



Concepto técnico geocientífico, soporte para la declaratoria de la
reserva temporal en Soto Norte, Santander

Bogotá, agosto de 2024



Servicio Geológico Colombiano

Julio Fierro Morales

Director general

Juanita Sierra Salamanca

Directora Técnica de Recursos Minerales

Juan Manuel Herrera

Director Técnico de Geociencias Básicas

Hernando Alberto Camargo García

Director Técnico de Asuntos Nucleares

Angélica María Candela Soto

Director Técnico de Laboratorios

John Makario Londoño

Director Técnico de Geoamenazas

Alberto García Bolívar

Director Técnico de Gestión de la Información

Grupos de trabajo

Grupo de Trabajo de Aguas Subterráneas

Grupo de Trabajo de Evaluación de Amenaza y Riesgo Geológico

Grupo de Trabajo de Geoquímica Ambiental y Geología Médica

Grupo de Trabajo de Geoquímica y Geofísica Aplicadas

Grupo de trabajo de Potencial de Minerales e Investigación en Metalogenia

Grupo de Trabajo de Geometalurgia y Geoambiente

Grupo de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares y Geocronológicas

Contenido

1. Contexto	1
2. Escalas de la actividad minera	2
3. Generalidades geoambientales	6
4. Generalidades del sistema mineral	10
5. Generalidades hidrogeológicas	13
6. Contexto de la minería a gran escala en la RTS	20
7. Contexto de la minería a pequeña escala en la RTS	21
8. Impactos y riesgos geoquímicos en el ambiente	23
9. Impactos y riesgos geoquímicos en la salud	41
10. Impactos y riesgos físicos en el ambiente	48
11. Conclusiones y recomendaciones	70
12. Anexos	75
13. Referencias	76

1. Contexto

En función del ordenamiento alrededor del agua y con los objetivos de preservar y garantizar los servicios ecosistémicos, el desarrollo sostenible de la región y el abastecimiento de agua con la calidad adecuada para Bucaramanga, área metropolitana y municipios de California, Vetás, Suratá y Matanza, se identifica la necesidad de proteger la cuenca del río Suratá y parte alta de la cuenca del río Cachirí (**Figura 1**), dadas las tensiones por la calidad del agua y el subsecuente conflicto socioambiental que se presenta en la región.

El conflicto socioambiental en dicha área está definido principalmente por:

1. La presencia de actividades mineras ancestrales, artesanales y de pequeña a mediana escala en los municipios de California, Vetás y Suratá que representan la fuente económica de la población de esta región.
2. El interés y desarrollo de infraestructura y actividades de exploración de parte de empresas mineras multinacionales.
3. La llegada de numerosos mineros ilegales que aprovechan y extienden los túneles construidos y dejados por empresas mineras multinacionales.
4. El uso de mercurio y cianuro en procesos de beneficio de oro.
5. El carácter de cuenca abastecedora que representa el río Suratá para las poblaciones de Bucaramanga y áreas metropolitanas.

El presente concepto técnico tiene como propósito documentar, con base en información existente -propia del Servicio Geológico Colombiano o secundaria, analizada con fundamentos geocientíficos- los impactos mencionados, en función de la escala de desarrollo minero (pequeña, mediana o grande), desde las siguientes tres perspectivas:

1. Impactos geoquímicos en el ambiente.
2. Impactos geoquímicos en la salud.
3. Impactos físicos en el ambiente, que incluyen la alteración de la oferta y disponibilidad de agua e inestabilidad geotécnica.

La protección de la zona definida por la **Figura 1**, se pretende llevar a cabo en el marco de la Sentencia del Consejo de Estado del 4 de agosto de 2022 (AP. 2013-02459-01), del Decreto 044 del 30 de enero de 2024, y del principio de colaboración armónica con las entidades ambientales y del sector minero energético, para adelantar los estudios técnicos que provean soporte a tal fin.

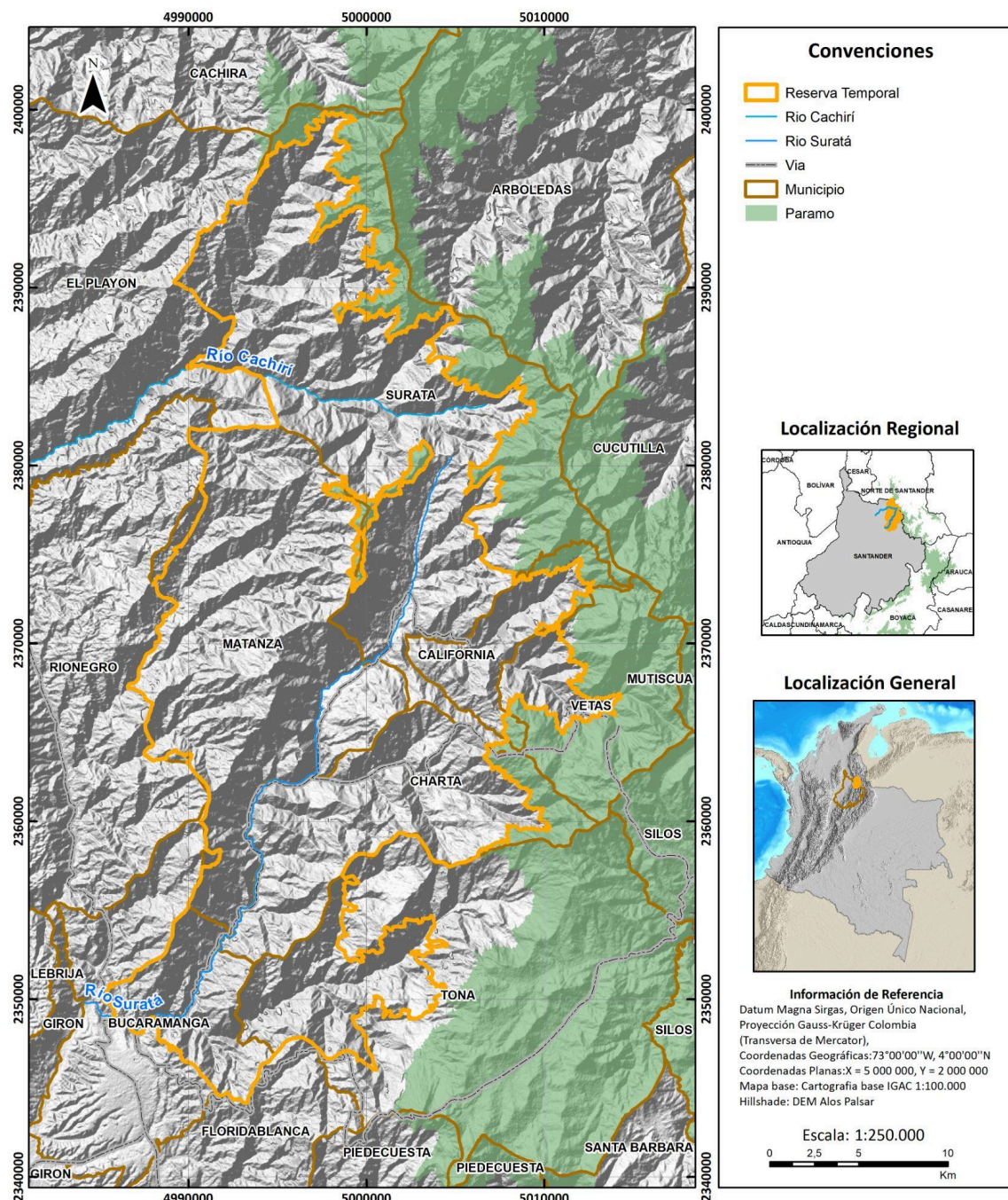


Figura 1: El área propuesta para la reserva temporal se encuentra sobre el Macizo de Santander, en las estribaciones de la cordillera Oriental, incluyendo una porción significativa de la cuenca alta de los ríos Lebrija y Cáchira.

2. Escalas de la actividad minera

El Código de Minas expedido mediante Decreto 2655 de 1988 definió la pequeña, mediana y gran minería utilizando como criterio el volumen o tonelaje de material extraído (incluyendo aquel que no constituye el mineral de interés) durante un determinado periodo de tiempo. Esto,

según la misma normativa, porque del volumen extraído dependen múltiples aspectos de orden técnico, económico, ambiental y social relacionados con la explotación minera.

Por otra parte, la Ley 99 de 1993 introdujo la licencia ambiental como un instrumento para la prevención, mitigación, corrección, compensación y manejo de los impactos de los proyectos, obras o actividades que puedan producir deterioro grave a los recursos naturales renovables o al medio ambiente, o introducir modificaciones considerables o notorias al paisaje.

En ese momento, para definir la competencia de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA y de las Corporaciones Autónomas Regionales (CARs) sobre la expedición de licencias para proyectos mineros, se utilizó la categorización del Decreto 2655 de 1988. Así, en la Ley 99 de 1993 y el Decreto 1753 de 1994 se otorgó competencia al Ministerio de Medio Ambiente (que hoy corresponde a la ANLA) sobre la gran minería, mientras que a las corporaciones les fue asignada la competencia sobre la pequeña y mediana escala. Si bien en ese momento existió una correspondencia general entre la normativa minera y la normativa ambiental, la categorización de pequeña, mediana y gran minería no necesariamente está determinada por criterios ambientales.

A partir del Decreto 1728 de 2002 y en las modificaciones subsiguientes que dieron lugar al Decreto 2042 de 2014, compilado en el Decreto 1076 de 2015, las competencias otorgadas a la ANLA y a las CARs para conceder licencias para proyectos mineros, a pesar de estar sustentadas en criterios de volumen o tonelaje, difieren significativamente en rangos e, incluso, en su conceptualización respecto a las categorías de pequeña, mediana y gran minería del Decreto 2655 de 1988. Esto es un elemento adicional para afirmar que esta categorización no necesariamente responde a criterios ambientales.

A continuación se cita el articulado pertinente del Decreto Número 1076 de 2015:

“ARTÍCULO 2.2.2.3.2.2. Competencia de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). La Autoridad Nacional de Licencias Ambientales -ANLA- otorgará o negará de manera privativa la licencia ambiental para los siguientes proyectos, obras o actividades:

(...)

c) Minerales metálicos y piedras preciosas y semipreciosas: Cuando la remoción total de material útil y estéril proyectada sea mayor o igual a dos millones (2.000.000) de toneladas/año;

(...)

ARTÍCULO 2.2.2.3.2.3. Competencia de las Corporaciones Autónomas Regionales. Las Corporaciones Autónomas Regionales, las de Desarrollo Sostenible, los Grandes Centros Urbanos y las autoridades ambientales creadas mediante la Ley 768 de 2002,

otorgarán o negarán la licencia ambiental para los siguientes proyectos, obras o actividades, que se ejecuten en el área de su jurisdicción.

(...)

c) Minerales metálicos, piedras preciosas y semipreciosas: Cuando la remoción total de material útil y estéril proyectada sea menor a dos millones (2.000.000) de toneladas/año;

(...)”

Finalmente, mediante el Decreto 1666 de 2016 se introduce una nueva clasificación para la minería. A pesar de que ésta no contempla de manera explícita criterios ambientales, se destaca que mediante el artículo 326 de la Ley 1955 de 2019, se establecieron criterios diferenciales para la minería de pequeña escala y se dispuso la elaboración de términos de referencia específicos para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental (EIA), que fueron expedidos por el Ministerio de Ambiente por medio de las resoluciones 0447 y 0448 de 2020.

A continuación se cita articulado pertinente para la definición de escalas en la minería del Decreto Número 1666 de 2016:

“ARTÍCULO 2.2.5.1.5.4. Clasificación de la minería en pequeña, mediana y gran escala en etapa de exploración, o construcción y montaje: Los títulos mineros que se encuentren en la etapa de exploración o construcción y montaje se clasificarán en pequeña, mediana y gran minería con base en el número de hectáreas otorgadas en el respectivo título minero, acorde con la tabla siguiente:

Clasificación	Nº de hectáreas
Pequeña	Menor o igual a 150
Mediana	Mayor a 150 pero menor o igual a 5.000
Grande	Mayor a 5.000 pero menor o igual a 10.000

ARTÍCULO 2.2.5.1.5.5. Clasificación de la Minería a pequeña, mediana y gran escala en etapa de explotación: Los títulos mineros que se encuentren en la etapa de explotación, con base en lo aprobado en el respectivo Plan de Trabajo y Obras o en el documento técnico que haga sus veces, se clasificarán en pequeña, mediana o gran minería de acuerdo con el volumen de la producción minera máxima anual, para los

siguientes grupos de minerales: carbón, materiales de construcción, metálicos, no metálicos, metales preciosos, piedras preciosas y semipreciosas, como se muestra a continuación:

Mineral	Pequeña		Mediana		Gran	
	Subterránea	Cielo Abierto	Subterránea	Cielo Abierto	Subterránea	Cielo Abierto
Metales Preciosos (oro, plata y platino) (Ton/año) o (M3/año)	Hasta 15.000 Ton/año	Hasta 250.000 m3/año	> 15.000 hasta 300.000 Ton/año	> 250.000 hasta 1.300.000 m3/año	> 300.000 Ton/año	> 1.300.000 m3/año

(...)"

A partir de lo anterior, lo que se pretende establecer es que la clasificación – en términos de escala – para la minería, no necesariamente sigue un criterio ambiental o se refleja en impactos diferenciados sobre el medio ambiente. Esto, porque los impactos no dependen solo del volumen de extracción de un determinado proyecto, sino de múltiples factores como el tipo de explotación, las características del yacimiento o, incluso, la vulnerabilidad particular de un territorio en términos ambientales, sociales y económicos.

Con esto, no se pretende desconocer que el volumen de extracción de un proyecto minero es un factor fundamental para establecer la magnitud de los potenciales impactos ambientales, sino que la atribución de impactos particulares a la pequeña, mediana o gran minería presenta una alta complejidad. En la elaboración de este documento, se consideró que los fenómenos relacionados con los principales impactos de la minería se presentan en todas las escalas de explotación, pero de forma general su magnitud se incrementa desde la pequeña hasta la gran minería (en algunos casos de forma muy significativa). Por esta razón, los impactos se describen de forma genérica y se contextualizan en términos de su posible magnitud según la escala. Así mismo, se debe resaltar que este concepto no representa una revisión extensa de todos los impactos posibles de la minería de metálicos, pero sí de aquellos que pueden tener una mayor relevancia.

3. Generalidades geoambientales

El área propuesta para la reserva temporal hace parte del Macizo de Santander, limitado por la Falla de Bucaramanga al occidente. A nivel estructural, en este bloque levantado de la Falla de Bucaramanga se desarrollan una serie de fallas longitudinales de carácter principalmente inverso y fallas transversales de dirección NE-SW y NW-SE, dextrales y sinestrales respectivamente, dispuestas de manera oblicua con respecto a la Falla de Bucaramanga, conformando sistemas que se encuentran conectados entre sí (**Figura 2**).

