al Páramo de Santurbán (CDMB, 2013) se dio una gran crisis económica debido a que parte del distrito minero quedó dentro de las áreas protegidas y esto aumentó los casos de ilegalidad ya que la población seguía practicando la minería de manera clandestina.

En los últimos años los desechos generados por esta actividad sumados al escaso control de las autoridades, y el uso desmedido de insumos químicos como el cianuro, mercurio, plomo, entre otros, han traído nefastas consecuencias para los ecosistemas, la fiebre del oro ha convertido la minería en un problema visiblemente delicado desde el punto de vista ambiental, con un agravio especial para los recursos hídricos, producto de dichas labores se vierten diariamente a los ríos aledaños desechos contaminados que alteran la vida silvestre, el río Vetas es uno de los principales

afectados en este proceso fruto de los vertimientos contaminados producto de las actividades mineras, lo cual genera problemas de salubridad (Martín, J. 2016).

La principal actividad económica en las localidades Vetas-California es la minería, en Santander hay 203 barequeros dedicados a la extracción de oro (RUCOM, 2022) la producción de oro en el año 2021 fue de 10203 g en Santander, con 9935 g provenientes del municipio de Vetas, con respecto a la plata se obtuvieron 1405 g del distrito de Vetas. Solo en California el 73% del área del municipio está destinado a tal fin, ya que es su principal fuente de ingresos y es practicada por el 53,4% de la población, mientras que en vetas el 80% de la población se dedica a la minería ilegal siendo este el sustento de muchas familias que dependen de este oficio como único medio para subsistir (Alcaldía de California, 2019).

Con el presente proyecto se busca realizar una revisión del estado del arte acerca de la contaminación ambiental generada por la minería auroargentífera en los distritos mineros de Vetas y California, y con tal diagnóstico se busca realizar una comparativa de las concentraciones de estas sustancias, comparándolos con los valores máximos permisibles de la Normatividad Ambiental Colombiana Vigente e deduciendo en el deterioro de la calidad en agua, suelo y afectaciones a la vida humana por la presencia de estos químicos. En tal sentido ¿Qué alteraciones son generadas por la minería auroargentífera en el departamento de Santander relacionadas en los componentes suelo y agua?

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Realizar una revisión del estado del arte acerca de la contaminación ambiental generada por la minería auroargentífera en los municipios de Vetas y California ubicados en el departamento de Santander.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Realizar un diagnóstico acerca de los contaminantes que participan en el proceso de extracción de oro y plata y en qué concentraciones se encuentran en suelo y agua.
- Plantear la metodología empleada para medir los contaminantes de la minería que afectan el agua y suelo en la zona de interés.
- Determinar los efectos causados por la minería auroargentífera en el agua, suelo y a la salud humana en los municipios de Vetas y California, Santander.

## **2. Marco conceptual**

### **2.1 Procesos llevados a cabo en la extracción minera de oro y plata en Santander**

En el área de Santander se tiene registro en documentos que los procesos de extracción minera se llevan a cabo como se menciona enseguida:

#### **2.1.1 Amalgamación**

La amalgamación consiste en la adición de mercurio a las rocas molidas o pulverizadas que contienen metales preciosos, con el fin de atraparlos y formar una masa blanca denominada amalgama (EAN, 2018). Se inicia con la trituración de las rocas y consecutivamente con la separación gravimétrica de los minerales de acuerdo a sus diferentes pesos específicos utilizando canalones (MINMINAS, 2014). Seguidamente se deposita sobre unas mallas finas para aplicar presión y retirar el exceso de mercurio (J. García, 2016). En casos artesanales esta presión se realiza con la mano y a gran escala se lleva a cabo con prensas (EAN, 2018). Una vez se tiene la amalgama, se calienta con el fin de evaporar el mercurio que aún está presente, parte del cual se logra recuperar por medio de un sistema de retorta (E. Carreño, 2001). El Hg que no se recupera, pasa directamente al medio ambiente (J. García, 2016).

#### **2.1.2 Cianuración**

Para el proceso de cianuración se usan comercialmente los cianuros de sodio (NaCN), de potasio (KCN) y de calcio (Ca(CN)<sub>2</sub>). Por lo general, se suele emplear el NaCN, por su fácil acceso y manipulación (R. Álvarez, 2005). Inicialmente se debe triturar y moler las rocas a tal punto que se tenga una consistencia similar a la harina. Posteriormente se pone en contacto el cianuro previamente disuelto con la solución en la que se encuentra el oro y la plata. Luego se realiza una

agitación por un periodo prolongado (EAN, 2018), que varía dependiendo de las condiciones de la planta (INIGEMM, 2013). Más adelante se agrega carbón activado o zinc, con el fin de recuperar los metales preciosos (F. Nava, 2018). El carbón activado requiere costos de operación mayores a largo plazo, y el zinc, que es el más empleado, se emplea en ausencia de oxígeno (Proceso polvo de Zinc, 2021), debido a que puede ocasionar un consumo de zinc mayor al estimado, disminuyendo la eficiencia del proceso (Cementación de oro, 2021). Una vez se libera el oro y la plata de la solución, es necesario someterlo a un proceso de precipitación o con ayuda de cátodos (INIGEMM, 2013). Este es un proceso económico, eficiente y por lo general fácil de operar, puesto que con este se logran recuperaciones del orden del 90% (EAN, 2018).

## **2.2 Cómo se llevan a cabo estos procesos en Vetas y California**

En la minería realizada en Vetas y California, las arenas y lodos en los que se encuentran los minerales preciosos se mezclan con el cianuro, se precipita el oro y la plata y se coloca sobre recipientes metálicos sometiéndose a calentamiento hasta lograr una pasta totalmente seca, evaporando en esta operación las soluciones de cianuro y el mercurio que se encuentre presente. Este precipitado seco se pasa a fundición y refinación al igual que los demás metales que se hayan precipitado (Separación de la amalgama, 2018).

Una vez se tiene el material fundido se realiza un proceso de purificación en el que se usa cobre y ácido nítrico, con el fin de recuperar el oro (USTA, 2016), en el caso de la plata que se encuentra en la solución como nitrato de plata se utilizara una sal, ácido sulfúrico o en algunos casos ácido clorhídrico y hierro para posteriormente obtener la plata metálica al someterla a su temperatura de fusión (Separación de la amalgama, 2018). Las soluciones empobrecidas usadas en el proceso son desechadas (USTA, 2016).

En Santander existen 5 plantas, 3 se encuentran en California y 2 en Vetas y 17 “barrileros”, que extraen el oro de los filones. En Vetas, el oro es más grueso y presenta mejores condiciones por su bajo contenido de sulfuros, en California, el mineral es más rico en sulfuros y contiene un oro más fino, dificultando su proceso de extracción (E. Carreño, 2001), debido a que el oro está finamente diseminado en minerales sulfurados, los cuales pueden reaccionar con el cianuro (V. Rojas, 2003).

Los procesos técnicos en Vetas y California se clasifican en “formal” e “informal”, en el primero se tienen en cuenta dos modelos en los que se opera el más avanzado para la región, es en el que se trabaja con trituración primaria, molienda con molino de bolas, concentración gravimétrica Jig y/o mesa concentradora, amalgamación en barril y cianuración por percolación, en el otro, con menor grado de mecanización, se utiliza un molino californiano en la etapa de molienda, concentración gravimétrica en canaletas, amalgamación en barril y cianuración por percolación. En ambos procesos, llevados a cabo de manera deficiente, se presentan pérdidas de oro cercanas al 40%. En el sector informal, hacen parte los barrileros, que realizan operaciones de molienda y amalgamación de manera simultánea, y realizan cianuración por percolación (Carreño, E. 2001). Posteriormente se darán a conocer los contaminantes activos en la minería de Santander.

### **3. Metodología**

La metodología empleada en esta investigación se realizó teniendo en cuenta tres etapas generales las cuales están resumidas en la figura 1.

**Figura 1**

*Esquema de la metodología empleada para el desarrollo del proyecto.*

Fase 1	Fase 2	Fase 3
<ul style="list-style-type: none"> <li>•Búsqueda de documentos y artículos científicos.</li> <li>•Realizar la revisión sistemática en la literatura en base a las palabras clave.</li> <li>•Años de publicación entre 1999 y 2022.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Resultados del proceso de depuración por título, resumen y contenido.</li> <li>•Organización de los documentos con ayuda de Mendeley y Excel.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Cumplimiento del primer objetivo propuesto, mediante la utilización de gráficos para cada contaminante donde se relaciona con indicadores tales como el Índice de Calidad del Agua (ICA) y Promedio de Sólidos Suspendidos Totales (PSST) y con sus respectivas concentraciones.</li> <li>•Planteamiento de la metodología empleada para la medición de dichas concentraciones y realización de análisis de resultados con las afectaciones que conllevan los contaminantes.</li> </ul>

**3.1 Búsqueda y selección de artículos**

Inicialmente se plantearon las ecuaciones de búsqueda con las palabras claves “Minería en Santander”, “contaminación ambiental”, “minería auroargentífera” “Vetas-California”, “Calidad agua suelo”, “Soto Norte” el periodo de tiempo comprendido en los documentos está entre 1999 a 2022 con el operador booleano “y”.

**Tabla 1**

*Ecuaciones de búsqueda*

ID	Ecuación de búsqueda	Número de artículos
1	“Minería” y “Santander”	1203
2	“Minería auroargentífera” y “Vetas-California”	280

3	“Minería auroargentífera” y “contaminación ambiental” y “Vetas-California”	165
4	“Calidad agua-suelo” y “Soto Norte”	349
5	“Minería en Santander” y “contaminación ambiental” y “Soto Norte”	154
<b>Total</b>		<b>2151</b>

En el proceso de revisión de los artículos se realizaron los siguientes filtros para obtener los artículos que cumplieran con los criterios de interés para el presente trabajo.

- **Título:** para este primer filtro se tiene en cuenta que se relacione con la minería auroargentífera en Santander y la contaminación ambiental asociada a la misma.
- **Resumen:** en el resumen de los artículos se buscó que los documentos expresaran concisamente los componentes que participan en el proceso de extracción auroargentífero, problemas ambientales asociados a la minería y afectaciones a la salud pública de las comunidades del área en estudio.
- **Contenido:** para este último filtro se analizó y se depuró la información, escogiendo la que tuviese relación directa entre el contenido y los objetivos establecidos en el presente trabajo.

Los buscadores utilizados en este proceso fueron Scopus, Web of Science, se indagó en las entidades: el Servicio Geológico Colombiano (Ingeominas), la Agencia Nacional de Minería (ANM), El Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación de la Universidad Santo Tomás (CRAI-USTA), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), Corporación Autónoma Regional Para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente), y en los periódicos el Espectador, Vanguardia y El tiempo.

Con los parámetros de búsqueda fijados se procedió a ordenar y clasificar los artículos como se describe a continuación.

### **3.2 Extracción y gestión de los datos**

Para la organización de los artículos seleccionados, se utilizó el gestor bibliográfico Mendeley, en el que se cargaron los documentos para poder obtener información de los autores, año de publicación, resumen y revista de publicación.

Con la información recolectada de las diferentes fuentes anteriormente mencionadas se procedió a la creación de una base de datos en Excel para hacer la depuración de los documentos, donde se partió, con un total de 2151 artículos en los cuales se realizó un primer filtro con las palabras clave establecidas.

Para el desarrollo de la siguiente etapa en la investigación, se verificó que el contenido de los artículos seleccionados tuviera datos relevantes relacionados con la descripción e información cuantitativa de la concentración de los elementos contaminantes.

## **4. Contaminantes que participan directamente en la minería auroargentífera**

Los distritos mineros de Vetas y California han sido de tradición minera y la mayoría de su población ejerce esta actividad, en la cual utilizan mercurio y cianuro para la extracción de minerales preciosos (USTA, 2016). Enseguida, respecto a estos contaminantes se harán comparativas de concentraciones teniendo en cuenta lo estipulado en la resolución 2115 del 2007, debido que es la que se refiere a las condiciones del agua para consumo humano, entonces para concentraciones altas se considerara por encima de este límite de la normativa y bajas cuando son concentraciones que no superan este límite, cuyos valores se encuentran en la tabla 1.

#### **4.1 Mercurio**

A pesar de que en la ley 1658 de 2013 se estableció un periodo de 5 años para la erradicación del uso de mercurio en la minería y 10 años en la industria (MINAMBIENTE, Ley 1658 de 2013), y aún se sigue utilizando en el presente año 2022 a pesar de su prohibición. Recientemente el AMB ha presentado concentraciones elevadas de mercurio en la Planta de Bosconia, además, existen múltiples denuncias de prensa y en redes sociales sobre mineros artesanales e ilegales que extraen oro, utilizando mercurio en áreas del título minero de la multinacional ECO ORO (Vanguardia, 2022).

El mercurio que se usa en la industria minera hace una aleación con los metales preciosos y de la amalgama resultante se trata de recuperar una parte de este (EAN, 2018). Una vez es liberado al ambiente, puede formar tanto compuestos orgánicos como inorgánicos (CIEMAT, 2010). Estas sustancias generan distintos efectos adversos en la salud, los síntomas se relacionan por lo general con afectaciones en el sistema nervioso, daños al tracto gastrointestinal y los riñones, dolor de cabeza, debilidad, insomnio y fallas respiratorias (EAN, 2018).

El metilmercurio es una de las formaciones más comunes, y más dañina. La acción microbiana forma este compuesto que posteriormente entra en la cadena alimentaria (Lominchar, M. 2010), debido a que presenta una bioacumulación en microinvertebrados, fitoplancton, zooplancton y peces que residan en la columna de agua, que como resultado provoca la intoxicación de personas y posteriormente su muerte (Martínez, 2004).

#### **4.2 Cianuro**

El cianuro utilizado en el proceso para la extracción de oro y plata se pueden reunir en una clasificación que se conoce como cianuro total (CN total o TCN), en el cual se tienen en cuenta

formas del cianuro que disueltos o no, están presentes en solución acuosa (OVIEDO, 2001), debido a que la cianuración se pueden formar muchos compuestos (Vera, M. 2016).

En cuanto el cianuro entra al medio ambiente afecta los cuerpos de agua superficial, subterránea y los suelos, en los que se mueven con bastante facilidad pudiéndose formar en estos medios cianuro de hidrógeno, que, aunque no se acumula en el cuerpo de los peces (ATSDR, 2006), es significativamente más tóxico en comparación con los otros compuestos originados (Morán, R. 1999). Una exposición a altos niveles de cianuro daña el cerebro y el corazón, pudiendo provocar un estado de coma o la muerte, en niveles más bajos se manifiestan síntomas como dificultad para respirar, dolor en el pecho, vómito, alteraciones en la sangre, dolor de cabeza (ATSDR, 2006).

#### **5. Contaminantes altamente tóxicos liberados por factores antropogénicos generados como subproducto no aprovechado del proceso de extracción minera**

Una gran cantidad de minerales se encuentran en filones encajados en rocas ígneas y metamórficas (Carreño, E. 2001), en coluviones y aluviones, todos pertenecientes al macizo de Santander (Contreras, G. 2010), de los cuales se extrae los minerales preciosos (MINMINAS, 2017). Inmediatamente terminado el proceso de extracción, minerales que contienen el arsénico, plomo, cromo, zinc, cobre, entre otros, se han encontrado en diferentes formaciones minerales en la zona (USTA, 2016) que, al no ser aprovechados como subproductos en el proceso, terminan convirtiéndose en contaminantes potenciales para la biota (D. Alonso, 2014). De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), el arsénico y el plomo se encuentran en la lista de los diez productos químicos más perjudiciales para la salud (Esteve, 2021).

### **5.1 Plomo**

El plomo es una sustancia toxica presente en formaciones minerales en Vetas y California, (USTA, 2016). Puede entrar al cuerpo por inhalación o ingestión, afectando casi todos los órganos y sistemas del cuerpo, que a largo plazo ocasiona dificultad de aprendizaje, memoria y atención, puede causar anemia y en mujeres embarazadas un aborto espontaneo (ATSDR). Se distribuye hasta alcanzar el cerebro, hígado y riñones, pudiéndose depositar en dientes y huesos (OMS, 2021).

### **5.2 Arsénico**

Es uno de los metales pesados más relevantes a nivel ambiental por su elevada toxicidad, principalmente está presente en forma del mineral arsenopirita, tiene alta movilidad y capacidad de transformación, la presencia de elevados niveles de As en el agua se relaciona directamente con la liberación desde su fase sólida, que es provocado por la mayoría de los asentamientos mineros, favoreciendo su ingreso en la cadena alimenticia humana a través de su bioacumulación en los peces, carne, leche, queso y plantas comestibles. Su ingestión o inhalación puede causar cáncer a los humanos y una exposición durante un largo periodo de tiempo ocasionan intoxicación crónica, manifestándose inicialmente lesiones cutáneas, trastornos gastrointestinales, afectación en el sistema nervioso o cardiovascular (Alonso, D. 2014).

### **5.3 Cromo**

Debido al riesgo que implica la exposición al cromo se debe considerar como un contaminante, pudiendo ingerirse por medio de alimentos, agua o el aire. La exposición a niveles alto en seres humanos puede ocasionar daños en la nariz, cáncer, anemia o dañar los intestinos (ATSDR, 2012).

## 6. Resultados

### 6.1 Análisis bibliométrico

A continuación, se describe el resultado de la depuración de documentos consultados, teniendo en cuenta los parámetros mencionados en la metodología.

#### 6.1.1 Resultados de la depuración con respecto a la información consultada

De las exploraciones realizadas se obtuvieron 2151 documentos a partir de las palabras clave en los sitios establecidos en el ítem 3.2, de los cuales se filtraron 1023 por título y 372 por resumen, los demás fueron descartados al no cumplir con los criterios de búsqueda; seleccionando finalmente 67 documentos (artículos, trabajos de grado, revistas, videos, libros) que cumplieran con los parámetros propuestos para realizar la depuración y clasificación. En la figura 2 se sintetiza el proceso de selección descrito anteriormente.

#### Figura 2

*Esquema del proceso de selección.*



## 6.2 Problemas asociados a la minería auroargentífera en Santander

En Santander uno de los efectos más representativos que repercute sobre los recursos hídricos es el vertimiento de sustancias tóxicas (A. Corrales, 2013), que ocasionan un deterioro importante en la fauna de la zona, caracterizada por la abundante presencia de peces (CDMB, 2006, p18) y contaminando las fuentes de agua subterránea (M. Aramburo, 2012).

Entre los impactos de la minería el suelo es uno de los primeros afectados por la remoción de sus capas, lo que genera alteración en sus propiedades físicas y químicas (EAN, 2018). Por otro lado, el deterioro en la calidad de las fuentes hídricas se evidencia en la alteración de la turbidez de cuerpos de agua cercanos e incorporación de agentes tóxicos (Sentencia T445, 2016), que desencadenan alteraciones en la fauna y flora circundante, incorporándose en las cadenas tróficas (EAN, 2018) y provocando su acidificación (Sentencia T445, 2016).

Por otro lado, uno de los agentes tóxicos más comunes en los municipios de Vetas y California es el mercurio, cuyo problema inicia con la liberación al medio, donde se transforma en compuestos solubles que se precipitan y pasan a aguas superficiales, subterráneas y a los océanos (Lominchar, 2010), desencadenando fenómenos de bioacumulación y biomagnificación (L. Sánchez, 2013). Su grado de toxicidad varía respecto a la forma en la que se encuentre, siendo las orgánicas como el metilmercurio y el dimetilmercurio las más dañinas una vez se incorporan en la cadena alimentaria (CIEMAT, 2010). Adicionalmente, el mercurio quemado para recuperar el oro puede evaporarse y ser inhalado por los trabajadores (N. Fernández, 2019), perjudicando los sistemas nerviosos, riñones y vías respiratorias, con posibles consecuencias fatales (OMS, 2017).

De lo anterior se deriva el objetivo de este proyecto, el cual es sintetizar la información disponible en los medios electrónicos y físicos, acerca de las concentraciones de los contaminantes

utilizados y los efectos sobre la salud que se han generado en los habitantes de los municipios de Vetás y California en los procesos mineros de extracción de oro y plata.

### 6.3 Diagnóstico de los contaminantes del proceso de extracción auroargentífero y sus respectivas concentraciones en suelo y agua

A continuación, se darán a conocer los resultados de cada uno de los estudios que aportan información relevante y más reciente de los contaminantes más nocivos que pueden generar un impacto significativo en el suelo, el agua y la salud humana. Con el fin de tener un punto de referencia, se tendrán en cuenta los valores límites de estos contaminantes con lo estipulado en la legislación de Canadá y los estándares de Estados Unidos para las muestras de sedimentos y suelos, puesto que en Colombia no existe una normativa para estos. Para el caso de las muestras de agua se considerarán, la Resolución 2115 de 2007 y la Resolución 631 de 2015 de Colombia y sus valores se presentan en la tabla 1.