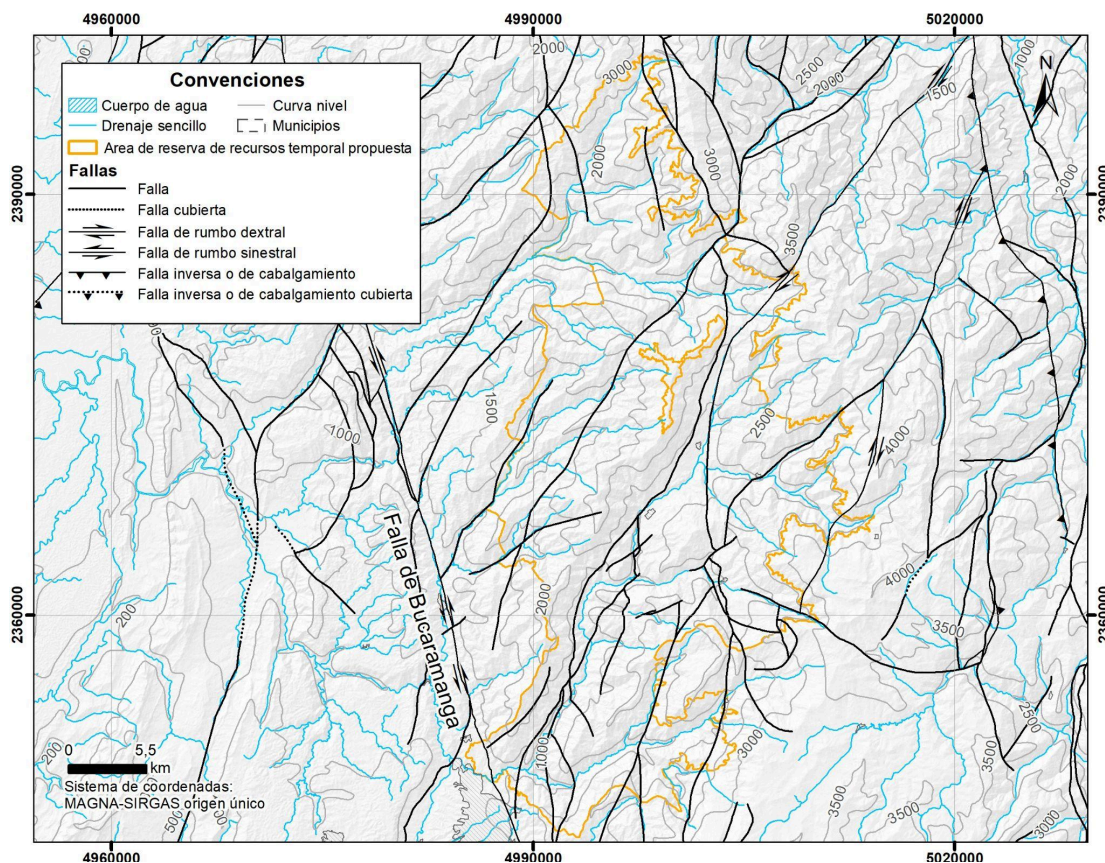


Figura 2. Esquema estructural del área de la reserva temporal de Santurbán. Nótese la conexión de las fallas oblicuas con la falla de Bucaramanga. Fuente: Elaboración propia con información de Gómez y Montes (2020).

El área comprende elevaciones entre los 1000 y 3000 m.s.n.m., aproximadamente. Allí, los procesos tectónicos y denudativos son dominantes para la configuración del relieve (Ulloa & Gómez, 2007). De acuerdo con la zonificación morfodinámica propuesta por Osorio et al. (2008), en el área de la reserva temporal se pueden distinguir al menos dos zonas con características geomorfológicas particulares. La primera, adyacente a la Falla de Bucaramanga, que precisamente corresponde a las diversas expresiones geomorfológicas de este rasgo. Existe allí un relieve abrupto, con laderas rectas y empinadas, drenajes profundos, valles en forma de “V” y cuchillas agudas. Las unidades geológicas que conforman este relieve son principalmente el Neis de Bucaramanga, la Formación Silgará y el Grupo Plutónico de

Santander. En la segunda, hacia el oriente de esta zona, se presentan estructuras con dirección NNW - SSE correspondientes a la parte alta o eje de la cordillera. De acuerdo con Osorio et al. (2008) se identifican allí superficies peniplanizadas hacia la parte axial de la cordillera, relieves abruptos con buen desarrollo de la red de drenaje, valles en forma de “V” producto de la incisión, laderas rectas y empinadas, cuchillas redondeadas y agudas. Además, se identifican procesos de sedimentación en las zonas bajas y erosión activa en las partes montañosas. En este sector, las unidades geológicas representativas presentan una mayor variedad.

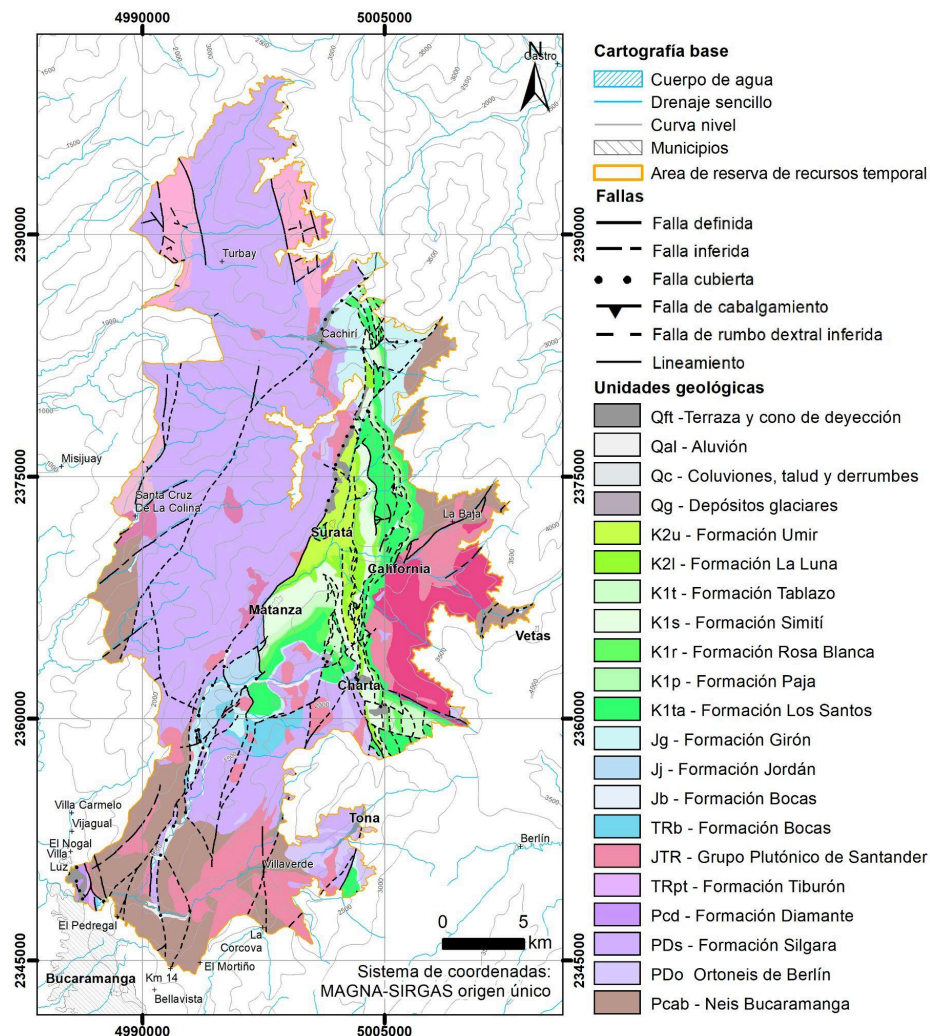


Figura 3. Mapa geológico del área propuesta para la reserva temporal a escala 1:100000. Fuente: Elaboración propia. Tomado y adaptado de Ward et al. (1977a y b), Vargas y Arias (1981) y Fúquen et al. (2010).

Las rocas cristalinas más antiguas, ígneas y metamórficas, corresponden a las unidades Neis de Bucaramanga, Ortoneis de Berlín y Formación Silgará, correspondientes al Paleozoico. Estas unidades, junto al Grupo Plutónico de Santander, que data de los períodos Triásico y Jurásico (~210 a 196 Ma, aproximadamente) (Goldsmith et al., 1971; Polania, 1980; Dorr et al., 1995; Mantilla et al., 2013), constituyen aproximadamente el 62 % del área de la reserva temporal (Figura 3). Adicionalmente, se encuentran cuerpos porfíricos más recientes (Mioceno –

Plioceno) cuya extensión es menor y tienen relación con la mineralización del distrito minero Vetás - California (Rodríguez, 2014; Rodríguez et al., 2017); dichos cuerpos no se evidencian en la cartografía de la **Figura 3** por cuestiones de escala.

El restante 38 % está conformado por rocas volcanosedimentarias y sedimentarias que abarcan un rango temporal desde el Paleozoico hasta el Cretácico tardío, cuyas unidades geológicas de más antigua a más reciente son: Formación Diamante, Tiburón, Bocas, Jordán, Girón, Los Santos, Rosa Blanca, La Paja, Tablazo, Simití, La Luna y Umir. Finalmente, se encuentran depósitos sedimentarios recientes que corresponden a aluviales y en menor proporción a depósitos coluviales y glaciares.

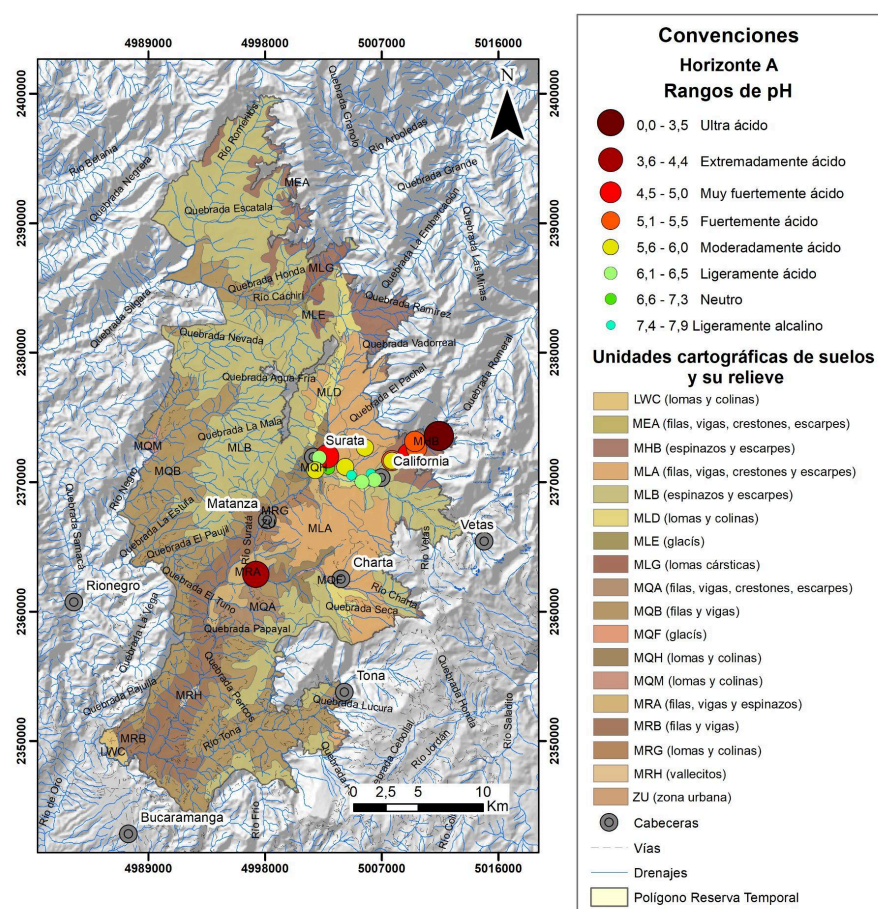


Figura 4. Valores de pH en suelo, para el horizonte A, en algunos sectores de la Reserva Temporal Santurbán. Fuente; modificado IGAC, 2003; Minesa, 2020; Sierra et al., 2023

La morfología del paisaje, los sustratos de roca y sedimento, el clima frío y húmedo y la vegetación condicionan las propiedades de los suelos en la RTS, de los cuáles el pH es una de las propiedades más importantes, ya que afecta la capacidad de adsorción de los minerales y materia orgánica, la biota y la estabilidad de los agregados que lo componen (Neina 2019). Según el valor del pH el suelo se puede clasificar como ácido, neutro o básico (Zapata, 2006).

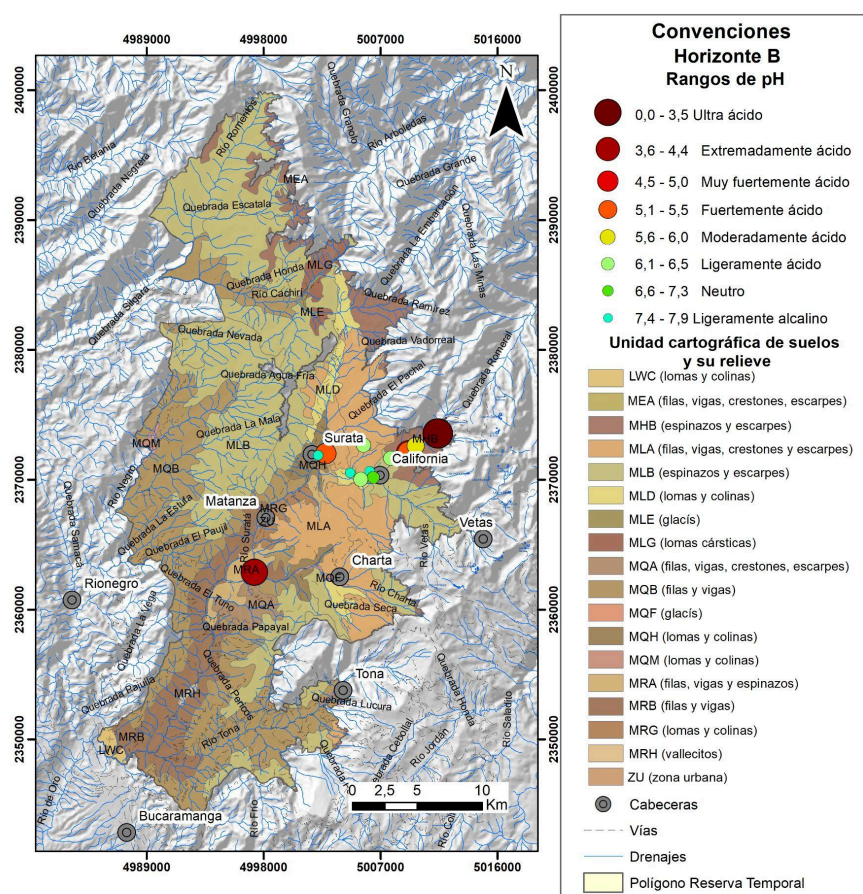


Figura 5. Valores de pH en suelo, para el horizonte B, en algunos sectores de la Reserva Temporal Santurbán.
Fuente: modificado IGAC, 2003; Minesa, 2020; Sierra et al., 2023

El pH de los horizontes A, B y C en la zona de interés ha sido estudiado por el IGAC (2003), Minesa (2020) y el SGC (Sierra et al., 2023). En la **Figura 4**, se observan los valores puntuales medidos para el horizonte órgano-mineral A. El más ácido de todos (pH 2,3), en suelos desarrollados sobre materiales graníticos que muestran una tendencia ultra ácida en la microcuenca de la Quebrada Angosturas. Esta tendencia de extremadamente ácida a fuertemente ácida se mantiene a lo largo de la microcuenca (pH entre 4,9 y 5,3) y en la vereda Guamal (municipio Matanza), donde confluyen los ríos Suratá y Charta (pH de 4,3). Aguas abajo en la cuenca del río Vetás, a la altura de la vereda San Francisco, se muestran valores que tienden a la neutralidad, con pH que varían desde moderadamente ácidos (5,8) hasta moderadamente alcalinos (8,0). Las fuentes probables, responsables de la acidez en este horizonte en los rangos de mayor acidez puede estar asociada al aluminio intercambiable, puesto que cuando el pH llega a 5.2 se produce la reacción de precipitación de $Al(OH)_3$, o también puede asociarse a los grupos ácidos de la materia orgánica con mayor grado de humificación o a la hidrólisis que sufre el CO_2 produciendo HCO_3^- .

Los horizontes B, formados a partir de procesos de acumulación o pérdida de elementos, exhiben una tendencia ligeramente menos ácida que en el horizonte A (**Figura 5**). Estos horizontes son relevantes para los flujos hídricos locales y la calidad del agua. Los horizontes C tienen una continuidad lateral mayor que los B, y por tanto influyen los procesos hídricos en mayor extensión. Para estos, se puede evidenciar que la tendencia es particularmente diferente, con una disminución considerable de la acidez (**Figura 6**). Los valores promedio de pH se encuentran entre 5,3 y 7,3. El valor más ácido corresponde al mismo punto anómalo de la vereda Guamal. De las fuentes probables responsables de la acidez en los suelos, el principal agente portador de acidez corresponde a la roca fuente, rica en minerales con porcentajes considerables de sulfuros.

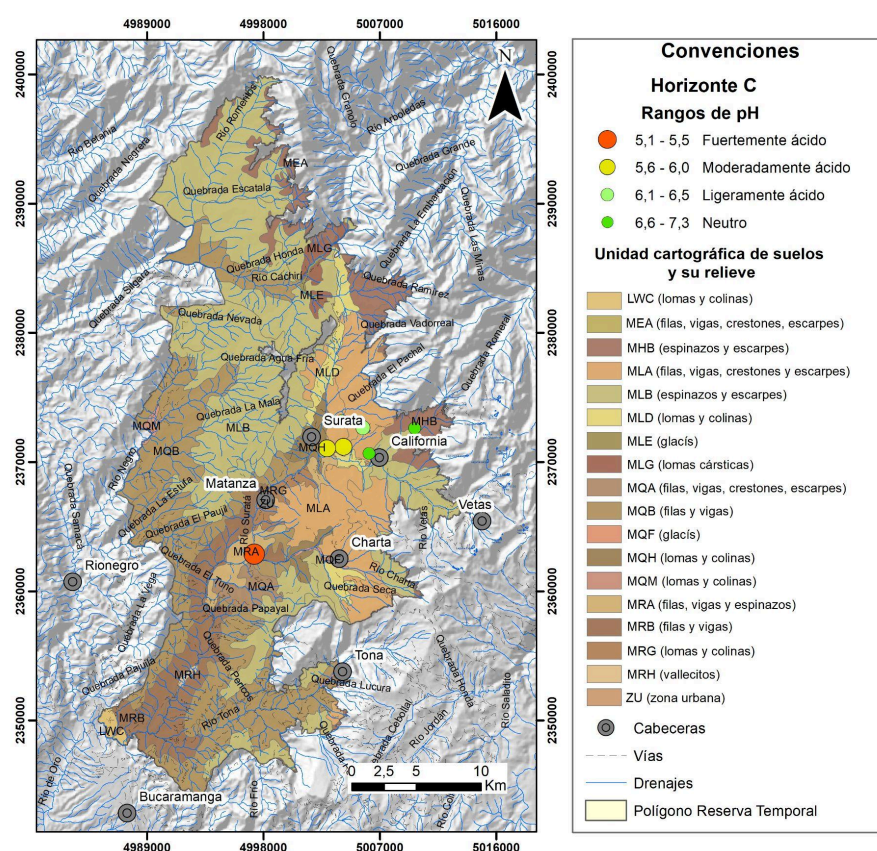


Figura 6. Valores de pH en suelo, para el horizonte C, en algunos sectores de la Reserva Temporal Santurbán. Fuente: modificado IGAC, 2003; Minesa, 2020; Sierra et al., 2023

4. Generalidades del sistema mineral

En el Distrito Minero de Vetás-California (DMVC) se encuentran mineralizaciones hidrotermales, las cuales son manifestaciones minerales que se dan por la interacción entre un fluido a alta temperatura, cargado en elementos y la roca caja donde se depositan dichos elementos. Específicamente, forma parte de un sistema mineral pórfido-epitermal (*epi* por su

emplazamiento a poca profundidad y *termal* por la influencia de los procesos termodinámicos de los fluidos mineralizados) de alta sulfuración, cuyos fluidos hidrotermales -ácidos y altamente oxidantes- tienen origen en ambientes volcánicos y sub volcánicos, principalmente a partir de fuentes magmáticas, y se mezclan con aguas meteóricas en su ascenso. Como se puede observar en la **Figura 7**, las manifestaciones de tipo epitermal se encuentran alojadas en la frontera entre la Reserva Temporal Santurbán (RTS) y el Páramo Jurisdicciones – Santurbán – Berlín, en una zona de falla.

Este distrito se ubica en la Subprovincia Metalogénica (sector con unas características particulares dadas por la evolución sedimentaria, magmática y/o tectónica específica con implicaciones en las características de los depósitos minerales) denominada de Santander (SPMS), localizada en el norte de la Cordillera Oriental entre la que se destacan los Macizos de Santander y Floresta.

La SPMS experimentó una fase tardía del levantamiento de la cordillera, entre 24 y 0,4 Millones de años (Ma), que produjo ambientes geológicos favorables para la formación de depósitos minerales (Cediel, 2019; Leal-Mejía et al., 2019). En este evento -de orogénesis- se formaron rocas ígneas de edad Mio-Plioceno (entre 14 y 9 Ma) (Bissig et al., 2012; Leal-Mejía, 2011), asociadas a magmatismo de retroarco, específicamente debido a la extensión de la corteza continental a lo largo de estructuras profundas como la de Bucaramanga-Santa Marta-Garzón (Leal-Mejía et al., 2019). En este mismo sector, se reportan edades Pliocenas-Pleistocenas (2,6 a 1,3 Ma) asociadas a la mineralización (Rodríguez, 2014; Rodríguez et al., 2017).

Este sistema se caracteriza por un pH ácido y la presencia de minerales ricos en metales preciosos y base, como oro (Au), plata (Ag), cobre (Cu), plomo (Pb) y zinc (Zn), que se depositan a diferentes profundidades y condiciones geológicas. Este sistema mineral se desarrolló por la interacción de procesos geológicos relacionados con subducción, los cuales han generado fases superpuestas de magmatismo granitoide y reestructuración tectónica.

Las rocas encajantes (neises precámbricos y rocas ígneas mesozoicas) exhiben alteración hidrotermal variable a lo largo de las márgenes de las venas y brechas, encubriendo las características composicionales de las rocas encajantes debido a la superposición y reemplazamiento mineral (Leal-Mejía, 2011; Sillitoe et al., 1982; Ward et al., 1973). Las alteraciones dominantes son argílica (minerales arcillosos) y fílica (formación de muscovita), con menor proporción de alteración propilitica (epidota-clorita), silicificación, adularia, albita, biotítica, turmalinización y carbonatización (Rojas, 2013).

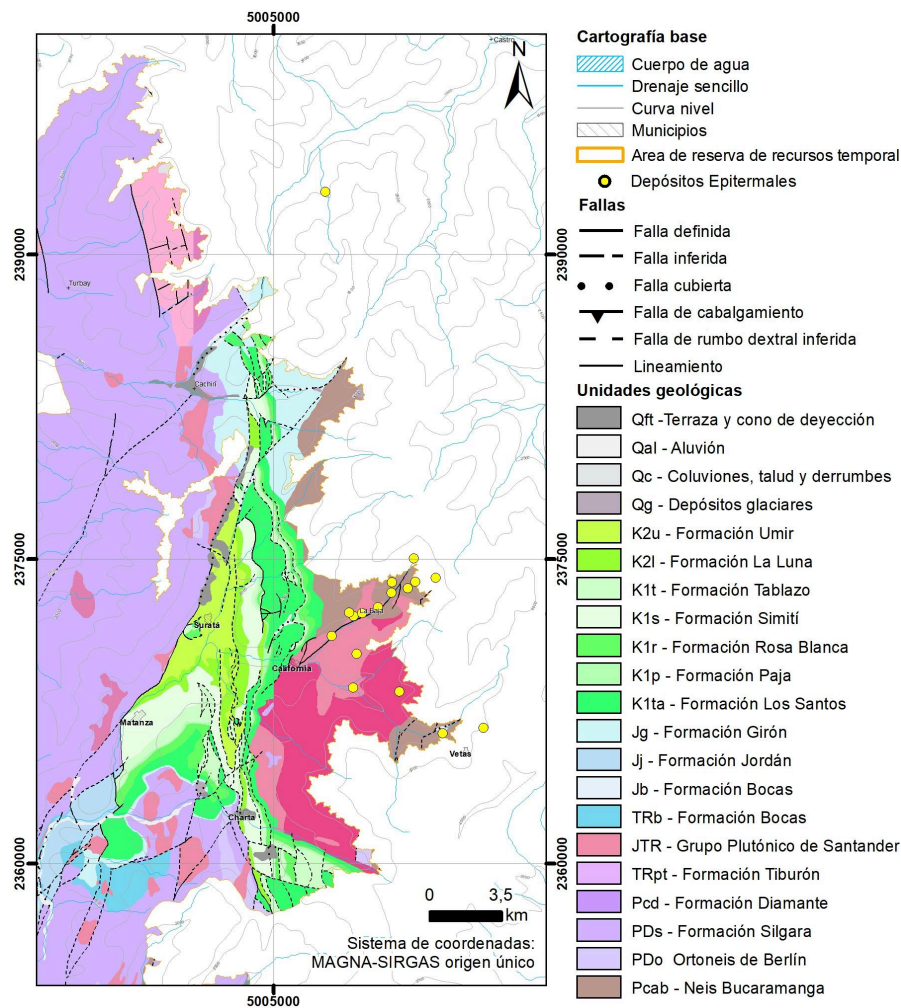


Figura 7. Localización de la mineralización epitermal en las unidades geológicas dentro del área de reserva temporal. Mapa geológico tomado y adaptado de Ward et al. (1977a y b), Vargas y Arias (1981) y Fúquen et al. (2010).

La mineralización en la zona es compleja debido a los diferentes pulsos de infiltración de fluido, cizallamiento, brechamiento y reemplazamiento, evidenciados en variadas texturas de cuarzo y sulfuros presentes en diversos sectores. Las labores mineras agrupadas en el Distrito Minero Vetas-California (Leal-Mejía et al., 2019) o Distrito Minero Vetas (Ministerio de Minas y Energía et al., 2014) se desarrollan en distintos sectores epitermales de alta a intermedia sulfuración.

Localmente, se observan vetillas de cuarzo en estructuras tipo entrecruzada, encajadas en rocas faneríticas que pueden variar a porfíricas de composición intermedia (Rojas, 2013). Estas podrían estar asociadas a sistemas tipo pórfido de cobre-molibdeno (López-Isaza et al., 2018); en los que se reportan minerales de mena y accesorios como tenantita, molibdenita, calcopirita, pirrotina y magnetita-ilmenita (Rojas et al., 2020).

Mineralógicamente, se ha reportado oro + elctrum ± plata + sulfuros de hierro, cobre, plomo y arsénico (pirita + calcosina + covelina ± bornita ± digenita ± calcopirita ± galena ± esfalerita ± pirrotina ± arsenopirita ± marcasita ± proustita ± molibdenita) + telururos de plata (calaverita ±

petzita ± sylvanita ± hessita) + sulfosales con arsénico, antimonio y cobre (enargita-famatinita ± tetraedrita-tenantita ± golfildita ± pearceíta-polibasita) ± wolframita ± hematita + cuarzo + alunita + caolinita + sericita (Díaz & Guerrero, 2006; Rodríguez, 2014; López-Isaza et al., 2018; Rojas et al., 2020).

La composición mineralógica de estos depósitos tiene implicaciones para la salud humana y ambiental. Un aspecto particular es la ocurrencia de uranio en la forma de -minerales radiactivos- torbenita, autunita, uranofana y becquerelita, posiblemente producidos por la disolución y oxidación de minerales primarios como uraninita, cofinita y branerita (Rincón, 2016). Además, la presencia de minerales sulfurados enriquecidos en metales pesados, como el arsénico, el plomo y el cadmio, representa riesgos de contaminación de aguas superficiales y subterráneas. Al exponerse a la atmósfera, los procesos de oxidación y erosión sobre estos minerales pueden liberar elementos tóxicos al ambiente, incrementando su concentración en el agua, sedimentos, suelos y material particulado.

5. Generalidades hidrogeológicas

Como se mencionó dentro de las generalidades geológicas, la zona de la reserva está dominada por rocas cristalinas, que tradicionalmente se han asociado a una permeabilidad muy baja o incluso nula (**Figura 8**). No obstante, diversos estudios de geología estructural -enfocados a la hidrogeología-, evidencian que la deformación asociada al estilo estructural del área propicia en estas rocas un aumento de permeabilidad mediante el desarrollo de redes de fracturas, que funcionan como canales de flujo para el agua subterránea (Colegial et al., 2006; Velandia et al., 2016; Cañas et al., 2022). Además de los materiales geológicos cuya porosidad está dada principalmente por las fracturas y discontinuidades, en la zona de la reserva también existen rocas y depósitos sedimentarios con porosidad primaria importante.

Adicionalmente, los procesos de meteorización transforman químicamente los componentes de las rocas llegando a convertirlas en materiales sueltos. De acuerdo con el tipo de material alterado, se puede propiciar una mayor o menor permeabilidad. En cualquier caso, este proceso es determinante para establecer la capacidad de almacenamiento del agua en macizos rocosos (Gómez-Isidro, 2014). Rueda (2013) identificó flujos longitudinales de tránsito corto en algunas cuchillas -o parte aguas- localizadas en el macizo de Santander, condicionados por espesores meteorizados asociados a rocas cristalinas del Neis de Bucaramanga y la Cuarzomonzonita de La Corcova (Grupo Plutónico de Santander). Lo anterior ejemplifica claramente cómo el proceso de meteorización, que afecta a las rocas aflorantes en el área de la reserva temporal de Santurbán, incide en su potencial hidrogeológico.

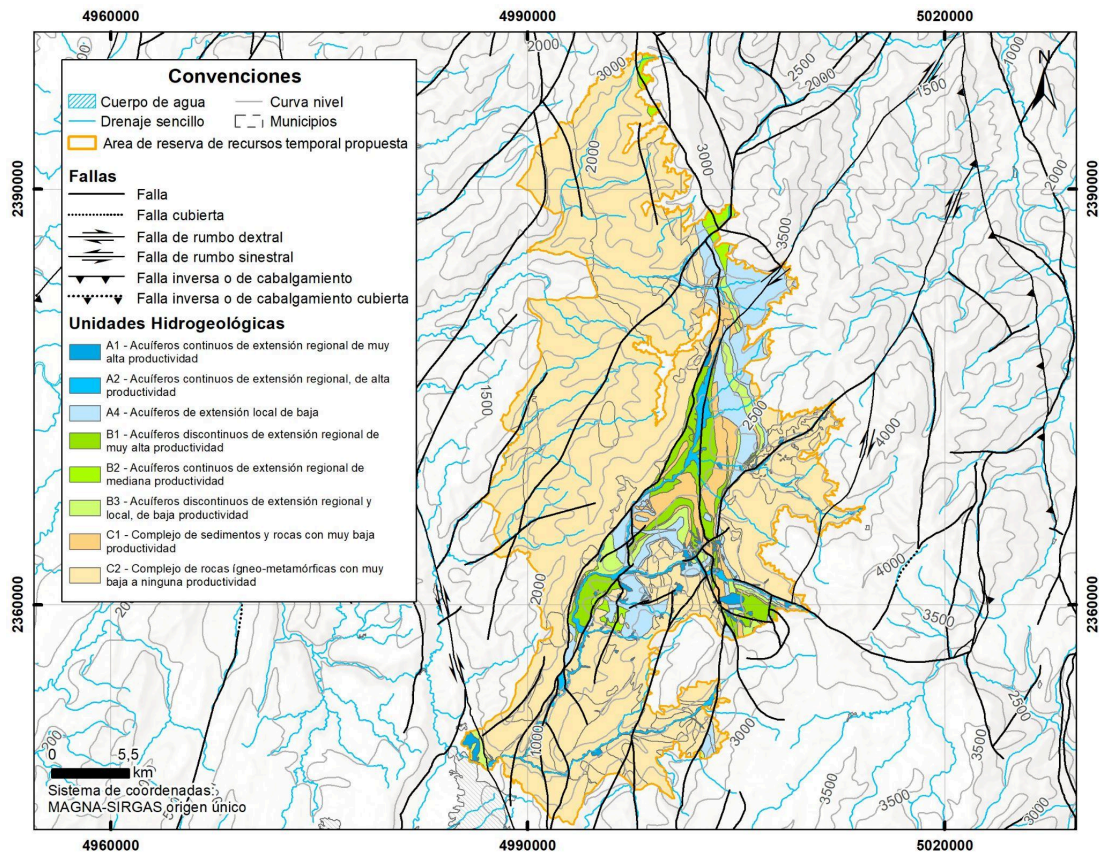


Figura 8. Distribución de unidades hidrogeológicas dentro del área de reserva temporal. Nótese como las rocas cristalinas ígneas y metamórficas son consideradas zonas de baja permeabilidad. Fuente: Elaboración propia a partir de la información geoespacial de los POMCA de los ríos Cáchira Sur y Alto Lebrija (CMBD, 2019; CMBD, 2020).