**Tabla 2**

*Legislaciones de sustancias contaminantes con sus respectivos valores límite para sedimentos y agua.*

Sustancia	Sedimento (mg/kg)		Agua (mg/L)	
	Legislación Canadiense	Estándares de EE.UU	Resolución 2115 de 2007	Resolución 631 de 2015
Mercurio	0,17	0,41	0,001	0,002
Cianuro	N/A	N/A	0,05	1
Cromo	37,3	260	0,05	0,5
Plomo	35	450	0,01	0,2
Arsénico	5,9	57	0,01	0,1

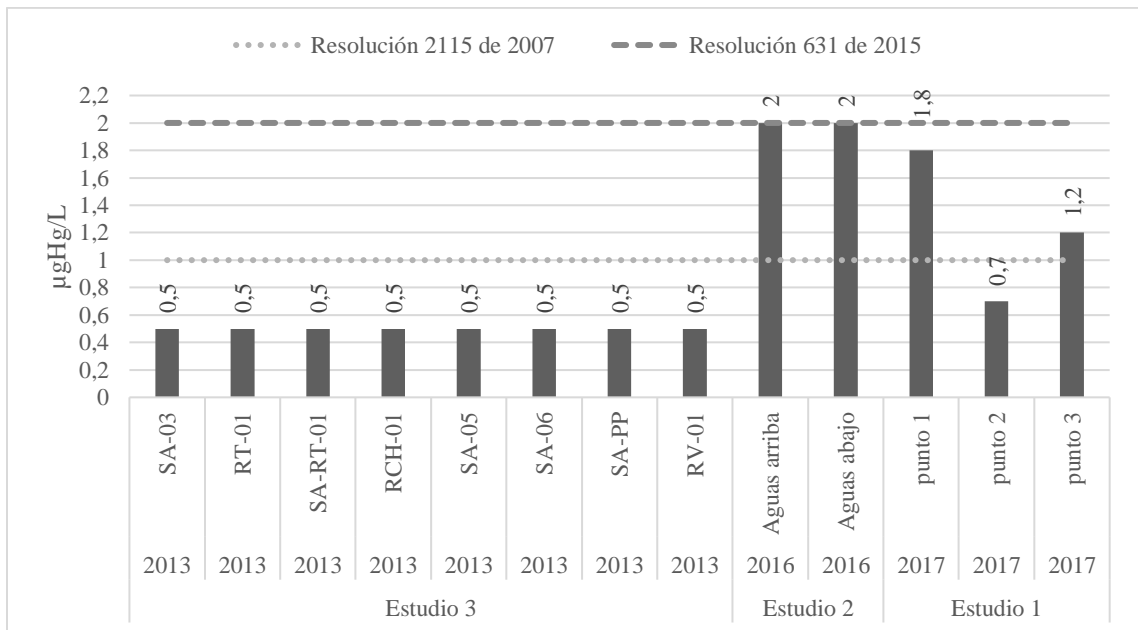
Más adelante se mencionarán diversos estudios en los cuales se realizaron análisis en sedimentos y agua en la zona de Santander que se enumeraron del 1 al 7. Se debe tener en cuenta que en el sistema legislativo relacionado con los sedimentos de Estados Unidos cada Estado Norteamericano define sus propios estándares (Ingeniería del agua, 2018), es por esto que se prefirió hacer uso de los estándares generales de los Estados Unidos.

### 6.3.1 Mercurio

Con el fin de hacer más fácil el análisis de la información se optó por presentar los datos utilizando la gráfica que se muestra en la figura 3 con los datos de concentración en unidades de  $\mu\text{gHg/Litro}$ .

**Figura 3**

*Concentración de mercurio en agua vs estudios consultados.*

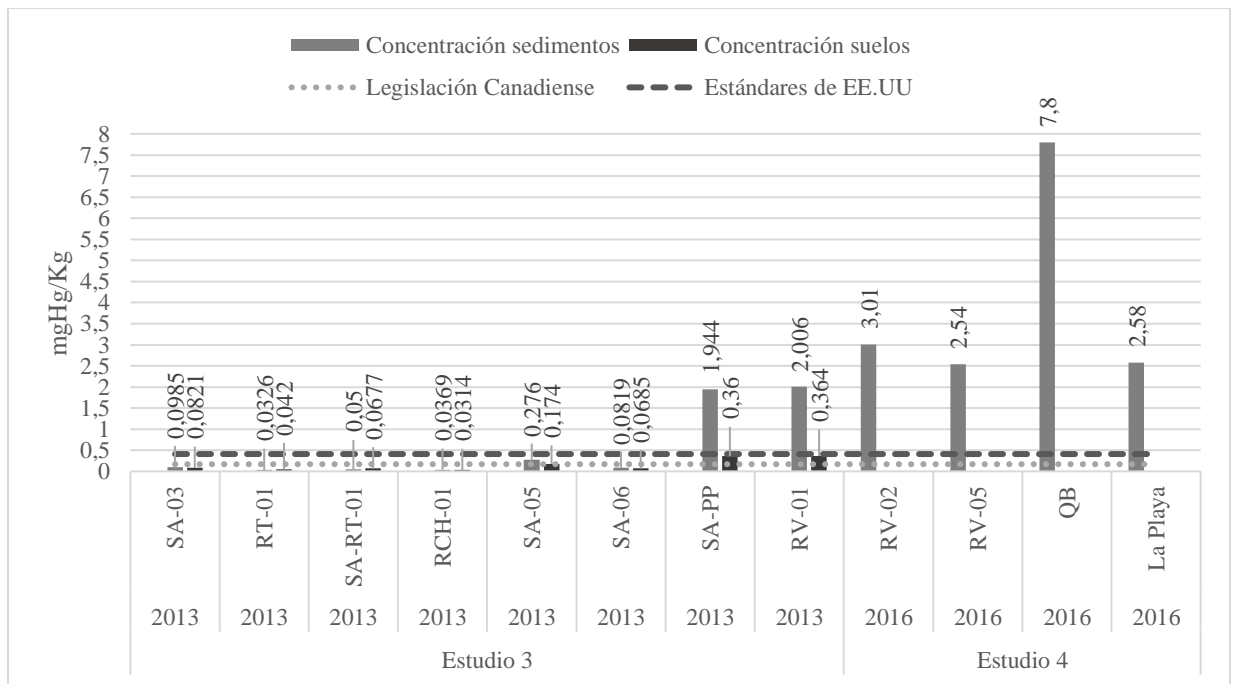


Como se observa en la figura 3 existen valores que se repiten para los estudios 2 y 3, debido a que los equipos con los cuales se realizó el registro no tenían límites de detección menores, como

el caso del estudio 3 donde los valores presentados son iguales a 0,5 µgHg/L y para el estudio 2 de 2 µgHg/L. Para los datos recopilados en el estudio 3, se encontraron concentraciones inferiores a los límites permisibles en la norma Colombiana. Por otra parte, en el estudio 2 de acuerdo con los resultados obtenidos se evidencia que se está incumpliendo con los límites establecidos según Resolución del 2007 y están muy cerca de superar el límite de la Resolución del 2015. En el estudio 1, las muestras denominadas “punto 1” y “punto 3” infringen la Resolución del 2007, y la muestra “punto 2” está dentro del límite permitido de acuerdo a la normatividad. A continuación, se presentan en la figura 4 los datos de concentraciones obtenidos para suelos y sedimentos.

**Figura 4**

*Concentración de mercurio en sedimentos y suelos vs estudios consultados.*



En la figura 4 se observa que en el estudio 4 el valor mínimo presentado de concentración de mercurio en las muestras fue de 2,54 mgHg/Kg incumpliendo con los límites permisibles

establecidos por la normatividad de contaminación de sedimentos de Canadá y Estados Unidos. En el caso del estudio 3 el 50% de las muestras analizadas incumplen con estas normatividades.

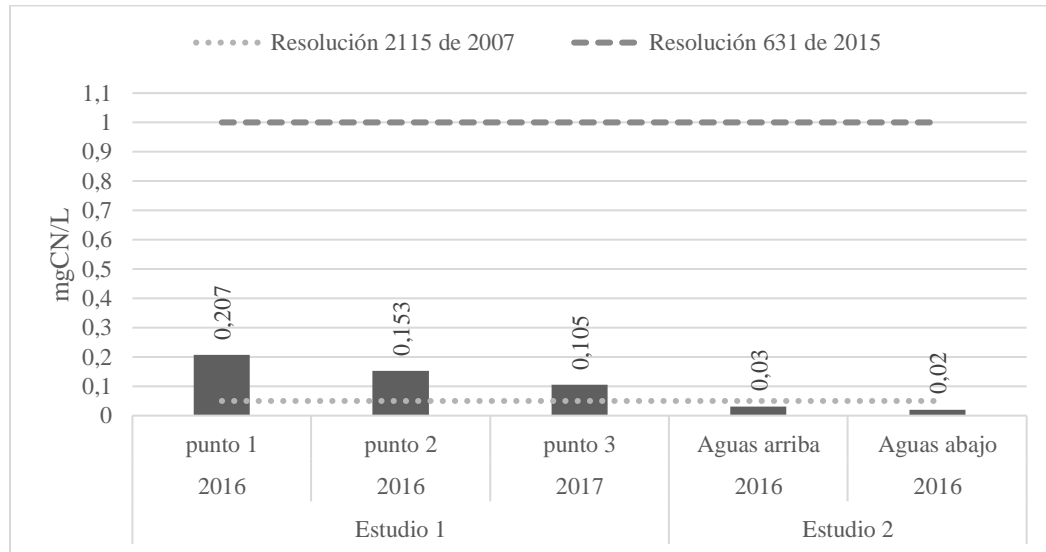
Para el análisis de los suelos, se encontraron que tres de las siete muestras del estudio 3 superan el límite establecido por la normatividad de Canadá presentando valores superiores a 0,174 mgHg/Kg, pero cumpliendo con la normatividad de Estados Unidos cuyo límite es de 0,41 mgHg/Kg. En el caso del estudio 3, solo dos de las muestras analizadas (SA-PP y RV-01) tienen concentraciones elevadas, 1,944 y 2,006 mgHg/Kg respectivamente.

**6.3.2 Cianuro**

De los estudios realizados con el cianuro, únicamente existen datos públicos de concentraciones en el agua, las cuales se presentan en la figura 5.

**Figura 5**

*Concentración de cianuro en agua vs estudios consultados.*



Las muestras correspondientes al estudio 1 superan únicamente el límite de la Resolución 2115 del 2007 y no sobrepasan el límite de la Resolución 631 del 2015 mencionados en la tabla 1.

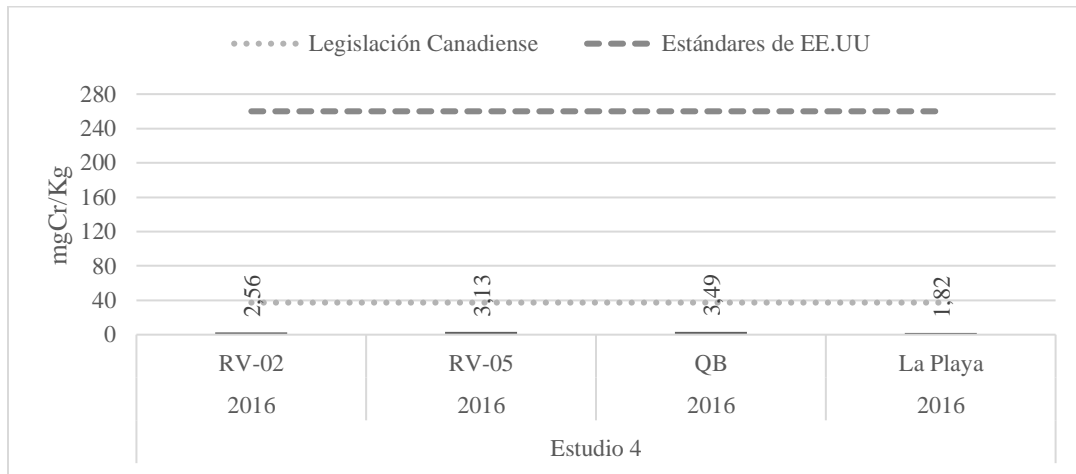
Los valores de las muestras del estudio 2 están cercanos a encontrarse dentro del límite de la Resolución del 2007, pero cumpliendo con el límite de la Resolución 631 del 2015.