De igual forma, Rueda (2013) identificó flujos regionales asociados a canales de flujo preferenciales condicionados por zonas de falla en las cuales las propiedades hidráulicas de las rocas se ven fuertemente alteradas, estos flujos regionales fueron validados con técnicas hidrogeoquímicas e isotópicas. A su vez, Gómez y Anaya (2004), mediante el uso de isótopos ambientales, establecieron tres zonas de recarga en el macizo de Santander ubicadas a 1300 – 1500, 1800 – 2200 y 2300 a 2700 m.s.n.m, favorecidas por el fracturamiento y meteorización que presentan las rocas cristalinas aflorantes en el área. Estos flujos -regionales- identificados presentan conexión hidráulica y recargan los acuíferos superficiales y profundos del abanico de Bucaramanga, conformados por el miembro Gravoso y Órganos respectivamente, lo que sugiere que la falla de Bucaramanga -que separa las dos provincias geomorfológicas- presenta condiciones favorables de permeabilidad y permite la conexión entre las aguas subterráneas del macizo de Santander y los acuíferos aluviales de la depresión de Bucaramanga. Los flujos regionales identificados en el estudio de Gómez y Anaya (2004) fueron validados con análisis de isótopos radiogénicos (tritio), que demuestran un prolongado tiempo de residencia.

Por otra parte, Gómez- Isidro y Gómez- Ríos (2016) presentaron una estimación del flujo base en la cuenca alta del río Lebrija, mediante el análisis de isótopos estables y el uso de

algoritmos numéricos, el cual es cerca del 70 % del caudal total que conforma el río en el punto de cierre, localizado en el sitio conocido como Café-Madrid, lo cual da cuenta de la importancia del agua subterránea para la regulación hídrica.

Lo señalado anteriormente evidencia que, si bien el área de la reserva temporal está conformada principalmente por rocas cristalinas con porosidad primaria baja, las características de deformación y meteorización que estas han experimentado permiten la infiltración, tránsito y almacenamiento de agua subterránea tanto en flujos locales como en tránsitos más prolongados. Asimismo, se establece una fuerte conexión entre las aguas subterráneas con el drenaje superficial, el cual se ve alimentado en un alto porcentaje por las primeras.

Zonas de recarga en el área propuesta para la reserva temporal

El agua subterránea resulta de la infiltración profunda, a través de poros o fracturas de suelos, sedimentos y rocas, del agua proveniente de la precipitación o de fuentes superficiales interconectadas. De esta forma, el agua puede almacenarse en acuíferos y constituir reservas hídricas aprovechables por las personas o los ecosistemas para satisfacer diversas necesidades, o retornar de forma natural hacia sistemas acuáticos y terrestres interdependientes, cumpliendo una importante función reguladora de las corrientes hídricas o prestando diversos servicios ecosistémicos.

Las áreas en donde ocurren estos procesos de infiltración son llamadas zonas de recarga, importantes para la provisión y regulación hídrica, entre otros servicios ecosistémicos. La provisión está relacionada con el suministro de agua subterránea para el consumo humano y para otros propósitos distintos; la regulación está relacionada con favorecer la infiltración y percolación de agua hasta la zona saturada, permitiendo la renovación del agua subterránea, el mantenimiento de los acuíferos y, eventualmente, la descarga como flujo base hacia cuerpos de agua superficial. Por lo anterior, las zonas de recarga tienen especial importancia ambiental para la conservación y protección del agua subterránea.

Dentro del área de interés se halla la cuenca del Río Cáchira Sur y la cuenca del Río Alto Lebrija, en cuyos planes de ordenamiento (CMBD, 2019; CMBD, 2020) se determinaron zonas de recarga asociadas a unidades hidrogeológicas sedimentarias. Estas zonas son de especial protección de acuerdo con los principios generales ambientales contenidos en el artículo 1 de la Ley 99 de 1993. Con relación a la zona propuesta para la reserva temporal, adyacente al páramo de Santurbán-Berlín, se resalta la presencia de zonas de recarga asociadas a las partes altas de la cordillera Oriental donde afloran rocas sedimentarias del Jurásico, Cretácico y sedimentos del Cuaternario. A continuación, en la **Figura 9**, se presentan las zonas de recarga del área de interés definidas por la autoridad ambiental.

Dentro del área de interés, las zonas de recarga tienen una extensión de 11396 ha, de las cuales 8058 corresponden a la cuenca del Río Alto Lebrija y 3338 pertenecen a la cuenca del

Río Cáchira Sur. Es importante mencionar que, en el estudio citado, la recarga hídrica se obtuvo como resultado del análisis espacial de los valores obtenidos del balance hidrológico y la litología existente en la zona de estudio. Ahora bien, considerando que se han definido zonas de recarga limitadas a los lugares donde afloran rocas sedimentarias o depósitos cuaternarios con porosidad primaria, es necesario resaltar la importancia de tener en cuenta la deformación estructural de la zona para delinear zonas favorables para la infiltración, tránsito y almacenamiento de agua subterránea.

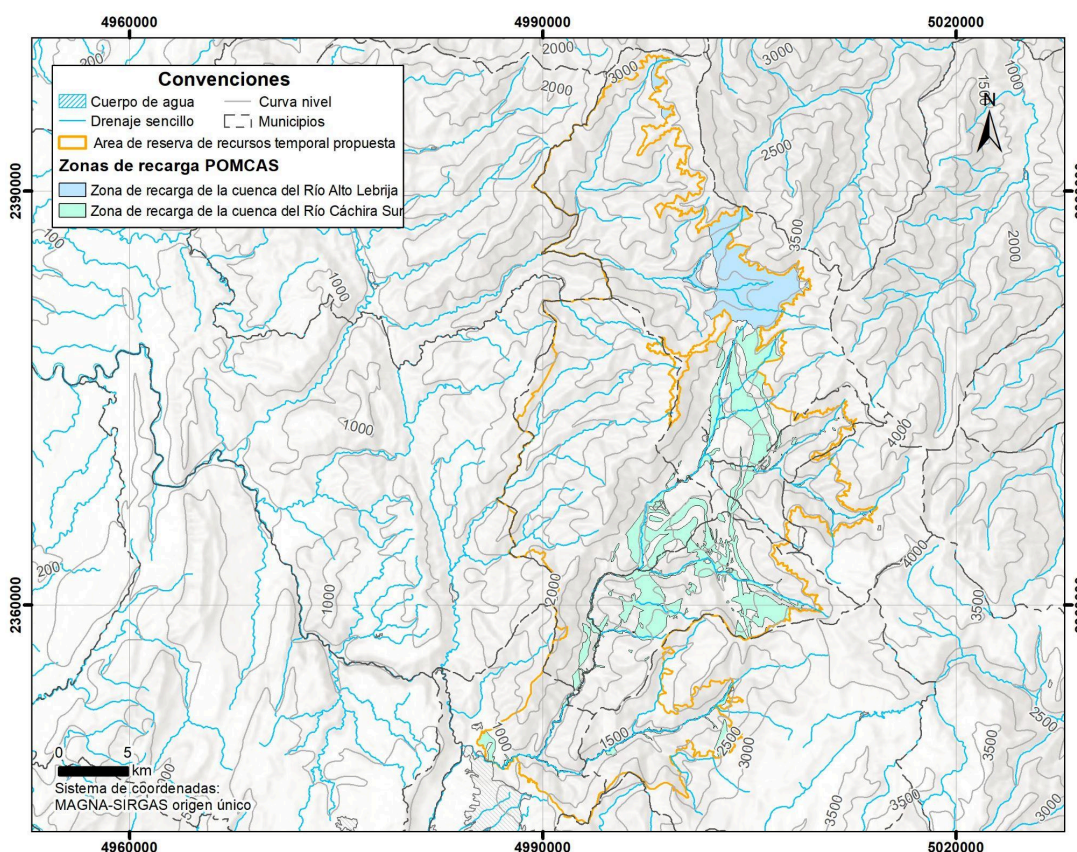


Figura 9. Zonas de recarga identificadas en los POMCAS Río Alto Lebrija y Río Cáchira Sur dentro del área de influencia. Fuente: Elaboración propia a partir de la información geoespacial de los POMCA de los ríos Cáchira Sur y Alto Lebrija (CMBD, 2019; CMBD, 2020).

Al respecto, el SGC en conjunto con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), se encuentra desarrollando la Guía Metodológica para la Identificación de Zonas Potenciales de Recarga de Acuíferos. Como parte del desarrollo de esta guía, se realizó un ejercicio piloto para la delimitación de zonas de recarga en las cuencas hidrográficas de los ríos Suratá y Tona.

La metodología aplicada se basa en la sobreposición ponderada de capas temáticas de factores que inciden en el proceso de recarga, cuyos insumos se encuentran disponibles a escala regional (1:100.000). Para este caso de estudio, se usaron los factores litología, incidencia estructural, relieve, cobertura vegetal e infiltración en el suelo. Cada capa temática

está clasificada en una escala de 1 a 5 de acuerdo al potencial de cada factor para favorecer el proceso de recarga; siendo 1 una potencial muy bajo y 5 muy alto.

Finalmente, se utilizó el método de evaluación multicriterio de apoyo a la decisión de Saaty (1987) para encontrar factores de ponderación que permitan la sumatoria de las capas de acuerdo a la influencia de cada factor en el proceso de recarga, según las condiciones hidrogeológicas del área evaluada.

Teniendo en cuenta que esta región del Macizo de Santander está conformada por rocas cristalinas afectadas por fracturamiento, en el proceso de valoración de la importancia de los factores se dio mayor relevancia a la incidencia estructural, ya que está controla la permeabilidad y las direcciones de flujo del agua subterránea, de acuerdo con el conocimiento hidrogeológico que se tiene del área (Rueda, 2013; Colegial et al., 2006; Velandia et al., 2016; Cañas et al., 2022).

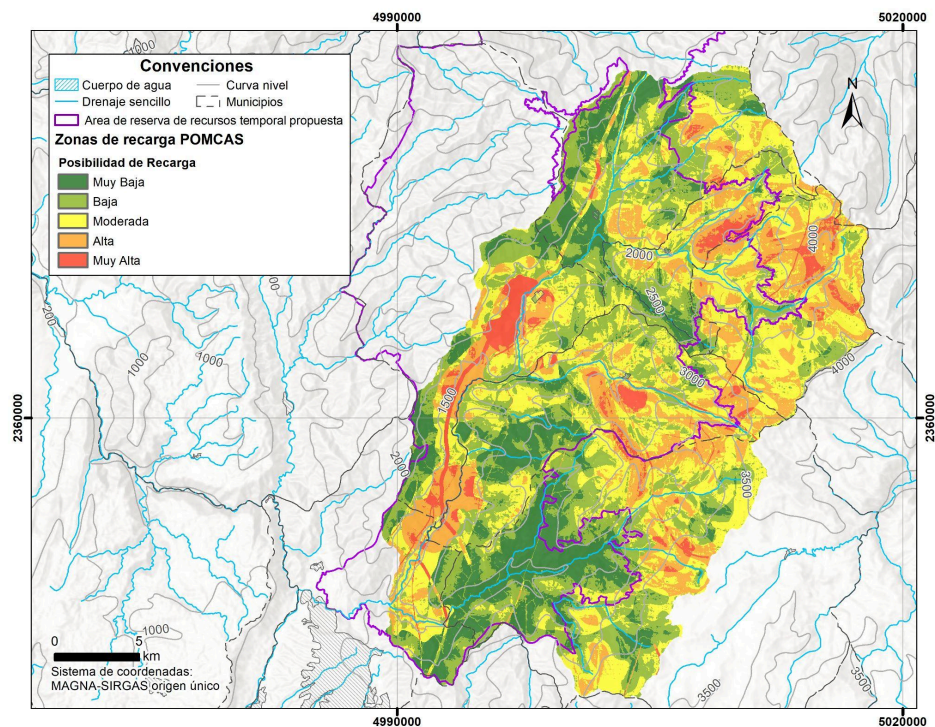


Figura 10. Resultados de la delimitación de zonas de potencial de recarga en las cuencas de los ríos Suratá y Tona. Fuente: Elaboración propia

La **Figura 10** evidencia la existencia de múltiples áreas catalogadas con una posibilidad o potencial alto o muy alto para la recarga, generalmente asociadas a zonas con mayor deformación estructural. El resultado obtenido se valida parcialmente con información adicional que se tiene de esta zona, incluyendo datos hidrogeoquímicos e isotópicos (Cañas et al., 2022; Herrera et al., 2023), de las cuencas de La Baja y Angosturas, con los cuales se demuestra la ocurrencia de recarga asociada a unidades cristalinas afectadas por deformación estructural. Lo anterior también está de acuerdo con los hallazgos de Gómez y Anaya (2004) mencionados

previamente, quienes establecen zonas de recarga favorecidas por el fracturamiento y meteorización de las rocas cristalinas del Macizo de Santander. Cabe resaltar que el resultado obtenido es preliminar y puede ser susceptible de validaciones posteriores con información detallada.

Lo anterior permite plantear que la definición de zonas de recarga basada únicamente en criterios litológicos, sin considerar factores como la deformación estructural, genera una subestimación en la delimitación de estas áreas de especial protección. Por esto, es razonable plantear que el área delimitada para la reserva tiene valores ambientales adicionales relacionados con la presencia de rocas cristalinas con porosidad secundaria. En particular, los servicios ecosistémicos de provisión y regulación hídrica que ofrecen las zonas de recarga.

Línea base meteórica en el área propuesta para la reserva temporal

El análisis isotópico de deuterio ($\delta^2\text{H}$) y oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$) en muestras líquidas es un insumo importante para que diferentes entidades se proveen de argumentos técnico-científicos para la toma de decisiones en pro de la conservación y ordenamiento en torno al agua. Las técnicas isotópicas se caracterizan por ser una herramienta eficaz para la determinación de líneas de flujos de procesos de evaporación, precipitación, transporte de vapor, percolación, evapo-transpiración y flujo de aguas subterráneas.

La importancia del estudio de la composición isotópica del agua de la lluvia (^2H y ^{18}O) radica en que ésta es la fuente principal de la recarga natural de los sistemas de flujo superficial y subterráneo (incluidos los sistemas hidrotermales). Dicha composición permite obtener la firma isotópica del agua que ingresa en los distintos sistemas, la cual varía en tiempo y espacio (Clark & Fritz, 1997).

La línea meteórica construida con el muestreo de la precipitación es una herramienta utilizada para la interpretación de los resultados isotópicos de muestras de agua provenientes de los hidrosistemas investigados (manantiales, pozos, ríos, lagos y quebradas) mediante la comparación o correlación permite inferir orígenes del agua, la determinación de tiempos de tránsito en cuerpos de agua, las alturas de recarga, y correlación de las distintas fuentes hídricas, entre otras. Dado que la composición isotópica del agua de precipitación es variable y es función de la temperatura (elevación, latitud, estacionalidad), cantidad, humedad relativa del aire, etc., su medición en el tiempo puede ser utilizada en la comprensión y determinación de los procesos del ciclo hidrológico (Clark & Fritz, 1997).

Para la zona de interés se han efectuado investigaciones isotópicas en la región del macizo de Santander (Gómez et al., 2005) y estudios hidrogeológicos e isotópicos en la cuenca de la quebrada La Baja, incluyendo el páramo de Santurbán (Cañas et al., 2022; Herrera et al., 2023). Estos últimos han permitido establecer relaciones entre el ciclo hidrológico y actividades como la minería, como se presenta en la sección de impactos.

Importancia hidrogeológica de la zona para el ordenamiento ambiental y territorial

El agua subterránea es parte del ciclo hidrológico, señalando así un vínculo e interacción permanente con diversos componentes de la superficie como son la hidrología, el clima, la vegetación, entre otros. Bajo ese marco, la CDMB (2019, 2020) identificó los escenarios tendenciales (véase por ejemplo Mapa del Escenario Tendencial del POMCA de Cháchira Sur y Mapa del Escenario Tendencial para el Índice de Alteración de la Calidad del Agua para el POMCA del Río Alto Lebrija) que señalan la necesidad de intervención intencionada para conservar o mejorar las condiciones de las cuencas. En Cháchira Sur, por ejemplo, la CDMB (2019) advierte sobre la necesidad de definir y ejecutar medidas de adaptación y mitigación para proteger las fuentes hídricas, y realizar un uso racional del agua. Tal enfoque concibe la integralidad del ciclo hidrológico, su importancia para garantizar la regulación de la cuenca, y la necesidad de gestionar el agua.

La tendencia actual, de acuerdo con los instrumentos de ordenamiento ambiental antes mencionados, es indicativa del aumento de zonas erosionadas, pérdida de vegetación, malas prácticas en el uso del suelo, disminución en la calidad y disponibilidad de agua, deterioro de los ecosistemas, afectación de la biodiversidad, entre otros.

De esta manera, se puede establecer que la disponibilidad y calidad de las aguas subterráneas inevitablemente se verán afectadas bajo tales escenarios. En ese sentido, la información disponible, señalan los POMCAS, requiere de ampliación en términos de cobertura, calidad y profundidad de análisis, dado que se presentan muchos vacíos que no permiten una caracterización más precisa. Así, se utilizan algunos planteamientos generales, como el señalado inicialmente sobre la relación entre tipo de litología y permeabilidad para definir zonas de recarga, el cual es limitado si se tiene en cuenta la importancia de algunas características como el grado de deformación estructural imperante en la zona, lo cual conlleva a la subestimación en la delimitación de estas áreas de especial protección ambiental.

Los instrumentos de ordenamiento de cuenca son reiterativos en la ausencia de un monitoreo de calidad o cantidad de agua encaminado al seguimiento y control de las condiciones ambientales en las cuencas que conforman el área de reserva temporal. Como ejemplo de ello, no existe un registro y seguimiento a las descargas de flujos subterráneos, especialmente de los nacimientos de agua o manantiales, considerados como zonas de importancia ambiental hidrogeológica tanto en el POMCA del Río Alto Lebrija como en el POMCA del Río Cháchira Sur.

La importancia de este tipo de cuerpos radica en los servicios ecosistémicos relacionados con la regulación hídrica. Estos cuerpos se constituyen en zonas productoras del agua proveniente de flujos subterráneos, y son capaces de liberarla y dejarla discurrir lentamente en cualquier período del año hidrológico, soportando los caudales base de los ecosistemas acuáticos, especialmente en periodos de bajas precipitaciones. Así mismo, prestan servicios ecosistémicos de provisión, los cuales están asociados al suministro de agua subterránea para

el consumo humano, para animales domésticos y silvestres, y para la vegetación asociada a los drenajes donde descarga.

6. Contexto de la minería a gran escala en la RTS

En el área de interés para la RTS, geológicamente entre el Neis de Bucaramanga y el granito de Pescadero, donde ocurren mineralizaciones importantes de oro, se ha permitido el desarrollo histórico de actividad minera, tanto en depósitos de tipo placer (barequeo) como en minería de socavón asociada a las vetas y proyectos de exploración mineral de mayor envergadura desarrollados en galerías y perforaciones exploratorias.

El proyecto Soto Norte, liderado por Aris Mining Corporation, ha adquirido una participación mayoritaria del 51 % tras un acuerdo con MDC Industry Holding Company LLC, subsidiaria de Mubadala Investment Company PJSC. Este proyecto se caracteriza por una minería de alta selectividad, enfocada específicamente en el cuerpo mineralizado. La planta de procesamiento tendrá una capacidad de 7.200 toneladas por día (tpd) y una extracción anual promedio de más de 450.000 onzas (12,8 toneladas/año) de oro durante un período de 11 años.

Minesa, o Minesa Sociedad Minera de Santander, es una empresa minera con sede en Colombia, que ha estado asociada principalmente con el Proyecto Soto Norte. La empresa presenta actividad, principalmente desde mediados de la década de 2010, aunque los trabajos de exploración y desarrollo se intensificaron a partir de 2017. A lo largo de estos años han realizado exploración avanzada, estudios de factibilidad y se han enfrentado a procesos regulatorios y ambientales por parte de las autoridades correspondientes. El Proyecto Soto Norte de Minesa se encuentra en los municipios de California y Suratá en el departamento de Santander, en una región montañosa, rica en biodiversidad y clave para la regulación del agua de la región, que es parte del Páramo de Santurbán.

Actualmente, Minesa no ha iniciado operaciones de extracción a gran escala. El proyecto ha enfrentado múltiples desafíos legales y sociales debido a la preocupación por los impactos ambientales, especialmente en el Páramo de Santurbán. Actualmente, debido a los problemas antes mencionado, no se ha avanzado a la fase de explotación; se planea sin embargo la extracción de oro utilizando métodos subterráneos (túneles).

El procesamiento del mineral propuesto involucra técnicas como la flotación y la cianuración para la recuperación de oro, lo que ha generado preocupaciones sobre la gestión de cianuro y otros productos químicos.

Los términos "Mascota" y "Gigante", que se referencian más adelante en el presente concepto técnico, se refieren a compósitos geológicos dentro del proyecto Soto Norte. El término

“compósito” se refiere a una combinación o mezcla de varias muestras individuales de roca o mineral proveniente de una de las áreas del proyecto, donde se han identificado concentraciones significativas de mineralización de oro. Es un término que se usa para describir la sección o bloque del yacimiento que tiene características geológicas y mineralógicas específicas, que la empresa explora y modela para determinar la viabilidad de la extracción.

7. Contexto de la minería a pequeña escala en la RTS

La explotación de yacimientos hidrotermales puede realizarse tanto a gran escala como a pequeña escala. En general, para este último caso, se establecen operaciones individuales o conjuntas entre varios mineros que logran hacerse con la maquinaria para extraer el mineral y los insumos necesarios para procesarlo. Además, los residuos dejados por la actividad minera pueden ser aprovechados por mineros individuales denominados recolectores o chatarreros (Embajada de Estados Unidos y Universidad del Rosario, 2024).



Figura 11. Registro fotográfico de características típicas de la explotación a pequeña escala en el municipio de Suratá. **A.** Bocamina mina Oquenda, **B.** muestra de mano mineralizada, **C.** Bocamina mina La Paula, **D.** Filón de mina La Paula. Fuente: Candela et al., 2024

En este punto es necesario mencionar la complejidad social alrededor de la pequeña minería. Esta no necesariamente es sinónimo de informalidad o ilegalidad; adicionalmente, el término

“ilegal” tiene implicaciones sociales graves, al equiparar comunidades rurales que ejercen la minería como forma de subsistencia con otro tipo de actores, como actores armados violentos. La ausencia de permisos, requerimientos o instrumentos legales no puede ser el único criterio para calificar la minería como ilegal (Rubiano et al., 2020). Ahora, es cierto que en muchos contextos y particularmente en la zona de interés, múltiples actores desarrollan la actividad minera sin contar con los instrumentos mineros o ambientales correspondientes, lo cual puede profundizar algunos de los impactos de esta actividad como la contaminación de aguas y suelos con mercurio durante el proceso de beneficio.

En el marco de estudios realizados por el SGC (Candela et al. 2024) se han registrado algunas características comunes de la explotación a pequeña escala en el distrito minero de Vetás-California-Suratá. En el municipio de Suratá, por ejemplo, las galerías de explotación se caracterizan por ser desarrolladas de manera horizontal, inclinadas y en cruzadas. El avance desde el ingreso a bocamina es variable, desde 18 m hasta 120 m en las más desarrolladas. En cuanto al proceso de beneficio, se cuenta con un sistema de trituración compuesto por una trituradora de mandíbulas. En la etapa de molienda se utiliza un entable compuesto por 10 barriles. Las colas y los concentrados obtenidos con ayuda de una mesa tipo Gemini son cianurados por percolación. La capacidad de procesamiento de una planta típica está alrededor de 2 a 6 toneladas al mes.

Por otro lado, en el municipio de Vetás las labores mineras se ejecutan a través de galerías horizontales e inclinadas siguiendo guías y cruzadas de hasta 500 m. Para la trituración se cuenta con una trituradora de mandíbulas, para la molienda se utiliza un molino de bolas. El concentrado pasa por un proceso de cianuración con tanques agitados y la precipitación del oro se realiza por medio de zinc saturado por agitación. La capacidad de procesamiento de una planta típica está alrededor de 10 a 30 toneladas por día.

A partir de estos dos ejemplos se tiene una idea de la magnitud de la explotación a pequeña escala, de las características típicas de las excavaciones y de algunos de los procedimientos utilizados en el beneficio que, por ejemplo, involucran el uso de sustancias con alto potencial tóxico, como el cianuro.

En relación con los residuos que quedan una vez se recuperan los metales de valor económico durante la actividad minera, ya sea a pequeña o gran escala, Morril et al. (2022) presenta la siguiente definición de los relaves:

(...) el desperdicio que queda después de la eliminación de metales o minerales de valor económico de la mena mediante métodos físicos o químicos de separación. Los relaves constan de roca o suelos procesados, agua y posiblemente otros productos mineros incluyendo químicos de combustión (amonio, nitrato), trazos de químicos utilizados en el proceso de separación (por ejemplo, productos secundarios de petróleo, cianuro y

agentes cáusticos) y metales u otros constituyentes lixiviados de la roca o los suelos (ej.: cobre, cadmio, plomo, zinc, hierro, arsénico, aluminio, manganeso y sulfato). Los relaves pueden ser vertidos en obras mineras subterráneas o tajos abiertos agotados, pero por lo general los relaves son resguardados en embalses superficiales permanentes detrás de una presa construida de otros desperdicios mineros

Nótese que una parte integral de esta definición es la forma en que estos desechos se disponen. En general, por los volúmenes de material removidos en proyectos de gran y mediana minería de metálicos, se requiere disponer volúmenes significativos de relaves, ya sea como retrolenado de tajos o galerías de túneles, o como depósitos superficiales en presas. De acuerdo con estudios de prefactibilidad y la descripción de algunos proyectos de gran minería planteados para la zona (Minesa, 2020; Greystar, 2009; Golder, 2012), se proyectan volúmenes de relaves en el orden de decenas a millones de metros cúbicos. En el caso de la pequeña minería que se desarrolla en la zona de interés, se generan desechos que también pueden enmarcarse en el concepto de relaves, pero no implican su disposición final en depósitos de gran magnitud.

8. Impactos y riesgos geoquímicos en el ambiente

La industria minera, fundamental para el desarrollo económico, tecnológico y de infraestructura para cualquier sociedad, enfrenta actualmente serios desafíos ambientales. Entre los principales problemas se encuentran la contaminación del aire por emisiones de gases como metano, SO_2 y CO_2 , y la generación de drenajes ácidos, neutros o alcalinos asociados a las explotaciones minerales que liberan y dispersan elementos potencialmente peligrosos al ambiente como cobre, plomo, cadmio, arsénico y zinc (Dold y Fontboté, 2002).

La explotación de oro epitermal puede producir drenajes de mina que varían en su pH

- pH neutros, que presentan con bajas concentraciones de metales pesados tales como plomo (Pb), cadmio (Cd), cobre (Cu), entre otros, y contenidos no despreciables de metaloides, tales como arsénico (As), antimonio (Sb), y metales como molibdeno (Mo), zinc (Zn), níquel (Ni) y manganeso (Mg).
- pH ácido con concentraciones elevadas de hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), níquel (Ni), plomo (Pb), manganeso (Mn) y/u otros elementos como cadmio (Cd), mercurio (Hg), arsénico (As), antimonio (Sb) (Cavanagh, 2018). Estos autores determinan que a pH bajo, estos metales son muy solubles en agua, lo cuál facilita su transporte aguas abajo. Algunos de estos metales se vuelven menos solubles al aumentar el pH y pueden precipitar o sorberse en sustratos en varios rangos de pH, dependiendo de la carga eléctrica del sustrato. Los precipitados suelen ser oxihidróxidos de Fe, arcillas u ocasionalmente compuestos químicos más complejos.

- pH alcalinos, a partir de pH igual o superior a 9, movilizan metales y metaloides como plomo (Pb), manganeso (Mg), antimonio (Sb), arsénico (As), molibdeno (Mo). En alcalinidades más extremas, iguales o superiores a 12, también se remobilizan el cadmio (Cd), cobre (Cu), níquel (Ni) y zinc (Zn).

La liberación y movilización acuosa de elementos potencialmente peligrosos afectan la calidad de aguas superficiales y subterráneas, así como suelos que estén en contacto con dichas aguas contaminadas. Los procesos naturales de erosión liberan estos elementos, en concentraciones relativamente bajas y la dilución o atenuación en el entorno aguas abajo es rápida. Sin embargo, cuando la minería los libera, sus concentraciones son mayores y a menudo se requiere el tratamiento del agua impactada por la mina antes de su descarga al medio ambiente (Cavanagh, 2018). Estos autores revisan trabajos en los que se define que minas de oro epitermal históricas -o sus desechos asociados- evidencian concentraciones de elementos muy altos (tanto en materiales sólidos como en el agua cercana) y los sistemas geoquímicos y mineralógicos relacionados son complejos.



Figura 12. Componente geoquímico de impactos ambientales generados en la minería de oro de filón.

Los efectos del drenaje de las minas sobre la vida de los arroyos pueden ser directos o indirectos. Los efectos directos incluyen la toxicidad asociada con un pH extremadamente ácido o alcalino altas concentraciones de metales, y pueden ser agudos (letales) o subletales (por ejemplo, afectar los sistemas reproductivos). Pueden ocurrir efectos indirectos si el drenaje de la mina afecta el suministro de alimentos (por ejemplo, reduciendo la descomposición de la materia orgánica) o el hábitat de los organismos del arroyo (Cavanagh, 2018).

La contaminación derivada del uso de mercurio y cianuro como coadyuvantes de preprocesamiento se superpone a la contaminación por drenaje de minas. Los contaminantes se absorben preferentemente en las partículas finas de sedimento altamente reactivas liberadas por la minería. Investigaciones han encontrado altas concentraciones de mercurio en los mineros, sus familias, el medio ambiente local y las personas que viven en regiones mineras en todo el mundo (Dethier et al., 2023).

Con relación al desarrollo minero, en la **Figura 12** se presenta un esquema que integra los fenómenos geoquímicos que pueden darse y sus impactos a nivel ecológico, factores técnicos, y sus relaciones con cuerpos de aguas, ecosistemas e infraestructura.

El monitoreo ambiental se ve obstaculizado por el alcance global de la extracción de minerales fluviales, la falta de datos de referencia históricos y las dificultades para acceder a las regiones afectadas (Dethier et al., 2023). Sin embargo, un registro global que abarca 37 años y comprende más de 7 millones de mediciones de 173 ríos afectados a nivel mundial por la minería, revela amenazas crecientes a estos ecosistemas acuáticos vitales (Dethier et al., 2023).

Impactos relacionados al drenaje ácido de mina (DAM)

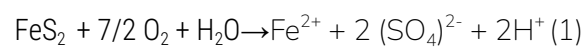
La formación de drenaje ácido resulta de la interacción entre minerales y elementos químicos del ambiente. El Drenaje ácido de mina (DAM) se origina a partir de la exposición de material (mineralizado o no) al oxígeno atmosférico, por remoción o por descenso del nivel freático producto de las actividades mineras, y al contacto con el agua lluvia y la humedad del ambiente, generando la oxidación de los minerales de azufre (Nordstrom, 2011). El DAM implica dos efectos directos sobre las aguas, suelos y sedimentos: la acidificación y la movilización de elementos potencialmente peligrosos (EPP). Este fenómeno se ve potenciado por la acción de microorganismos, que actúan como catalizadores. La formación de drenajes ácidos también puede ocurrir de forma natural, en cuyo caso se denomina drenaje ácido de roca (DAR).

En Colombia, el Ministerio de Salud y Protección Social (MPS) y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) establece la norma de calidad del agua para consumo humano a través de la Resolución 2115 de 2007 y el MADS regula, a partir del Decreto 1076 de 2015, la calidad del agua para otros usos. Estos instrumentos definen los límites permisibles para diversos parámetros fisicoquímicos, incluyendo el pH, la conductividad y la presencia de metales pesados.