### 6.3.3 Cromo

A continuación, se presentan las concentraciones de cromo en sedimentos de los estudios encontrados en la figura 6.

**Figura 6**

*Concentración de cromo en sedimentos vs estudios consultados.*



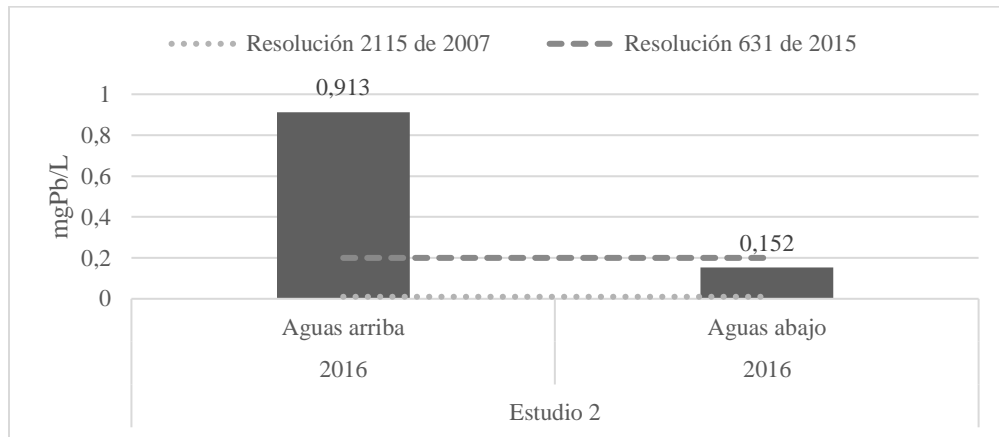
De acuerdo con los datos presentados en la figura 6 la mayor concentración es de 3,49 mgCr/Kg y no rebasa los valores límite establecidos por las legislaciones de Canadá y los estándares de Estados Unidos cuyas concentraciones se encuentran en la tabla 1. Concluyendo así, que el cromo no influye significativamente en la contaminación de los municipios de Vetas y California a causa de la minería.

### 6.3.4 Plomo

En la figura 7 se presentan los valores de las concentraciones de las muestras que se han analizado en los estudios realizados para el plomo.

**Figura 7**

*Concentración de plomo en agua vs estudios consultados.*

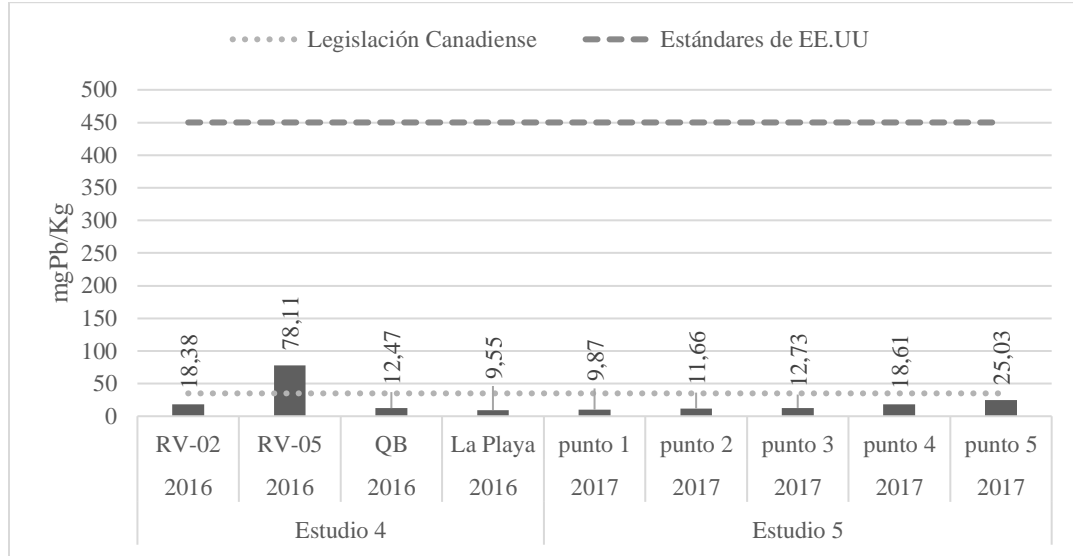


La toma de muestras se realizó 100 metros aguas arriba y 100 metros aguas abajo por la empresa Trompeteros LTDA ubicada en el municipio de Vetas, en donde dicha empresa realizó tratamiento de aguas residuales de la minería (UNAD, 2018). Como se observa en la figura 7, el estudio de aguas arriba incumple con las dos resoluciones de Colombia, mientras que, el estudio de aguas abajo cumple con la Resolución del 2015, pero supera el límite de la Resolución del 2007.

En la figura 8 se relacionan las muestras de sedimentos encontradas en estudios que se realizaron en la zona de Vetas y California.

**Figura 8**

*Concentración de plomo en sedimentos vs estudios consultados.*



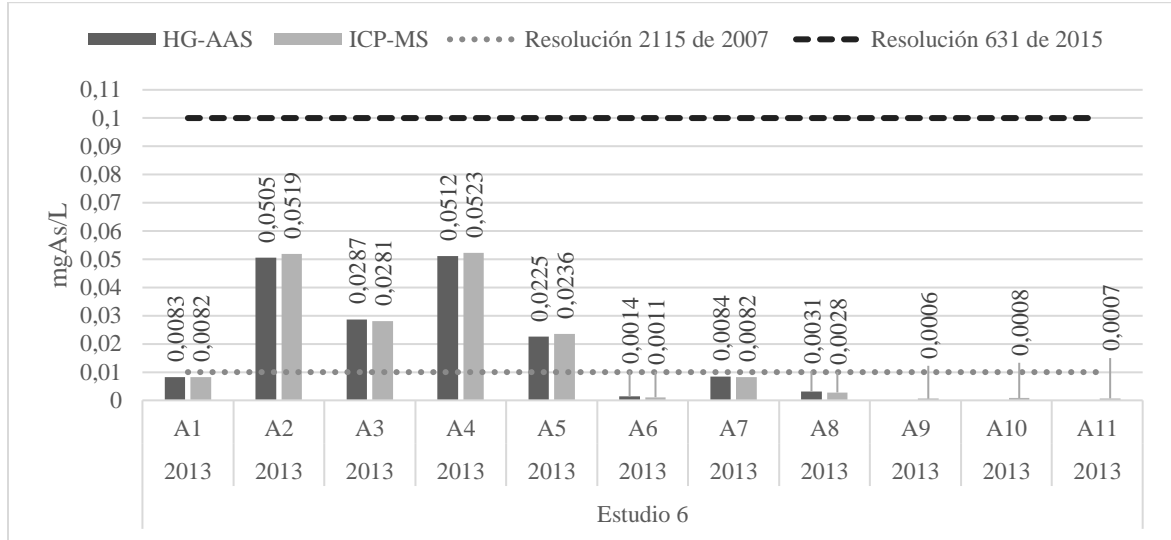
De las muestras tomadas, RV-05 es la que tiene la concentración más alta con un valor de 78,11 mgPb/Kg y la única que incumple con lo establecido en la Legislación Canadiense y los Estándares de Estados Unidos. Las muestras de RV-02, punto 4 y punto 5 están cercanas a superar el límite de la Legislación Canadiense y las demás cumplen con la normatividad.

**6.3.5 Arsénico**

Los datos de concentraciones de arsénico encontradas en el estudio 6 se midieron con los equipos de Espectroscopia de Absorción Atómica con Generación de Hidruros (HG-AAS) y Espectrometría de Masas por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS), y los resultados se presentan en la figura 9.

**Figura 9**

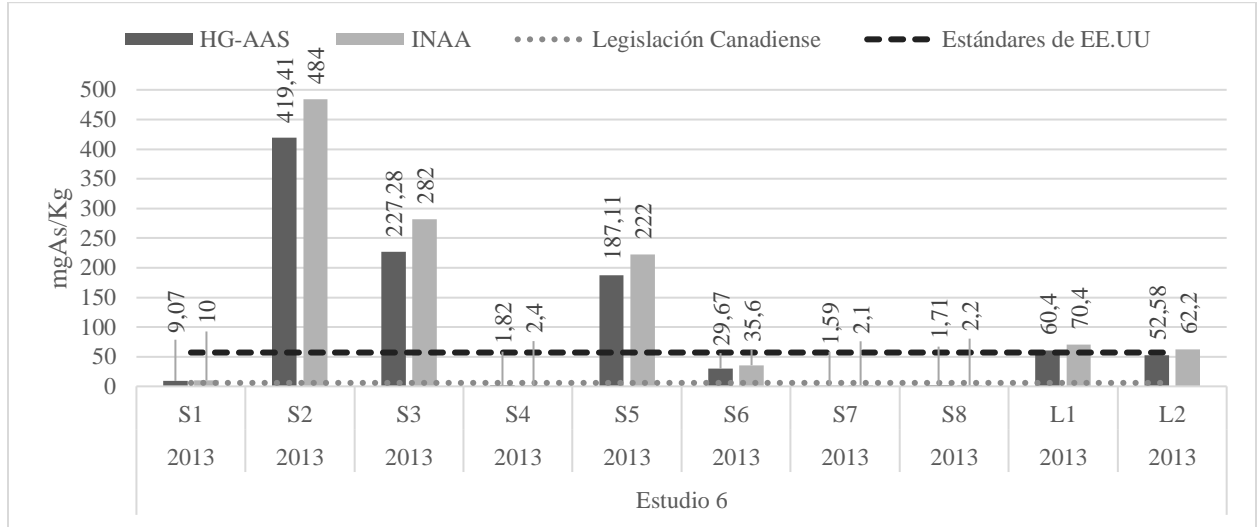
*Concentración de arsénico en agua vs estudios consultados.*



Para las muestras A2, A3, A4 y A5 se observó que superan el límite establecido en la Resolución del 2007, aunque no sobrepasaron el límite de la Resolución del 2015. No se observó una diferencia relevante en el resultado obtenido para las muestras de las concentraciones encontradas con cada equipo, obteniéndose diferencias en el orden de milésimas. A continuación, se encuentran en la figura 10 las concentraciones de arsénico en sedimentos.

**Figura 10**

*Concentración de arsénico en sedimentos vs estudios consultados.*



En el estudio se tomó como referencia los valores hallados por el método de análisis por Activación Neutrónica Instrumental (INAA) debido a que tiene mayor sensibilidad, precisión y selectividad que el HG-AAS (UNAL, 2014). Las muestras S2, S3 y S5 superan los límites establecidos de la legislación Canadiense y los estándares de Estados Unidos. Los resultados de los análisis realizados a las muestras S4, S7 y S8 muestran valores de concentración que cumplen con los límites de las normas de Canadá y Estados Unidos. Las concentraciones de S1 y S6 incumplen con la legislación Canadiense, pero no con la de Estados Unidos. La diferencia entre el equipo de referencia (INAA) y el equipo HG-AAS es de aproximadamente de un 14% de error para el segundo.