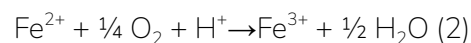
El DAM acelera la descomposición de los minerales primarios, con la posterior liberación de sus componentes, entre ellos, elementos potencialmente peligrosos (arsénico, plomo, cadmio, antimonio, molibdeno, uranio, cobre, zinc, manganeso y otros). Estos drenajes fluyen a través de los suelos, hacia las fuentes hídricas más cercanas y/o hasta alcanzar las aguas

subterráneas. Dicho fenómeno es constante siempre y cuando haya mineral sulfurado expuesto al oxígeno y al agua, ya sea mineral de frente de explotación, mineral acumulado en pilas de estériles o el mineral remanente en relaves como residuos en la parte final del beneficio. Dada la naturaleza del fenómeno, puede persistir incluso después del cierre de los proyectos mineros (Sumi & Gestring, 2013; Sharma & Al-Busaidi 2001; Kossoff et al. 2014; Wang et al. 2019).

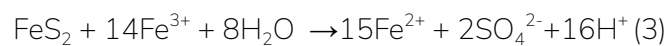
Los procesos de producción de acidez se pueden explicar mediante el ejemplo de la oxidación de pirita (Rimstidt y Vaughan, 2023). En el estado inicial (1), la oxidación vía oxígeno constituye una reacción relativamente rápida hasta que llega a valores de pH 4,5. La oxidación de una mol de pirita produce 2 moles de acidez (equivalentes de H^+).



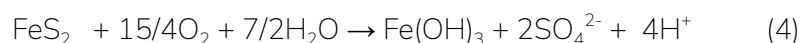
A niveles de pH inferiores a 4,5, la oxidación del ion ferroso a férrico se convierte en el proceso de oxidación dominante (2) y éste puede verse acelerado por catálisis biológica.



A medida que aumenta la producción de ácido y se consume la alcalinidad disponible, el hierro férrico también sirve como oxidante promoviendo la oxidación química de los minerales sulfurosos (3).



En términos generales la oxidación de 1 mol de pirita mediante la presencia de oxígeno e hidrólisis de hierro férrico produce 4 moles de acidez (equivalentes de H^+) (4).



La predicción de la generación de drenajes ácidos de rocas se realiza mediante el análisis de la composición mineralógica de una muestra: algunos minerales pueden producir diferentes grados de acidez, mientras que otros pueden neutralizarla. Los tres grupos de minerales más relevantes para la neutralización de la acidez son los silicatos, hidróxidos y carbonatos. De estos, los minerales más importantes en los procesos de neutralización son los que contienen carbonatos de calcio y magnesio, dada su rápida reactividad y gran capacidad para amortiguar el sistema (Stumm y Morgan, 1996; Langmuir, 1997). Además de la identidad y composición química del mineral, su textura y granulometría es relevante. Así, las técnicas de predicción de drenaje ácido se enfocan principalmente en cuantificar y caracterizar los minerales reactivos en cada muestra de roca.

Para determinar la producción potencial de drenajes ácidos, se realizan pruebas estáticas (test ABA), las cuales determinan si una muestra producirá o no un ambiente ácido, medido a través del potencial de generar acidez “PA” (controlado por el tipo y contenido de sulfuros, sulfatos y metales que pueden hidrolizarse) y el potencial de generar neutralización “PN” (controlado por el grupo de carbonatos principalmente). La diferencia entre ambos, denominada potencial neto de neutralización “PNN”, indica si la muestra tiene suficiente capacidad buffer para neutralizar todos los protones (H^+) o si producirá más protones de los que tiene capacidad de neutralizar y generará, de ese modo, condiciones ácidas.

$$PNN = PN - PA \quad (2)$$

En la **Tabla 1** se presentan generalidades de algunas rocas encajantes y asociaciones minerales de la Reserva Temporal Santurbán (RTS), con especial énfasis en los minerales con sulfuros, potenciales generadores de acidez, y en los minerales con carbonatos, potenciales neutralizadores en el sistema.

Tabla 1. Porcentajes mineralógicos de la mena, para dos compósitos maestros (Mascota y Gigante) caracterizados a través de mineralogía cuantitativa (QEMSCAN - Minesa). Para cada mineral se han adicionado dos categorías a la tabla original, respecto a la generación potencial de ácido (Dold, 2016) y el contenido de EPP en la estructura mineral (Fuente: modificado de Minesa 2020).

Mineral	Conceptual		Datos de porcentajes minerales MINESA, 2020	
	Generador de H^+ o neutralizador	EPP estructurales	Mascota (%)	Gigante (%)
Cuarzo	NA	NA	56,6	54,1
Moscovita/Arcillas	NA	NA	9,8	11,3
Feldespatos-K	NA	NA	9,2	9,84
Pirita	Generador	NA	10,6	10,3
Alunita	NA	NA	8,99	9,63
Rutilo	NA	NA	0,91	0,87
Crandalita	NA	NA	0,92	0,68
Otros Sulfatos	NA	NA	0,73	0,69
Óxidos-Fe	NA	NA	0,32	0,64
Otros Óxidos	NA	NA	0,35	0,34
Otros Silicatos	NA	NA	0,29	0,23
Otros	NA	NA	0,2	0,2
Otros Sulfuros	Generador	NA	0,13	0,15
Enargita/Tetraedrita	Generador	Cu, As	0,3	0,17
Minerales-W	NA	NA	0,1	0,05
Esfalerita	Generador	Zn	0,09	0,28
Carbonatos	Neutralizador	NA	0,04	0,09
Bornita	Generador	Cu	0,12	0,12
Fluorita	NA	NA	0,03	0,08

Calcopirita	Generador	Cu	0,18	0,14
Covelita	Generador	Zn	0,04	0,04
Calcocita	Generador	Cu	0,07	0,01

A continuación, se describe la presencia de los diferentes minerales y elementos de interés en el depósito. En el **Anexo 1** se puede observar la descripción de cada mina respecto a su mineralogía y características geológicas, precisando su potencialidad de generación de DAM.

El oro y el electrum (aleación natural de oro y plata) tiene una fuerte relación con la pirita fina y cristalina, y se presentan ya sea libres, adheridos a partículas de pirita o encapsulados dentro de la estructura cristalina de la pirita (SRK Consulting (UK), 2021). Además de la pirita, otros sulfuros asociados con el oro son la calcopirita, la covelina, la enargita, la bornita, la tetraedrita, la molibdenita, la galena, la esfalerita, la hubnerita y la wolframita (Scarpelli, 2021).

De los EPP comunes para la RTS, el cobre se presenta principalmente como enargita y en menor medida como bornita, calcopirita, calcosina primaria y tetraedrita-tennantita; el arsénico está asociado principalmente con la enargita y raramente se observa como arsenopirita; el zinc se presenta como esfalerita wurtzita y se asocia con la distribución de plomo, principalmente como hinsdalita y ocasionalmente como bournonita y posiblemente boulangerita; el antimonio se presenta ocasionalmente como jamesonita y tetraedrita y en una escala muy pequeña en bournonita y boulangerita; el bismuto ocurre como un elemento traza dentro de los depósitos y puede estar relacionado con la bismutinita o tellurobismutinita; y el tungsteno se presenta principalmente como hubnerita y ocasionalmente como ferberita (SRK Consulting (UK), 2021).

Teniendo en cuenta que la generación de acidez puede producirse a través de dos mecanismos: 1): vía oxidación por el oxígeno + hidrólisis del hierro férrico y 2) oxidación a través del ion férrico, en la zona de oxidación más próxima a la superficie, que presenta una profundidad irregular y penetra mucho más profundo alrededor de las fracturas y fallas principales, el hierro ferroso y el férrico tienden a oxidarse completamente, hidrolizan y pueden precipitar como hematita, goethita y limonita, dependiendo de las condiciones de pH-Eh.

La alta presencia de minerales del grupo de los sulfuros (potenciales generadores de acidez) y los bajos contenidos de minerales con carbonatos (potenciales neutralizadores) indican que en este sistema existe potencialidad de generación del fenómeno: la pirita aportando la gran mayoría de azufre (cerca de 97 %) mientras que los sulfuros asociados al cobre corresponden aproximadamente al 2,5 %.

Para los impactos que se presentan a continuación, la pequeña, la mediana y gran minería se pueden diferenciar desde una perspectiva cualitativa. Debido a la mayor remoción de material, mayores volúmenes de exfiltración de agua en los túneles y mayor magnitud del posible

abatimiento de agua subterránea, se espera que la exposición de material a condiciones aeróbicas que favorecen el drenaje ácido sea de mayor magnitud en la mediana y gran minería, generando mayores volúmenes de agua ácida, que representa un factor de riesgo de contaminación del agua superficial y subterránea. Adicionalmente, la mediana y gran minería implican la disposición de grandes volúmenes de desechos mineros en el territorio, constituyendo una fuente adicional de riesgo para la calidad del agua.

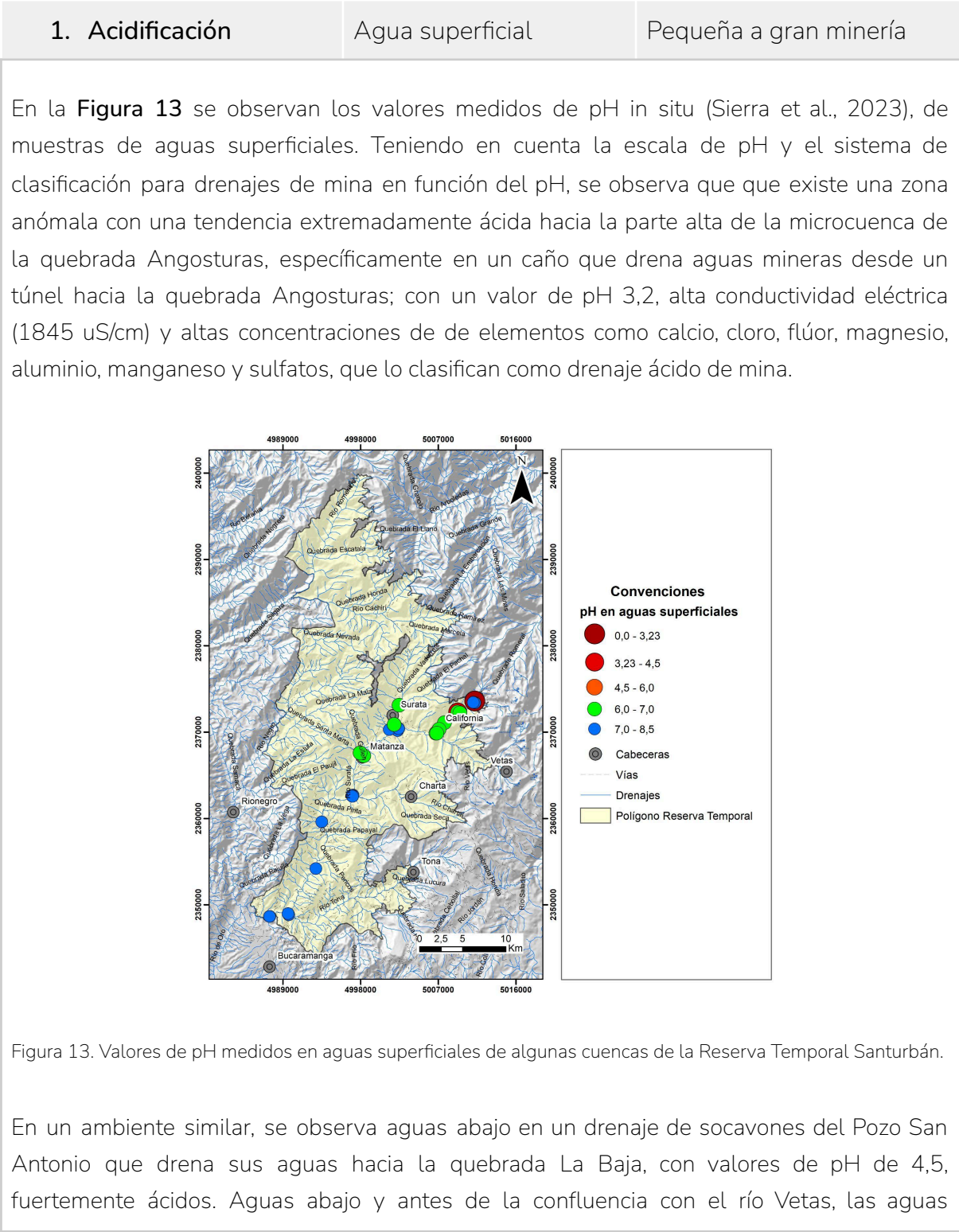


Figura 13. Valores de pH medidos en aguas superficiales de algunas cuencas de la Reserva Temporal Santurbán.

En un ambiente similar, se observa aguas abajo en un drenaje de socavones del Pozo San Antonio que drena sus aguas hacia la quebrada La Baja, con valores de pH de 4,5, fuertemente ácidos. Aguas abajo y antes de la confluencia con el río Vetas, las aguas

presentan un cambio fisicoquímico con presencia de pH entre 6 y 7. Esta tendencia de aguas con valores neutros a alcalinos se mantiene a lo largo de toda la subcuenca Suratá.

2. Acidificación	Agua subterránea	Pequeña a gran minería
<p>En el Anexo 2 se presentan datos de parámetros tomados in situ y resultados analíticos, en diversas campañas de campo del SGC (Londoño <i>et al.</i>, 2021; Cañas <i>et al.</i>, 2022; Herrera <i>et al.</i>, 2023; Sierra <i>et al.</i>, 2023) y por otras entidades (Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga [CDMB], 2014; Rivera-Sánchez y Cruz-Palencia, 2023), donde se evidencian los efectos directos que la actividad minera ha tenido sobre manantiales, pozos y cuerpos de agua superficial del sector California. Se observa la presencia de fenómenos de generación de drenajes ácidos asociados a las actividades mineras, especialmente las excavaciones. En el agua que drena por los túneles El Tigre y Veta Barro, se presentan valores críticos de pH, con 2,9 y 3,2 respectivamente (ultra ácido) y de acuerdo a la clasificación por tipo de drenajes de mina (Skousen y Ziemkiewicz (1996) son clasificados como drenajes Tipo I, correspondiente a drenaje ácido de mina. Las demás muestras de aguas presentan valores de pH inferiores a 6, siendo este el valor de referencia y clasificadas como drenajes Tipo II, lo que permite inferir que son aguas con altos contenidos de sólidos disueltos. Las aguas drenadas por las excavaciones subterráneas presentaron un pH ácido, con valores que oscilaban entre 3,1 y 5,6, incumpliendo así los límites establecidos en la normativa colombiana.</p>		

3. Movilización de EPP	Agua superficial	Pequeña a gran minería
<p>Estudios realizados por el SGC en la cuenca del río Suratá y específicamente en la subcuenca de la quebrada La Baja (Londoño <i>et al.</i>, 2021; Cañas <i>et al.</i>, 2022; Herrera <i>et al.</i>, 2023; Sierra <i>et al.</i>, 2023) y por otras entidades (Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga [CDMB], 2014; Rivera-Sánchez y Cruz-Palencia, 2023), han evidenciado cómo la minería genera impactos negativos en las aguas superficiales por un incremento en la ocurrencia de elementos potencialmente peligrosos (EPP) como arsénico, níquel, plomo, cadmio, y otros que, si bien cumplen funciones esenciales en el organismo, también pueden ser peligrosos si se presentan en exceso, tales como cobre, zinc y cromo. Este fenómeno se atribuye a las actividades propias de la minería como la apertura de túneles, la remoción de material mineralizado o no y el manejo de residuos de los procesos de beneficio tales como arenas y lodos, así como por el manejo de vertimientos. Además de generar impactos</p>		

negativos en el ecosistema, la movilización de EPP hacía los cuerpos de agua superficial y subterránea puede generar impactos en la salud cuando las aguas contaminadas se usan para consumo o para regar suelos agrícolas. La magnitud de este impacto se cuantifica con base en las concentraciones que superen los valores máximos de referencia en agua y consumo humano (Resolución 2115 de 2007) (Minsalud y Minambiente, 2007), uso doméstico y agrícola (Decreto 1076 de 2015, Art.2.2.3.3.9.3) (MADS, 2015a), la Resolución 0631 de 2015 (MADS, 2015b) para sustancias de interés sanitario en los vertimientos y el valor de referencia para sedimentos según del Atlas Geoquímico de Colombia (Pérez et al., 2020).