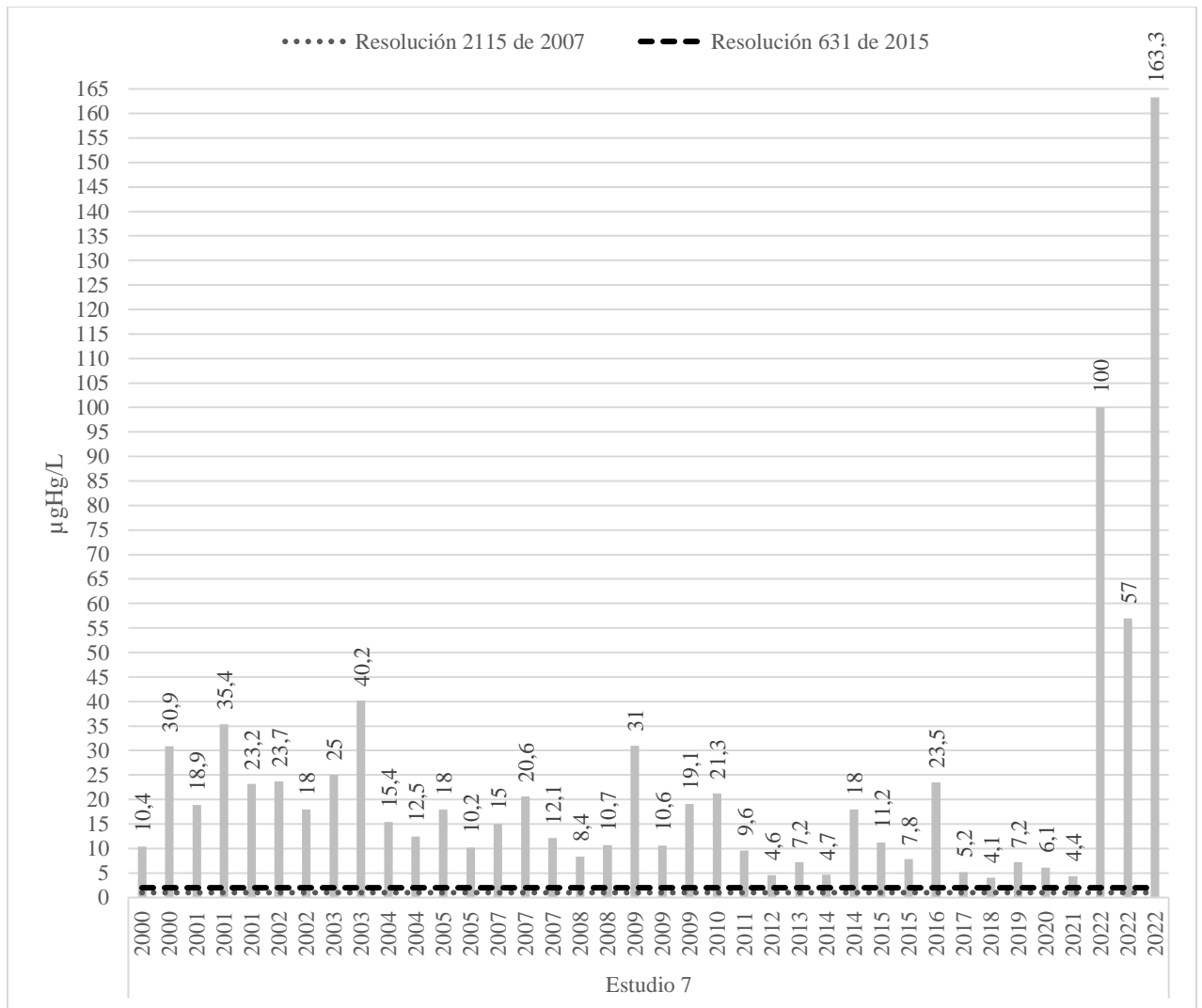
**6.4 Estudio realizado por la AMB de la concentración de mercurio en agua**

Actualmente los datos de concentración de mercurio son preocupantes debido a que como se observa en la figura 11, nunca se habían registrado concentraciones tan elevadas como en el presente año 2022, teniendo en cuenta los datos históricos comprendidos desde el año 2000 hasta

el 2022. Las muestras son tomadas en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) Bosconia (Vanguardia, 2022). Esta planta es la encargada de abastecer de agua potable a gran parte de la zona de la ciudad de Bucaramanga (L. Pérez, 2019).

**Figura 11**

*Concentración de mercurio en agua vs estudios consultados.*



Las mayores concentraciones de Hg se registraron en el año 2022, cuyos valores son 100, 57 y 163,3 µgHg/L. Según Hernán Clavijo Granados, gerente general del AMB, este episodio

puede tener varias causas entre ellas está la minería ilegal y la remoción de sedimentos. Estos datos son realmente difíciles de conseguir, aunque, el AMB afirma que son públicos (Vanguardia, 2022).

## 7. Indicadores

### 7.1 Índice de calidad del agua (ICA)

Con el ICA se revelan las condiciones fisicoquímicas generales de una corriente de agua superficial y ayuda a conocer la calidad que presenta en el punto de monitoreo. Los valores del indicador se encuentran en la tabla 2 y se clasifican en una de cinco categorías (buena, aceptable, regular, mala o muy mala) que a su vez se asocian con un color (azul, verde, amarillo, naranja y rojo, respectivamente) como se especifica en el apéndice C, relacionándose con valores desde cero hasta uno para señalar su grado de calidad, siendo el valor 1 un indicador denominado como bueno (IDEAM, 2018).

**Tabla 3**

*Indicadores de calidad del agua.*

Corriente	Nombre del punto o estación	Coordenadas del punto de monitoreo	2020		2021	
			ICA promedio	Calificación ICA promedio	ICA promedio	Calificación ICA promedio
Suratá	Majadas	Longitud: -73,09 Latitud: 7,16 Altitud: 760	N/A	N/A	0,64	Regular (Color amarillo)
Vetas	Puente Panega	Longitud: -72,99 Latitud: 7,34 Altitud: 1620	0,6	Regular (Color amarillo)	0,69	Regular (Color amarillo)

De acuerdo con lo observado en la tabla 2, los valores indican que los estados de los cuerpos de agua se clasifican como regulares para todos los puntos de monitoreo en los Ríos Vetas y Suratá.

## 7.2 Promedio de Sólidos Suspendidos Totales (PSST)

El PSST representa la cantidad de partículas en suspensión en las corrientes de agua superficial, hasta el momento en el que se realizó la recopilación bibliográfica del presente trabajo no se ha reglamentado este parámetro en Colombia. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), sugiere tomar como referencia un valor límite de 150 mg/L de SST el cual, si es sobrepasado, se considera que el cuerpo de agua presenta contaminación (IDEAM, 2020).

**Tabla 4**

*Promedio de sólidos suspendidos.*

Corriente	Nombre del punto o estación	Coordenadas del punto de monitoreo	Unidades	2020	2021
Suratá	Majadas	Longitud: -73,09 Latitud: 7,16 Altitud: 760	mg/L	N/A	146,0
Vetas	Puente Panega	Longitud: -72,99 Latitud: 7,34 Altitud: 1620	mg/L	173,0	112,0

De acuerdo a los datos reportados por el IDEAM, en el caso del Río Suratá se presentan concentraciones que se pueden considerar como contaminación. Para el Río Vetas se evidencia una disminución en la concentración en el año 2020 de 173 mg/L a 112 mg/L para el año 2021, encontrándose en un estado de mejoría, en el cual, se puede considerar que ya no está contaminado.

## **8. Metodología empleada para medir los contaminantes de la minería que afectan el agua y suelo en la zona de interés**

En función de lo mostrado en las figuras anteriores, en las cuales los datos fueron clasificados por estudios, se va a proceder con la explicación correspondiente (en caso de que se encuentre en el documento consultado) cómo se realizó la toma de muestras y su respectiva georreferenciación. A continuación, se muestra el análisis realizado en cada estudio considerado.

### **8.1 Estudio 1**

Los puntos de monitoreo de agua para este estudio se ubicaron en la vereda el Borrero a 1,5 km de la cabecera municipal de Vetas. El segundo punto se estableció en la vereda Móngora, debajo de un puente con este nombre, a 8 km del primer punto sobre las vías de Vetas - California. El tercer y último punto se ubicó en la vereda Angosturas en el municipio de California, en el sector conocido como la Y. Las coordenadas específicas para los puntos de monitoreo se encuentran en el apéndice A. Las muestras fueron tomadas los días 30 de octubre, 29 de noviembre del año 2016 y 12 de febrero de 2017. Los análisis de las muestras para la determinación de mercurio y cianuro fueron realizados en el Laboratorio ECOSAM S.A.S, en donde se usó un equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA) (Rodríguez, C. 2018).

### **8.2 Estudio 2**

En este caso el estudio fue realizado por la Sociedad Minera Trompetero LTDA que se encuentra ubicada en el municipio de Vetas del Departamento de Santander. Esta operación consiste en extraer mineral y tratar de mitigar la contaminación causada por el proceso de extracción minera. Las muestras del monitoreo fueron tomadas 100 metros tanto aguas arriba como aguas abajo del punto de vertimiento. La fecha en que se realizó este muestreo fue el día 13 de

diciembre del 2016, durante cada hora en un intervalo de 8 horas en los dos puntos ya mencionados. Las muestras fueron preservadas y refrigeradas, manteniendo la cadena de frío hasta la llegada al laboratorio ECOSAM S.A.S para el análisis mediante el uso de un equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA) (Ayala, J. 2018).

### **8.3 Estudio 3**

Se tomaron muestras de mercurio únicamente en este estudio, para posteriormente ser analizadas en el equipo HYDRA-C de Teledyne Leeman Labs, que opera usando la técnica de Absorción Atómica con Generación de Hidruros (GH-EAA). Los puntos de muestreo de agua se seleccionaron en las confluencias de los Ríos Charta, Tona y Vetas con el Río Suratá, tomando en total 8 muestras de suelos, sedimentos y agua en el año 2013 (Bernal, C. 2013).

### **8.4 Estudio 4**

Para este estudio los puntos de muestreo se dividieron en tres de la siguiente manera: en el punto 1 se tomó las muestras RV-02 y QB, en el punto 2 RV-05 y en el punto 3 la muestra “La Playa”. En el punto 1 se ubicó para RV-02 antes de la confluencia con la Quebrada la Baja y para QB antes de la confluencia con el Río Vetas, el punto 2 se dispuso antes de la confluencia del Río Vetas, cercano al pueblo de Vetas y para el punto 3 en el Río Suratá, antes de la planta de tratamiento de Bosconia, cerca de Matanza.

Para la preparación de las muestras en este estudio se realizó el procedimiento de secado durante ocho días a temperatura ambiente, se tamizó sobre una malla de 60 micras, luego se homogeneizó y por último se cuarteó con el fin de obtener una muestra representativa.

La determinación del mercurio se utilizó la técnica Cold Vapor Atomic Absorption Spectroscopy (CV-AAS) y los demás elementos fueron analizados con Absorción Atómica con Generación de Hidruros (GH-EAA).

La toma de muestras de sedimentos se inició el día 18 de julio de 2016 en los Ríos Vetas y Suratá y en la Quebrada la Baja, para cada uno se analizaron tres grupos, para un total de 9 muestras, con una diferencia en tiempo, en cada toma, de un mes aproximadamente. Se tuvieron en cuenta estudios realizados por la CDMB para la determinación de los puntos de muestreo, verificando que se caracterizan por ser los lugares de mayor acumulación de sedimentos (Jiménez, J. 2016).

### **8.5 Estudio 5**

En este estudio se relacionaron las muestras de sedimentos analizadas que contenían plomo, las cuales fueron tomadas el 18 de septiembre de 2017 en una única zona de muestreo, a la entrada de la bocamina “El Tigre”, localizada en el municipio de California Santander. Se estableció un área de 60 m<sup>2</sup>, dentro de la cual se tomaron 25 muestras en total. Posteriormente, se rotularon y almacenaron en bolsas plásticas de 2 kg, fueron enviadas al laboratorio. Luego se realizó un secado durante 24 horas, para proceder con el proceso de trituración y tamizado en una malla de 60 micras para su posterior análisis en el equipo AAS (Morales, E. 2018).

### **8.6 Estudio 6**

La zona de estudio comprende los municipios de Vetas, California, Suratá, Matanza, Charta y Bucaramanga. Las muestras que se tomaron fueron las siguientes: 11 de aguas superficiales, 7 de sedimentos activos y 3 de sedimentos secos, ubicadas en los residuos de minas en los puntos específicos de acuerdo con las coordenadas mostradas en el apéndice B. En el caso

de las muestras de sedimentos, estas fueron secadas a temperatura ambiente durante tres días, molidas con rodillo de madera y tamizadas en una malla de abertura de 149 micras, para posteriormente ser analizadas utilizando los equipos de HG-AAS y INAA. Con referencia a las muestras de agua se analizaron con los equipos de HG-AAS y ICP-MS.

Los estudios presentados anteriormente se llevaron a cabo teniendo en cuenta las metodologías del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017) y del IDEAM, a excepción del estudio 1, el cual utilizó únicamente los lineamientos propuestos por el IDEAM (Alonso, D. 2014).

## 9. Indicadores del agua

### 9.1 Indicador de calidad del agua (ICA)

El ICA corresponde a una expresión numérica que se obtiene al medir la concentración de 6 variables fisicoquímicas básicas en los puntos de monitoreo de la Red de Referencia Nacional Del Alto Magdalena, descritas en la tabla 4 (IDEAM, 2018). El sistema de evaluación prevé que las mediciones sean cada tres meses. La fórmula de cálculo del indicador es la siguiente:

$$ICA_j = \sum W_i * I_{ij} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

$ICA_j$  = Es el Índice de Calidad del Agua calculado a la altura del punto de monitoreo j.

$W_i$  = Es el ponderador o peso relativo asignado a la variable de calidad i.

$I_i$  = Es el valor calculado de la variable i.

i = Corresponde a la variable que hace parte del indicador.

En la tabla 4 se resumen las variables involucradas en el cálculo del indicador:

#### Tabla 5

*Variables que determinan la importancia del indicador.*

Variable	Unidades	Peso de importancia ICA 6 variables
Oxígeno Disuelto - OD	% saturación	0,17
Sólidos Suspendidos Totales - SST	mg/L	0,17
Demanda Química de Oxígeno - DQO	mg/L	0,17
Conductividad Eléctrica - CE	uS/cm	0,17
N total/P total - NT/PT	mg/L/mg/L	0,17
pH	Unidades de pH	0,17

## 9.2 Promedio de sólidos suspendidos totales (PSST)

El PSST se determina por medio del método gravimétrico y representa la cantidad de partículas que se mantienen en suspensión en las corrientes de agua superficial. Esta concentración es medida en las estaciones de la Red de Referencia Nacional de Calidad del Agua del IDEAM (IDEAM, 2020).

Para realizar la determinación del parámetro se utiliza la siguiente ecuación (APHA, 2017):

$$\frac{\text{mg de SST}}{L} = \frac{A-B}{\text{volumen muestral (L)}} * 1000 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

A = peso de filtro en mg + residuo seco en mg

B = peso del filtro en mg

La forma de cálculo del promedio se realiza de la siguiente manera:

$$PSST_{jt} = \frac{\sum_{i=1}^n SST_{ijt}}{n} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

$PSST_{jt}$  = Promedio del total de sólidos en suspensión de la estación j, en el periodo de tiempo t.

$SST_{ijt}$  = Valor del total de sólidos en suspensión  $i$ , medidos en la estación  $j$ , durante un periodo de tiempo  $t$ .

$n$  = Número de valores del total de sólidos en suspensión medidos en la estación  $j$ , durante el periodo de tiempo  $t$ .

### **10. Efectos causados por la minería auroargentífera en el agua, suelo y a la salud humana en los municipios de Vetas y California del departamento de Santander**

De acuerdo con el gerente general del AMB en caso de presentarse altos niveles de mercurio en el agua se suspenderá la captación en la Planta de Bosconia, la cual tiene capacidad de filtrado de hasta 14 microgramos de mercurio por litro de agua. En cuanto se registran valores superiores al límite de filtrado se evita que el líquido contaminado entre al sistema.

Conforme con el líder social de la Vereda Rosa Blanca de Bucaramanga, las comunidades comprendidas entre la bocatoma de la PTAP de Bosconia y el Páramo de Santurbán, incluyendo los municipios de Vetas y California, son las más afectadas debido a que se ven obligados a hacer uso de este recurso hídrico que no tiene un tratamiento previo (Vanguardia, 2022).

Los mineros de California han tenido que lidiar con una constante incertidumbre acerca de la viabilidad futura de su actividad (R. Lozano, 2019). Las comunidades de los municipios de Vetas y California se unieron y participaron en la toma de decisiones relacionada con la delimitación del Parque Natural de Santurbán. Proceso en el cual perdieron un porcentaje de terreno en el que la población no podrá realizar actividades socio económicas. Además, en cuanto las multinacionales que se fueron de la zona, estas dejaron socavones libres y con el desempleo tan elevado, los precios altos de los commodities, campesinos y mineros han tenido que ingresar sin permiso a estos socavones para buscar el sustento diario, señalados por la legislación

colombiana como minería ilegal. Los mineros de Vetas afirman que hacen todo de la mejor manera para no contaminar el ambiente donde viven, como se ha venido realizando esta labor durante muchos años. Los Vetanos no están de acuerdo con la presencia de las multinacionales, porque según ellos son estas las que contaminan y dejan todo el desastre cuando terminan el proceso de extracción (L. Contreras, 2015).

Algunos de los habitantes de California afirman que el daño en el ambiente ocasionado por la minería es irreversible, consecuencia de las grandes cantidades de mercurio usadas en el proceso, la tala indiscriminada de árboles para adecuación del terreno y la remoción de enormes cantidades de tierra; pero se sienten incapaces de poder mejorar esta situación, puesto que ya no son dueños de los predios y ahora dependen de las multinacionales.

Además, la comunidad ha descrito la aparición de enfermedades con mayor frecuencia y que según el centro de salud de la región ya son irreversibles. Adicionalmente, es común que los niños acompañen a sus padres a realizar el trabajo en la mina y en ocasiones ellos juegan con mercurio sin ningún tipo de protección, ocasionando afectaciones en la vista y el corazón. Desde los habitantes más viejos hasta los más jóvenes enuncian que son usuales ciertas enfermedades tales como sordera, ceguera, insomnio, pérdida de la memoria y otras más graves con daño renal o en los pulmones, siendo muy común la Neumoconiosis y el EPOC (Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica) (Álvarez, 2017).

Según el Centro de Salud del municipio de California, la minería que se realiza hace más de 150 años ha ocasionado que sus terrenos, aire, agua y animales estén contaminados y esta exposición está aumentando, y en el caso del mercurio, este elemento se bioacumula en el organismo y acelera la destrucción de las células. Cabe resaltar que sumado a esto los servicios

públicos y de salud son precarios y las condiciones de vivienda y educación son deficientes (Galindo, D. 2021).

En el caso del municipio de Vetas la situación es similar a la que se presenta en el municipio de California, se enseñan casos de mineros con problemas respiratorios del mismo tipo, adicionalmente, la comunidad reporta casos de menstruación irregular en las mujeres que trabajan en la zona, expuestas crónicamente a vapores de mercurio, así mismo, se evidenció un aumento en la proporción de mujeres con historia de abortos, riesgo condicional de fecundidad y aumento en el tiempo de gestación. Simultáneamente la población Vetana tiene malos hábitos de vida que afectan su salud, en los que se incluyen sustancias psicoactivas como alcohol y cigarrillo (Mahecha Laiton, 2018). Respecto al arsénico no es posible determinar el tipo de impacto causado por las actividades mineras en estas áreas y su influencia en los efectos ocasionados a la salud humana debido a que no se han realizado estudios en la comunidad (Sentencia T445 de 2016).

En el departamento de Santander, los municipios de Vetas y California son unas de las zonas más afectadas en Colombia por la contaminación de la minería relacionada con la extracción de oro y plata, debido a los ineficientes manejos de sustancias tóxicas utilizadas en procesos de hidrometalurgia, la desertización por la deforestación y pérdida del suelo fértil por los Drenajes Ácidos de Mina (DAM). Estos representan un riesgo para la biodiversidad que está definida en 457 especies de plantas vasculares, helechos y 293 especies de fauna vertebrada que habitan en estos municipios. (L. Ruiz, 2021).

La Sociedad Minera de Santander (MINESA) busca realizar proyectos de megaminería en los municipios de California, Suratá y Vetas del departamento de Santander. Esta empresa menciona que no utilizarán mercurio y cianuro en el proceso (G. Peña, 2020), pero esto no implica que el impacto ambiental disminuya, ya que de acuerdo con un análisis realizado por el Economista

Luis Álvaro Pardo al Estudio de Impacto Ambiental (EIA) presentado por la multinacional MINESA a la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), los impactos negativos de esta megaminería implica que volúmenes de aguas subterráneas entren en contacto con rocas sulfurizadas y se conviertan en aguas ácidas y además, la contaminación con elementos químicos tóxicos de los ríos que se encuentran en los municipios de California, Vetás y Surata, que podría darse por accidente o erosión. Cabe resaltar que la compañía identificó 32 tipos de impactos en las dimensiones abiótica, biótica y socioeconómica, de los cuales 26, es decir, el 81% son negativos (Peña, G. 2020).