4. Movilización de EPP	Agua subterránea	Pequeña a gran minería
<p>En las bocaminas El Tigre y Los Sapos, pertenecientes a la pequeña minería y actualmente abandonadas, se registran algunos de los valores de pH más bajos en los estudios realizados por el SGC (Cañas et al., 2022; Herrera et al., 2023). Esta acidez indica un impacto significativo de la minería en el drenaje del agua, por posibles descensos de los niveles freáticos y a la exposición de minerales sulfurados al aire y al agua. Además, se presentan cargas iónicas muy altas, con conductividades eléctricas superiores a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y concentraciones de arsénico, cadmio (Figura 14 y 15), cobalto, cobre, níquel, sulfatos, hierro, manganeso, fluoruros y aluminio, en muchos casos por encima de los límites máximos permisibles de la Resolución 2115 de 2007.</p> <p>Desde una perspectiva global, el estudio del SGC evaluó el comportamiento y la variabilidad de las concentraciones de EPP como arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu) y níquel (Ni). Para este análisis, el área de estudio se dividió en tres sectores: parte alta, media y baja.</p> <p>En la parte alta, las concentraciones de EPP en las muestras de agua superficial no superan los límites normativos, salvo en La Perezosa y Los Sapos, donde se registran niveles elevados relacionados con actividades mineras. Estos socavones fueron ampliados por la actividad de exploración de la empresa Eco Oro, sin embargo fueron utilizados para la explotación por pequeños mineros posteriormente. En la parte media, especialmente en el sector Barrientos, las concentraciones de EPP son más altas y superan los límites normativos, probablemente debido a la presencia de minas y anomalías de uranio. La parte baja muestra una disminución significativa en las concentraciones de EPP, probablemente debido a la dilución por el río Vetás, los afluentes de la quebrada La Baja y la precipitación.</p>		

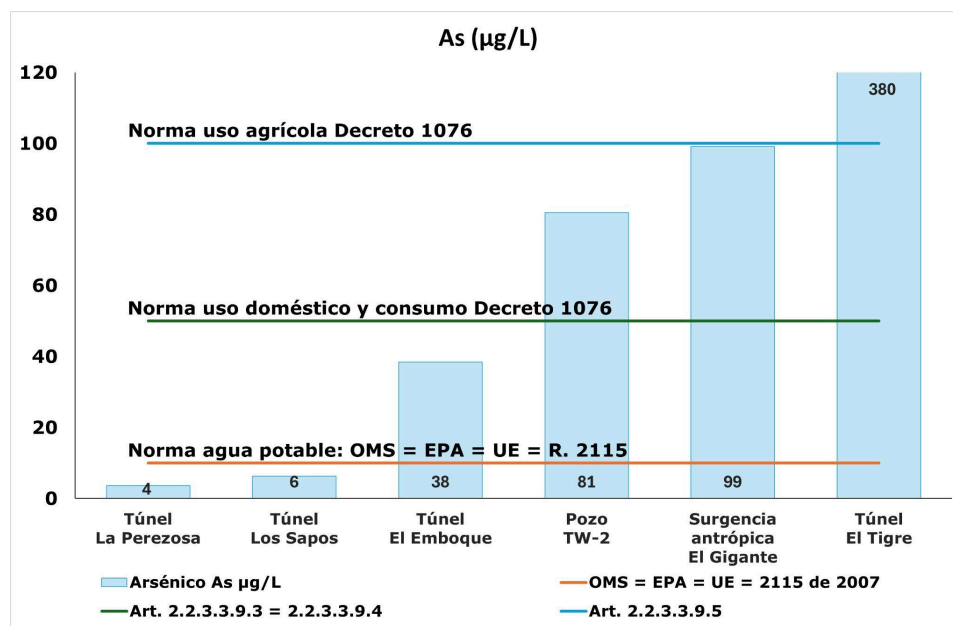


Figura 14. Valores de arsénico y cadmio en algunos puntos de agua ubicados en la zona. Fuente: Elaboración propia.

En conclusión, los drenajes ácidos de mina y la surgencia antrópica termal aportan EPP a las fuentes superficiales de la zona. También se observa un proceso de dilución que reduce la concentración de metales como arsénico, cadmio, cobre y níquel en la parte baja del área.

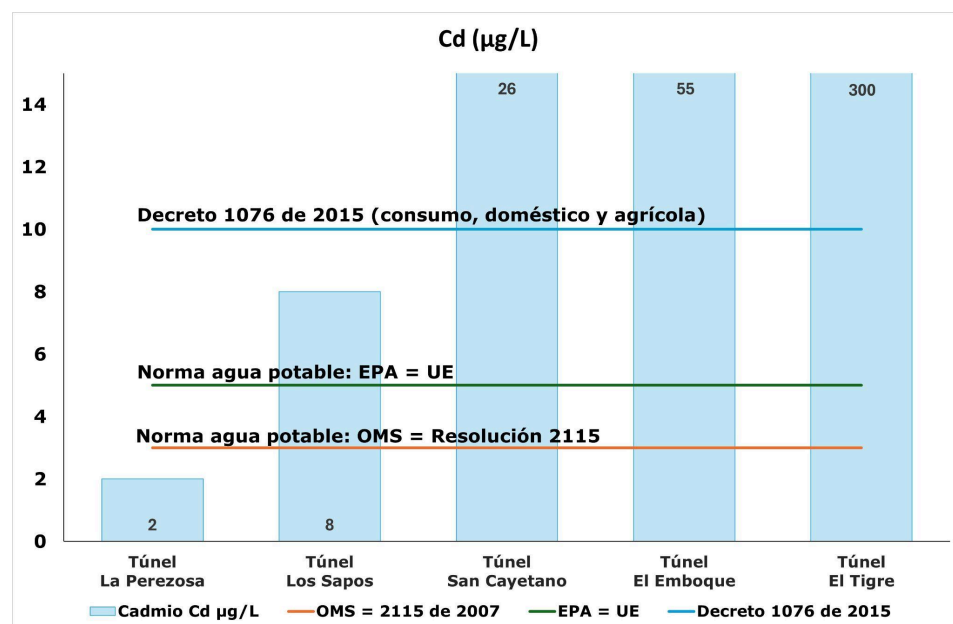


Figura 15. Valores de arsénico y cadmio en algunos puntos de agua ubicados en la zona. Fuente: Elaboración propia.

5. Residuos generadores de DAM Mediana y gran minería

De acuerdo a los valores consignados en el EIA de MINESA (2020), refieren una capacidad para los depósitos de desechos de roca o botaderos de 2 millones de toneladas, correspondiente a excavación de los túneles.

La roca sobrante se divide en dos dominios litológicos, según los tipos de roca de caja que albergan la mineralización: el dominio sedimentario y el dominio ígneo-metamórfico. El dominio ígneo-metamórfico incluye los neis de Bucaramanga, anfibolitas, intrusivos y brechas hidrotermales, que son las rocas donde se desarrolla toda la mina subterránea. De este dominio se genera roca sobrante proveniente de los desarrollos de no producción y preparación, así como parte de los túneles gemelos. El dominio sedimentario corresponde a las rocas del Cretácico, donde se genera roca sobrante durante la construcción de los túneles gemelos.

En los neis se identificaron sulfuros -generadores potenciales de acidez- como pirita en concentraciones que varían entre 0,7 y 4,7% y calcopirita (0,06%). Del grupo de carbonatos -neutralizadores- solo se detectó ankerita en muy bajas concentraciones (0,7 %). Las anfibolitas exhiben igualmente pirita (1,3%) y calcopirita (0,03%) y los minerales carbonatados calcita (2%) y dolomita (1,2%). Para los intrusivos no se detectaron carbonatos y el único sulfuro lo constituye la pirita (1%). En consecuencia, la evaluación ABA indica que la mayoría de los materiales de roca sobrante analizados presentan un alto potencial de generación de acidez y algunos pocos muestran características inciertas de generación de DAR, o nulo potencial de generación de acidez.

6. Residuos generadores de DAM Pequeña minería

Para evaluar cuantitativamente el fenómeno de generación de aguas ácidas, se tomaron muestras puntuales de algunos relaves de las plantas de beneficio La Laguna y La Oquenda (municipio de Suratá), La Providencia y San Marcos (municipio California) y Trompetero (municipio Vetás) (Londoño et al., 2021). Todas las muestras fueron analizadas mediante las pruebas estáticas o test ABA, cuyos valores de pH se presentan en la **Figura 16**.

Con respecto a las clasificaciones de los tipos de drenajes según los valores de pH (Skousen y Ziemkiewics (1996) en Aduvire (2006)), en los relaves medidos se observa una tendencia neutra a alcalina (pH mayor a 6) en las plantas localizadas en el municipio de vetas y en la planta La Oquenda del municipio de Suratá. Por otro lado, las plantas La Laguna (Suratá) y

San Marcos en el municipio de California, los valores son ácidos a muy ácidos (<4,5) ligeramente ácidos.

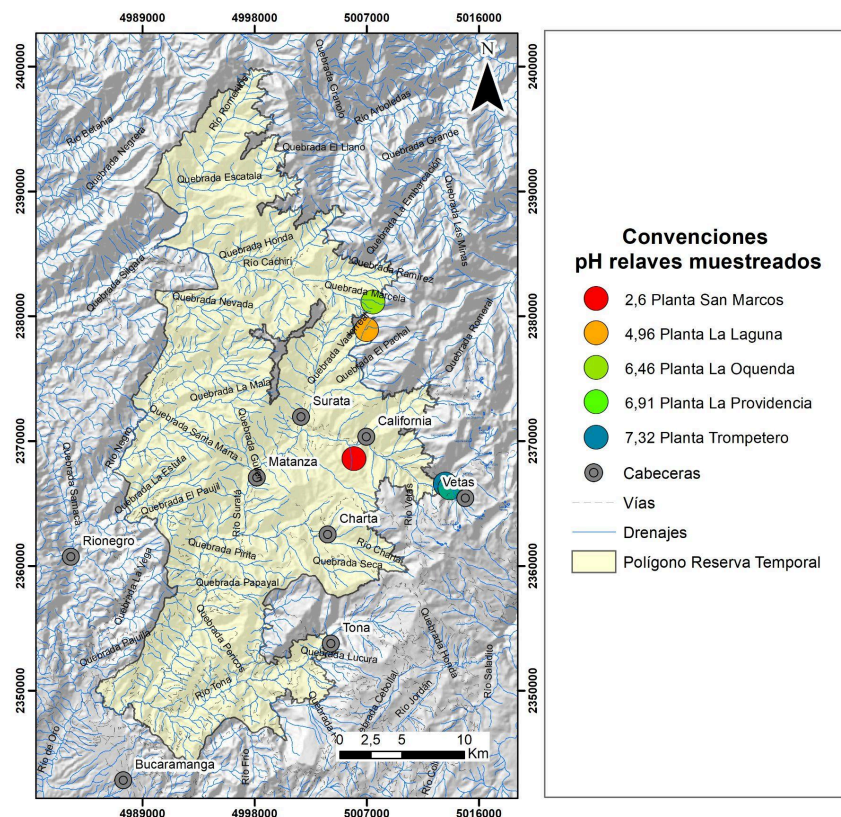


Figura 16. Valores medidos de pH en algunos relaves de las plantas de tratamiento de la región

Si bien algunos de los valores de pH tienden a la neutralidad, los resultados del PNN en los relaves analizados, exponen valores de tendencia negativa. Cuando el valor es negativo indica que hay un excedente de PA y por lo tanto en las zonas evaluadas los diversos materiales geológicos están produciendo un exceso de acidez y en ningún caso alcanzan a ser neutralizados por los bajos contenidos de carbonatos presentes.

Impactos relacionados a los procesos de beneficio

La minería de oro en Colombia es una actividad productiva desarrollada, en la mayoría de casos, de manera artesanal y a pequeña escala (Ofosu 2020, Minminas 2016). Esta actividad genera el sustento para muchas comunidades de Colombia, siendo la base de la economía en diversas regiones, entre ellas en el DMVC. Sin embargo, trae consigo impactos ambientales negativos debido a la baja tecnificación, el uso de insumos altamente tóxicos para la salud humana y el medio ambiente, la falta de métodos para el tratamiento adecuado de aguas, y la disposición inadecuada de residuos sólidos y líquidos generados en el proceso metalúrgico. La

disposición inadecuada de las aguas residuales con cianuro y otros elementos metálicos potencialmente peligrosos como plomo (Pb), cadmio (Cd), arsénico (As), zinc (Zn) y mercurio (Hg), entre otros, representa un factor de riesgo significativo para los seres humanos, la flora y la fauna, dada la repercusión de estos contaminantes sobre su metabolismo.

En el contexto nacional, se han identificado diferentes procesos para el beneficio del oro que involucran la metalurgia extractiva. Estos procesos se basan en cambios físicos y fisicoquímicos para la obtención del oro e incluyen la concentración gravimétrica, la flotación de sulfuros, la centrifugación, la amalgamación y la cianuración. Todos estos procesos tienen consecuencias ambientales debido al uso de elementos como el mercurio para la amalgamación, el cianuro para la lixiviación del oro, la generación de residuos sólidos minerales y de aguas residuales con concentraciones tóxicas de metales pesados y cianuro, así como niveles de turbiedad que pueden afectar los ecosistemas acuáticos donde se realizan los vertimientos. La mejora de estos procesos es posible, por ejemplo mediante alternativas como el uso de floculantes y coagulantes para la separación física de los minerales de interés (Pearse, 2003). El SGC ha investigado los procesos gravimétricos y de flotación para beneficio de oro en el DMVC teniendo en cuenta la composición mineralógica local (Candela et al., 2024).

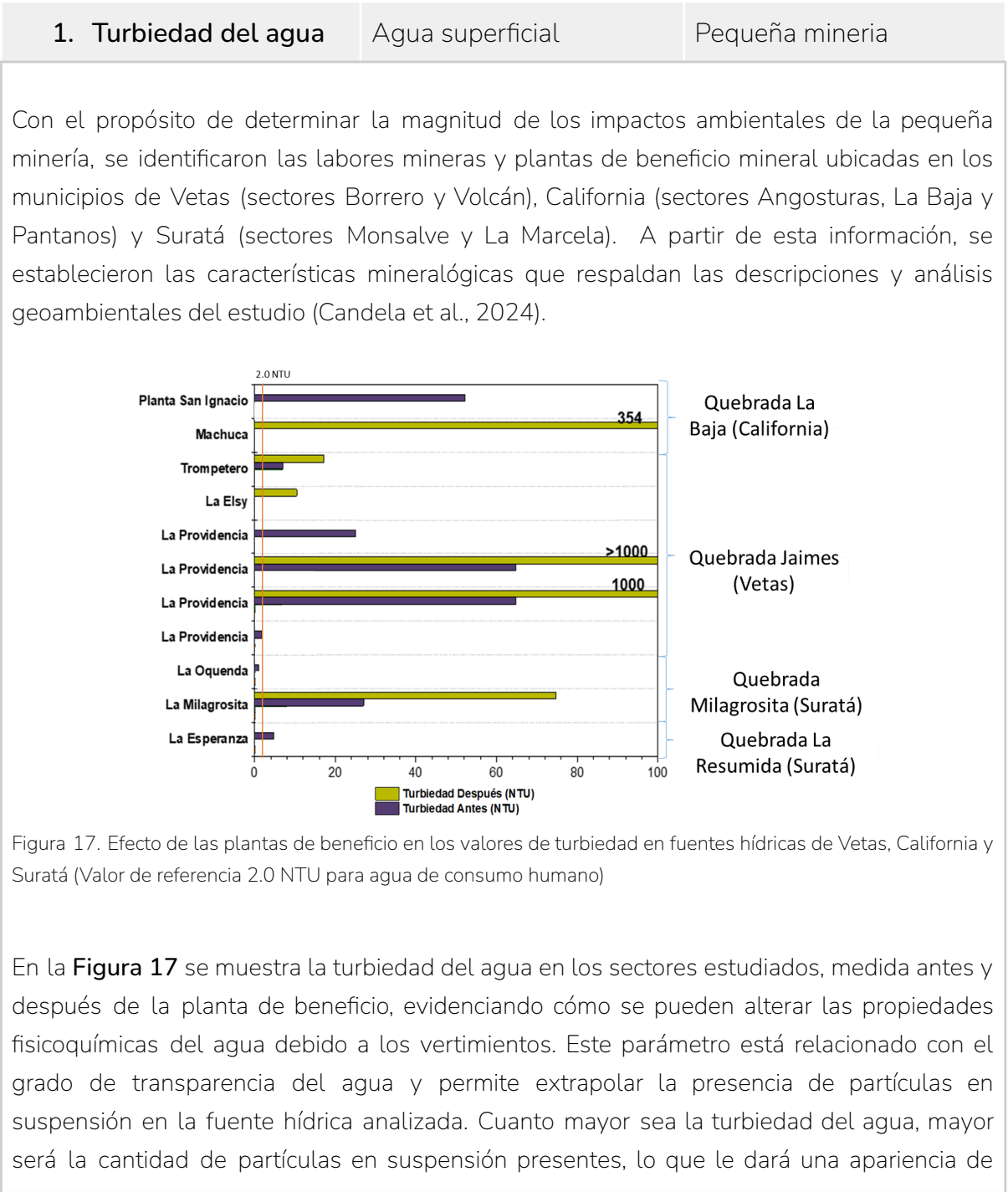
Si bien a través de la Ley 1658 de 2013 está prohibido el uso de mercurio en el país, en la práctica y bajo el contexto de la actividad minera informal, este sigue siendo utilizado para el proceso de amalgamación (Güiza & Aristizabal, 2013). Otros elementos potencialmente peligrosos, de interés sanitario para vertimientos, son regulados por la Resolución 0631 de 2015.