## 11. Conclusiones

En el diagnóstico realizado se halló que los contaminantes en el proceso de extracción auroargentífero en la provincia de Soto Norte, Santander son los siguientes: cianuro, mercurio, cromo, plomo y arsénico, cuyos valores de concentración más altos registrados para agua se presentan a continuación respectivamente: 0,207 mgCN/L (2016), 163,3 µgHg/L (2021), en el caso del cromo no se encontraron estudios, 0,913 mgPb/L (2016), 0,523 mgAs/L (2013). Para el suelo son los siguientes: en cianuro no se encontraron datos, 7,8 µgHg/Kg (2016), 3,49 mgCr/Kg (2016), 78,11 mgPb/Kg (2016) y 484 mgAs/Kg (2013).

Con respecto a los valores encontrados en el análisis bibliográfico, acerca de los elementos contaminantes, se encontró que los puntos muestreados presentan elevados niveles de contaminación que incumplen con las normatividades ambientales de Colombia, Canadá y Estados Unidos, tal como se evidencia en el apéndice D, siendo el mercurio el de mayor afectación en los municipios de Vetás y California, debido a que es utilizado de forma indiscriminada en el proceso

de extracción de los minerales auroargentíferos, a pesar de considerarse una sustancia ilegal de acuerdo con la ley 1658 del 2013 de la República de Colombia.

De acuerdo al estudio realizado, no se encontró una metodología detallada para el tratamiento y la toma de muestras, sin embargo, se menciona que se usaron las técnicas Cold-Vapor y Generación de Hidruros en el equipo AAS para el mercurio, el cianuro se hizo por medio de AAS, en el caso del arsénico se realizó por medio de los equipos ICP-MS y INAA y la técnica de Generación de Hidruros en AAS, para el plomo y en el caso del cromo se utilizó la técnica de Generación de Hidruros en el equipo AAS. Los equipos empleados en el análisis de muestras se utilizaron teniendo en cuenta la normatividad establecida para su uso en el numeral 3111-b de la edición 23 del Standard Methods y los procesos de tratamiento de muestras estipulados por el IDEAM.

En los distritos mineros de Vetas y California, los contaminantes mercurio, cianuro, plomo y arsénico, viajan por las fuentes hídricas y se acumulan en sedimentos, que a su vez llegan a los animales y plantas que son consumidos por los habitantes de estos municipios, acarreando alteraciones en la salud, específicamente en el sistema nervioso, enfermedades respiratorias crónicas, agudas, y problemas de visión, entre otros que pueden variar en cada caso. Actualmente la contaminación cada vez se incrementa por la bioacumulación del Hg y As tanto en personas como en animales, y aunque no fue posible encontrar estudios de dominio público de las zonas de interés acerca de la concentración de estos contaminantes en la sangre, de acuerdo con los reportes de los centros de salud de los municipios de Vetas y California, y las enfermedades comunes mencionadas anteriormente, estos síntomas podrían ser debido a la bioacumulación de Hg.

### **Referencias bibliográficas**

Martínez, A., & Aguilar, T. Impacto socioeconómico de la minería en Colombia. Informe para el Sector de Minería a Gran Escala. Bogotá.: Fedesarrollo. 2012.

J. M. Royero, J. Clavijo. Mapa Geológico Generalizado Departamento de Santander. INGEOMINAS. 2001.

J.A. Bustamante. “Estudio electroquímico de la reducción de cianocomplejos de mercurio en acero inoxidable y grafito en efluentes de la minería aurífera”. Trabajo de grado. Santander. UIS, Bucaramanga, Colombia, 2012.

Martín-Duque, J. Conferencia: Restauración geomorfológica. Una solución eficiente para una verdadera restauración ecológica de espacios transformados por minería en Colombia. Obtenido de Universidad Complutense de Madrid e Instituto de Geociencias. 2016: <http://www.landformining.igeo.ucm-csic.es/en/node/102>

Alcaldía California-Santander. “POR CALIFORNIA AVANZA 2016-2019”. Presentación alternativa de delimitación del Páramo de Santurbán - Berlín. California, Santander. 2019.

*La minería de hecho en Colombia* (Defensoría delegada para los derechos colectivos y del ambiente ed., Vol. 1). (2010). [Libro electrónico]. Imprenta Nacional de Colombia, pp 17-19. Recuperado de: [https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4\\_uibd.nsf/F11B784C597AC0F005257A310058CA31/%24FILE/La-miner%C3%ADa-de-hecho-en-Colombia.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/F11B784C597AC0F005257A310058CA31/%24FILE/La-miner%C3%ADa-de-hecho-en-Colombia.pdf)

MINMINAS & UPTC. (2018). *plan voceros - realidades de la minería en Colombia* (Revisado ed., Vol. 1) [Libro electrónico]. R. García, A. Castillo, J. Manrique. P 3.

<https://repositoriobi.minenergia.gov.co/handle/123456789/2648>

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. (2017). *Mapas de depósitos, ocurrencias minerales y distritos mineros de Colombia grupo I, II, III, IV, V y VI*. sgc. P 5. Recuperado 14 de agosto de 2022, de

[https://recordcenter.sgc.gov.co/B23/552\\_18MapDepOcurrMinerDistMinColom/Documento/PDF/MemoriaGrup\\_Minerales.pdf](https://recordcenter.sgc.gov.co/B23/552_18MapDepOcurrMinerDistMinColom/Documento/PDF/MemoriaGrup_Minerales.pdf)

D. Galindo. (2021) *¿Un adiós o una bienvenida al desarrollo de la minería tradicional en California, Santander?* Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

J. A. Martínez, M. R. Casallas. (2018). Contaminación y remediación de suelos en Colombia: aplicación a la minería de oro. Descripción: 1a edición / Bogotá: Universidad EAN.

Corte Constitucional. (2016). Sentencia T445. Diagnóstico de la información ambiental y social respecto a la actividad minera y la extracción ilícita de minerales en el país. Bogotá.

A. Corrales. (2013). *Análisis y evaluación de la problemática socio ambiental ocasionada por el uso del mercurio en la minería aurífera artesanal en Colombia*. Universidad libre instituto de posgrados ingeniería.

CDMB. (2006). *Plan de ordenamiento y manejo de la micro cuenca rio vetas*.

M. Aramburo. (2012). *Problemática de los pasivos ambientales mineros en Colombia*. Universidad Católica de Oriente.

J. Jimenez, D. Palacio. (2016). *Determinación del contenido de metales pesados (cu, cr, hg, pb y zn) en sedimentos generados por la actividad minera en los distritos de vetas y califormia (Santander)*. Universidad Santo Tomás.

- Lominchar, M.A.; Sierra, M.J.; Rodríguez, J.; Millán, R. (2010, octubre). *Estudio del Comportamiento y Distribución del Mercurio Presente en Muestras de Suelo Recogidas en la Ribera del Río Valdeazogues*. CIEMAT.
- L. Sánchez M. J. Sierra R. Millán. (2013, febrero). *Aplicabilidad de Técnicas de Volatilización Controlada de Mercurio en el Cerco Minero de Almadenejos*. CIEMAT.
- Fernández, N. (2019). Exposición a mercurio de las personas que trabajan en la minería artesanal de oro, Costa Rica, 2015-2016. *Población y Salud en Mesoamérica*, 17(1).  
doi:10.15517/psm.v17i1.37789
- O.M.S. (2017, 31 marzo). *El mercurio y la salud*. <https://www.who.int/es>. Recuperado 14 de agosto de 2022, de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health#:~:text=El%20mercurio%20elemental%20y%20el,con%20consecuencias%20a%20veces%20fatales>.
- Ministerio de la protección social, ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (Ed.). (2007). *Resolución número 2115*. República de Colombia.
- MINSALUD. (2018). “*Evaluación del grado de contaminación por mercurio y otras sustancias tóxicas, y su afectación en la salud humana en las poblaciones de la cuenca del río Atrato, como consecuencia de las actividades de minería*”. Bogotá.
- MINMINAS, UPME. (2014). *Estudio de la cadena del mercurio en Colombia con énfasis en la actividad minera de oro* (1.ª ed., Vol. 3) [Libro electrónico]. Universidad de Córdoba.  
[http://www.upme.gov.co/SeccionMineria\\_sp/cadena\\_de\\_mercurio/Cadena\\_Mercurio\\_Tomo\\_II.pdf](http://www.upme.gov.co/SeccionMineria_sp/cadena_de_mercurio/Cadena_Mercurio_Tomo_II.pdf)

C. Suarez-Authievre. (2015). *Modelación y simulación del proceso de lixiviación de mineral de Au, ocupando el método(a) de cianuración y método (b) de tiourea. Comparación técnica – económica entre ambos métodos considerando la influencia de la fuerza iónica del sistema y especies acuosas expectantes en la dinámica de lixiviación.* UTMACH.

R. Álvarez. (2005). *Aplicación de sistemas pasivos para el tratamiento de soluciones residuales de procesos de cianuración en minería de oro.* Universidad de Oviedo. Departamento de explotación y prospección de minas.

INIGEMM CIANURACIÓN. (2013, 15 diciembre). [Vídeo]. YouTube.

<https://www.youtube.com/watch?v=o8EEoJuVU9Q>

F. Nava. (2018). *Retos actuales en la extracción de metales preciosos en México.* Centro de investigación y de estudios avanzados del instituto politécnico nacional.

UPME. (2018). *Realizar un análisis del potencial de reutilización de minerales en Colombia y definir estrategias orientadas a fomentar su aprovechamiento por parte de la industria en el país bajo el enfoque de economía circular contrato interadministrativo ci-049-2018.* Universidad industrial de Santander. Unidad de planeación minero-energética.

***¿Cómo PRECIPITAR ORO con POLVO DE ZINC?. Proceso de precipitación con polvo de zinc.*** (2021, 22 marzo). [Vídeo]. YouTube.

<https://www.youtube.com/watch?v=0Au4nJRW0hc>

*Cementación de oro.* (2021, 5 enero). [Vídeo]. YouTube.

<https://www.youtube.com/watch?v=ZOHx93bhFZ0>

*Separación de oro y plata de amalgama extraída de prueba minera encontrada con detector.*

(2018, 14 junio). [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=hQHw4Zgs6kY>

- E. Carreño. (2001). *Proyecto río Surata: líneas de acción para reducir contaminación proveniente de la pequeña minería aurífera en Vetas y California (Departamento de Santander, Colombia)*. Cooperación técnica colombo-alemana.
- V. Rojas. (2003). *Modelo de la pre-aireación en concentrados de oro piritico para la optimización del proceso de cianuración*. Universidad nacional mayor de San Marcos. Lima, Perú.
- MINAMBIENTE. (2022, 26 enero). *Ley 1658 de 2013*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado de: <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/ley-1658-de-2013/#:~:text=Por%20medio%20de%20esta%20ley,para%20su%20reducci%C3%B3n%20y%20eliminaci%C3%B3n>
- Vanguardia, R. (2022, junio). *Defensoría solicitó acciones para reducir niveles de mercurio en el río Surata, en Santander*. [www.vanguardia.com](http://www.vanguardia.com). Recuperado de: <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/defensoria-solicito-acciones-para-reducir-niveles-de-mercurio-en-el-rio-surata-en-santander-YC5271818>
- X. Martínez. (2004). *El mercurio como contaminante global Desarrollo de metodologías para su determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente*. Universitat autònoma de Barcelona.
- M. Vera. (2016). “*Experimentación para la destrucción de cianuro en pulpa y solución de lavado del espesador de relave minera inmaculada*”. Universidad nacional de San Agustín”. Perú.

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). 2006. Reseña Toxicológica de Cianuro (versión actualizada) (en inglés). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública.
- MINMINAS. (2017). *Normatividad general para el control a la explotación ilícita de minerales*. Ministerio de minas y energía. Bogotá.
- Alonso, D. (2014). *Determinación de arsénico total y biodisponible en la zona sur-occidental del distrito minero de oro California- Vetas en el Departamento de Santander, Colombia*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C., Colombia.
- Esteve, T. (2021, 27 enero). *Estos 10 productos químicos son preocupantes para la salud pública, según la OMS*. 65 y más - El diario de las personas mayores. Recuperado de: [https://www.65ymas.com/salud/productos-quimicos-preocupantes-salud-oms\\_23664\\_102.html](https://www.65ymas.com/salud/productos-quimicos-preocupantes-salud-oms_23664_102.html)
- Intoxicación por plomo*. (2021, 11 octubre). OMS. Recuperado de: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>
- García-Chevesich, P. A., Jones, S. L., Daniels, J. M., Valdés-Pineda, R., Venegas-Quiñones, H., Pizarro, R. 2018. Legislative framework for sediment management in the United States. *Ingeniería del agua*, 22(2), 53-67. <https://doi.org/10.4995/Ia.2018.7916>
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (ATSDR). 2012. Reseña Toxicológica del Cromo (en inglés). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública.
- J. Ayala. (2018). *Diseño de optimización de un sistema de tratamiento y manejo de vertimientos de la planta de beneficio aurífero en la empresa trompetero, Vetas- Santander*. UNAD. Bucaramanga, Colombia.

- Gutiérrez, J. C. (2022, julio). *Los datos “no públicos” de la contaminación con mercurio en el Páramo de Santurbán*. [www.vanguardia.com](http://www.vanguardia.com). Tomado de:  
<https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/los-datos-no-publicos-de-la-contaminacion-con-mercurio-en-el-paramo-de-santurban-AM5493453>
- L. Pérez. (2019). *Actualización del manual de operación y estudio del comportamiento del sistema de filtrado de la ptap la flora del acueducto metropolitano de Bucaramanga*. Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga, Santander.
- IDEAM. (2018). *Índice de Calidad del Agua en corrientes superficiales (ICA)*. Tomado de:  
<http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/agua>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2020). Hoja metodológica del Promedio de Sólidos Suspendedos Totales (PSST) (Versión 1,1). 7 p.
- APHA, AWWA & WEF. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23RD Edition*. Washington, DC: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Lozano, R. (Ed.). (2019). *Presentación alternativa de delimitación del Páramo de Santurbán - Berlín*. Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- L. Contreras. (2015). *Presentación alternativa de delimitación del Páramo de Santurbán - Berlín*. Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C.
- A. Álvarez. (2017). *Memoria de las prácticas mineras en el municipio de California para fortalecer la educación ambiental*. Universidad Santo Tomás. Bucaramanga, Santander.
- D. Galindo. (2021) *¿Un adiós o una bienvenida al desarrollo de la minería tradicional en California, Santander?* universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

- Mahecha Laiton, Y. A., Púa Olivo, A. M., & Ortiz Ruiz, F. E. (2018). Minería, medio ambiente y desarrollo. Efectos socio ambientales de la delimitación del Páramo de Santurbán en los municipios de Vetas y California, durante el periodo de 2006-2016. Retrieved from [https://ciencia.lasalle.edu.co/negocios\\_relaciones/85](https://ciencia.lasalle.edu.co/negocios_relaciones/85)
- L. Ruiz. (2021). *Efectos de los metales pesados asociados al proceso de extracción y obtención de oro en la calidad de los cuerpos de agua subterráneos en el páramo de Santurbán reportados en la literatura*. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C., Colombia.
- L. Guiza, J. Aristizabal. (2013) “Mercury and gold mining in Colombia: a failed state”. *Universitas scientiarum*, vol 18.
- G. Peña. (2020). La megaminería en el páramo de Santurbán. *Encuentros, ciudad, medio ambiente y territorio*, 1, 17–20. Tomado de: <https://www.indepaz.org.co/wp-content/uploads/2020/04/Revista-Encuentros.-Abril-del-2020.pdf>
- Torres Gutierrez, J. I., Pinzón Salcedo, M., Esquivia Zapata, M., Parra Pizarro, A., & Espitia Jimenez, E. H. (2012). La explotación ilícita de recursos minerales en Colombia, Casos Valle del Cauca (Río Dagua) – Chocó (Río San Juan), Efectos Sociales y Ambientales. Bogotá: Contraloría General de la República-Contraloría delegada Sector Minas y Energía.
- Fierro, J. (2020). Políticas mineras en Colombia. Bogotá: Instituto Latinoamericano para una Sociedad y un Derecho Alternativos – ILSA.
- Universidad de La Guajira. Impactos ambientales de la minería en Colombia. 2011. Obtenido de Universidad de La Guajira: <http://repositorio.ucm.edu.co>

- Cordy P, Veiga MM, Salih I, Al-Saadi S, Console S, Garcia O, et al. Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita mercury pollution. *Sci Total Environ*. 2011b; 1:410-1.
- OMS. (2013) Efectos de la exposición al mercurio en la salud de las personas que viven en comunidades donde se practica la minería aurífera artesanal y en pequeña escala [Internet]. Disponible en:  
[http://www.who.int/ipcs/assessment/public\\_health/mercury\\_asgm\\_es.pdf](http://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/mercury_asgm_es.pdf)
- Ministerio de salud y protección social. (2018). “evaluación del grado de contaminación por mercurio y otras sustancias tóxicas, y su afectación en la salud humana en las poblaciones de la cuenca del río Atrato, como consecuencia de las actividades de minería”. Bogotá, Colombia.
- Corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga – CDMB. (2000). Registros suministrados en forma magnética por personal del Grupo de Vertimientos, Coordinación de Seguimiento y Monitoreo, Subdirección de Normalización y Calidad Ambiental.
- MEDMIN. Programa: Manejo Integrado del Medio Ambiente en la Pequeña Minería. Equipos y Métodos para la Recuperación de Oro. Guías Técnicas.
- M. Lopez Bravo, J. Santos cesar, A. Quesada, M. segura Osorio, J. Perez Rodríguez. “Actividad minera y su impacto en la salud humana”. *Ciencia UNEIM*, vol 9, no 17. Enero Abril del 2006.
- Yokel, RA, 2006. The Speciation of Metals in Mammals Influences their Toxicokinetics and Toxicodynamics and Therefore Human Health Risk Assessment, *Journal of Toxicology and Environmental Health-Part B-Critical Reviews*, 9(1), 63-85.

- Ministerio de Minas y Energía. (2000). *Minerales Estratégicos para el Desarrollo de Colombia*. MEDC, Bogotá.
- Rodríguez, C. (2018). Evaluación de la calidad del agua del Río Vetas relacionada con la minería aurífera practicada en la provincia de Soto en Santander. Recuperado de <http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/3413/documento%20maestria%20%20FINAL%2018%20MAYO%20%282%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ayala, J. (2018). Diseño de optimización de un sistema de tratamiento y manejo de vertimientos de la planta de beneficio aurífero en la empresa trompetero, Vetas-Santander. UNAD. Obtenido de <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/24458>
- Bernal, C. (2013). Evaluación del contenido de mercurio total en aguas, suelos y sedimentos del río Surata, utilizando un sistema para análisis directo de mercurio. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ciencias. Bucaramanga. Recuperado de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2013/150762.pdf>
- Morales, E. (2018). Determinación del contenido de metales pesados en suelos colindantes a un drenaje ácido de mina en el municipio de California, Santander, Colombia. Universidad Santo Tomás. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/13009>

## Apéndices

### Apéndice A. Coordenadas de los puntos de referencia para el estudio 1.

Las coordenadas de estos puntos de monitoreo se muestran a continuación.

Punto	Municipio	Coordenadas Geográficas	Altura (msnm)
1	Vetas, vereda el Borrero	N: 1132043, E: 1301051	2930

2	Vetas, vereda Mongora	N: 1125554, E: 1304488	2185
3	California, vereda Angosturas	N: 1124984, E: 1304186	1876

### Apéndice B. Coordenadas de las muestras para el estudio 6.

Nombre de la muestra	Coordenadas planas	Nombre de la muestra	Coordenadas planas
A1	X:1'132.888, Y:1'301.386, Z: 3065	A6	X:1'121.300, Y:1'305.637, Z: 1749
S1	X:1'132.660, Y:1'301.289, Z: 3013	S4	X:1'121.300, Y:1'305.637, Z: 1749
A2	X:1'132.554, Y:1'301.296, Z: 3010	A7	X:1'116.913, Y:1'302.080, Z: 1505
S2	X:1'132.554, Y:1'301.296, Z: 3010	S5	X:1'116.913, Y:1'302.080, Z: 1505
A3	X:1'125.940, Y:1'304.425, Z: 2301	A8	X:1'115.769, Y:1'296.449, Z: 1489
S3	X:1'125.940, Y:1'304.425, Z: 2301	S6	X:1'115.769, Y:1'296.449, Z: 1489
A5	X:1'126.120, Y:1'305.105, Z: 2359	A9	X:1'110.696, Y:1'286.199, Z: 1142
L2	X:1'127.864, Y:1'306.496, Z: 2398	S7	X:1'110.696, Y:1'286.199, Z: 1142
A4	X:1'128.082, Y:1'306.701, Z: 2424	A10	X:1'122.629, Y:1'296.770, Z: 2016
L1	X:1'128.084, Y:1'306.695, Z: 2423	S8	X:1'122.629, Y:1'296.770, Z: 2016
		A11	X:1'130.688, Y:1'298.644, Z: 3627

### Apéndice C. Calidad del agua según clasificación ICA.

Para el cálculo de cada variable el IDEAM tiene un proceso específico para cada una de ellas, la clasificación de la calidad del agua según los valores que tome el ICA.

Descriptor	Símbolo	Rango	Color
Bueno	Círculo	0,91-1,00	azul
Aceptable	Triángulo	0,71-0,90	verde
Regular	Cuadrado	0,51-0,70	amarillo
Malo	Pentágono	0,26-0,50	naranja
Muy malo	Hexágono	0-0,25	rojo

**Apéndice D.** Cumplimiento en las normatividades ambientales vigentes de los valores más altos consultados para las concentraciones.

Sustancia	Cumplimiento de la norma	
	Agua	Suelo

	Resolución 2115 del 2007	Resolución 0631 de 2015	Legislación Canadiense	Estándares de EE.UU
Cianuro	No	Si	-	-
Mercurio	No	No	No	No
Cromo	-	-	Si	Si
Plomo	No	No	No	Si
Arsénico	No	Si	No	No