En el contexto de estos procesos y sus impactos, en el año 2021 se llevó a cabo el proyecto de Mapa Geometalúrgico y Geoambiental de Minerales de Colombia (Candela et al., 2024) Este estudio se centró en la identificación de la composición mineralógica de los yacimientos mineros, considerando que estos son insumos fundamentales para los procesos de beneficio de minerales y la obtención de oro, así como en las implicaciones ambientales derivadas de las actividades mineras. Los estudios geoambientales se basaron en la caracterización fisicoquímica de matrices de interés en esta área, que tienen incidencias en el ambiente y en la salud humana. En este sentido, se llevó a cabo la identificación visual de posibles esferas del ambiente afectadas por las actividades de explotación y beneficio minero, tales como agua y suelo. Para cumplir con este propósito, se utilizaron herramientas de georreferenciación y la guía de los habitantes locales, para llegar hasta las fuentes hídricas superficiales influenciadas y sitios generadores de sustancias nocivas tanto para estas como para los sedimentos activos y los suelos aledaños.

Si bien en este momento solo se tienen algunos datos e indicios para la pequeña minería que se presenta en la zona, no se debe entender que la mediana y la gran minería no tengan el potencial de generar impactos sobre el medio ambiente relacionados con los procesos de

beneficio. La existencia de condiciones de informalidad y el contexto socioambiental del territorio donde se propone la reserva complejizan el análisis de los posibles impactos diferenciales según la escala de la actividad minera.

Con relación al proceso de beneficio del mineral, se han documentado graves problemas en la cuenca del río Suratá, principalmente debido al uso de mercurio (Ruiz, 2021). La Procuraduría General de la Nación (PGN) ha alertado sobre esta contaminación y ha formado mesas de trabajo con más de 40 entidades para abordar la minería informal y sus efectos (PGN, 2023)



suciedad. El efecto principal de esto es la limitación del paso de luz en el medio acuoso, lo cual restringe la actividad biológica de microorganismos, plantas y algas, y deriva en la reducción del oxígeno disuelto. Según la norma colombiana de agua potable, se requiere que los afluentes presenten turbiedades de un máximo de 2 unidades.

Solamente las quebradas La Resumida y La Marcela de Suratá cumplen con el parámetro de calidad. Para las otras zonas la turbiedad sobrepasa los límites establecidos por la norma colombiana, lo que puede representar un factor de riesgo para la flora y fauna debido a la presencia de sólidos suspendidos. Estos sólidos, producto de las descargas de plantas y entables, limitan el paso de la luz solar hacia el cuerpo hídrico y pueden dificultar los procesos de potabilización.

2. Introducción de EPP	Agua superficial	Pequeña minería
<p>Durante el proceso de beneficio para obtener los minerales de interés se pueden utilizar sustancias potencialmente peligrosas para la salud humana y de los ecosistemas. Aunque el mercurio está prohibido en cualquier actividad de extracción o beneficio, investigaciones realizadas por el SGC (Sierra et al. 2023) y la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB, 2014), en distintos puntos de la cuenca del río Suratá, han reportado concentraciones por encima de los valores máximos permisibles en aguas y de valores de referencia para sedimentos (Mendoza et al. 2020). Adicionalmente, en el trabajo de grado realizado por estudiantes de la UTS en convenio con la CDMB (Rivera-Sánchez y Cruz-Palencia, 2023), se identificaron y categorizaron los impactos ambientales sobre el componente hídrico de la quebrada La Baja.</p> <p>El río Vetás, afluente del río Suratá, abastece al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB). Los monitoreos realizados por el AMB allí han registrado niveles preocupantes de mercurio, especialmente desde mediados de 2022. El 28 de julio de ese año, se detectaron 163 µg/L de mercurio, muy por encima del límite permitido de 1 µg/L y el nivel más alto en los últimos 15 años. Esta situación ha llevado al cierre temporal de las compuertas de captación en la bocatoma del río Suratá (Galvis Ramírez & Cia S.A., 2023).</p>		

3. Introducción de EPP	Aguas y suelos	Mediana y gran minería
<p>Respecto a la gran y mediana minería, aún no existen proyectos representativos que permitan evaluar y cuantificar este impacto. No obstante, es necesario indicar que potenciales</p>		

proyectos como Angostura (Greystar, 2009), llegaron a plantear el uso de sustancias cianuradas para el beneficio del mineral en pilas de lixiviación, lo que también representa un factor de riesgo de contaminación y dispersión de elementos potencialmente peligrosos en aguas y suelos, los cuales pueden afectar ecosistemas y comunidades humanas.

4. Residuos generadores de EPP

Mediana y gran minería

Los relaves constituyen un impacto en sí mismos, al ser depósitos de materiales que ocupan un espacio y son a la vez fuente de EPP: durante esta actividad minera, los minerales extraídos quedan expuestos a un ambiente oxidante, resultando en su desestabilización o solubilización y consecuente liberación de elementos.

De acuerdo a los valores consignados en el EIA de Minesa (2020) durante el proceso de beneficio del proyecto de Soto Norte (compósito Mascota y Gigante), se estima una capacidad para el depósito de relaves, de aproximadamente 50 millones de toneladas.

De la mineralogía caracterizada para los relaves de los compósitos maestros de Mascota y Gigante se infiere que la gran mayoría de sulfuros de cobre (~99,9 %) y pirita (~98 %) son recuperados en los concentrados; únicamente un 1,8 % y 2,5 % de la pirita inicial se encuentra en relaves (colas). En consecuencia, el fenómeno de generación de EPP por oxidación de sulfuros, aunque es susceptible de generación, tiene una relevancia limitada.

Por otro lado, aunque en los procesos de flotación se concentran los sulfuros metálicos, las sulfosales no son concentradas a través de este método. De acuerdo con la mineralogía identificada en la mineralización del sistema mineral de la zona (ver apartado de contexto de sistema mineral), en la que se reconocen sulfosales de arsénico y antimonio tales como enargita-famatinita, tetraedrita-tenantita, golfdita y pearceíta-polibasita, se infiere la posible presencia de éstos elementos potencialmente peligrosos en los relaves resultantes del proceso, compuestas, de manera general, principalmente por silicatos.

5. Residuos generadores de EPP

Pequeña minería

Los relaves, formados a partir de residuos sólidos de los procesos de beneficio, pueden representar un peligro significativo para el medio ambiente si no se tratan adecuadamente o

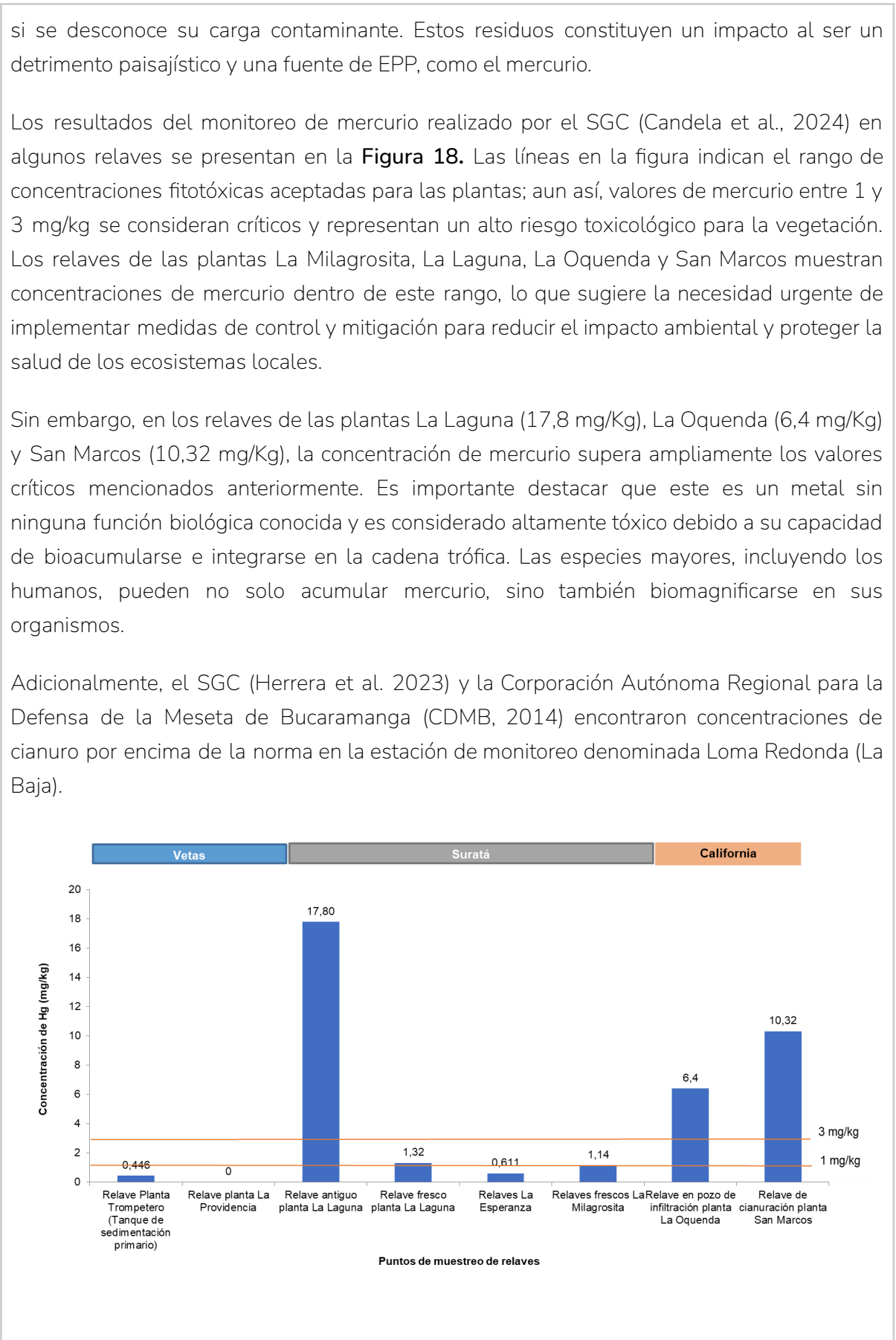
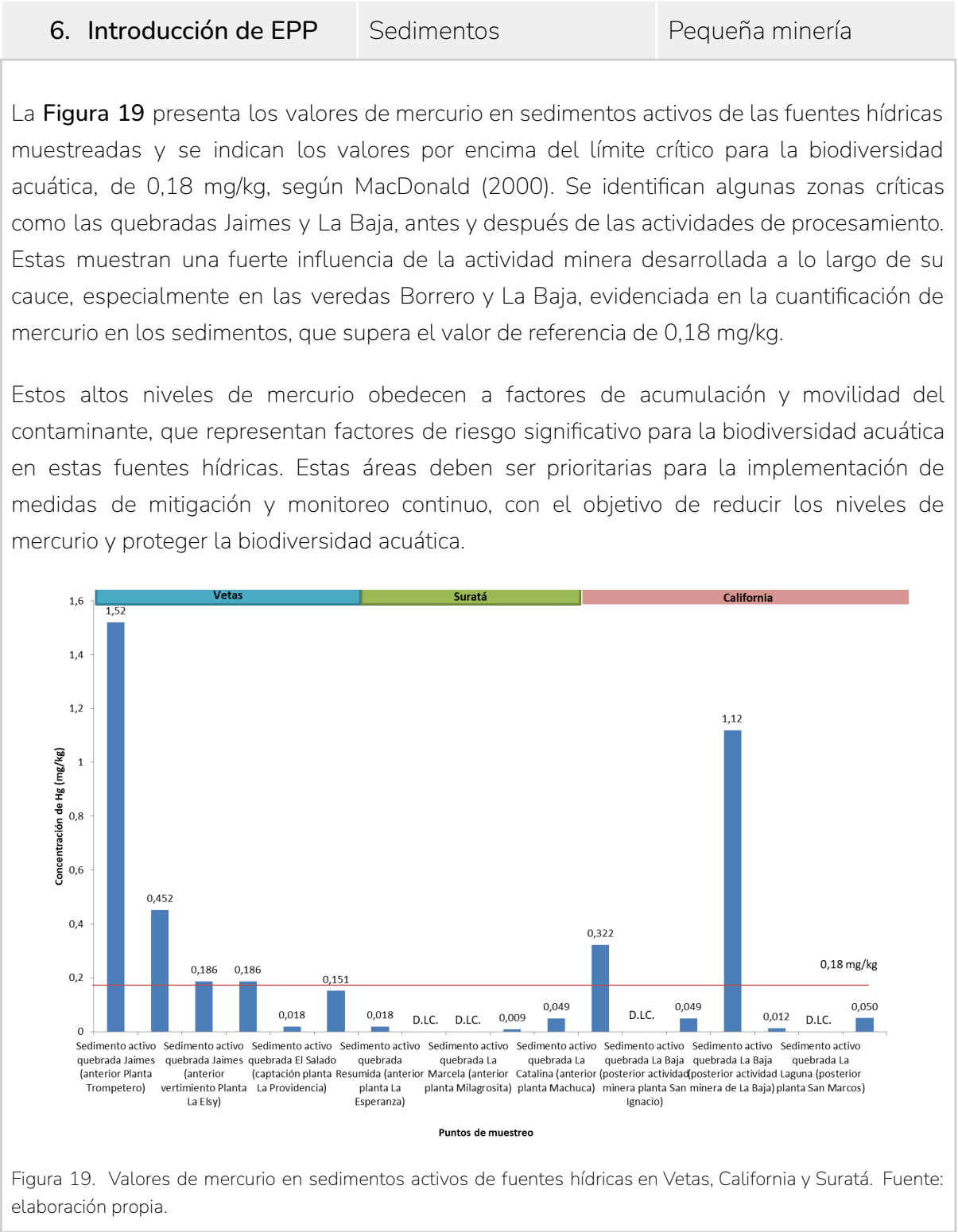


Figura 18. Valores de mercurio en relaves de plantas de beneficio y su impacto fitotóxico en plantas. Fuente: elaboración propia.



9. Impactos y riesgos geoquímicos en la salud

La evaluación de los impactos ambientales y de salud asociados a la contaminación por presencia de elementos químicos en altas concentraciones en una zona determinada tiene como referencia para su estudio, tanto los factores geológicos naturales como aquellos derivados de la actividad humana. Es por esto que se hace necesario identificar los mecanismos de transporte y acumulación de estos elementos desde su origen, hasta su interacción con los organismos vivos. La toxicidad de un mineral depende de diversas propiedades como son: su composición química, tamaño de partícula y capacidad de interacción con tejidos biológicos. Estos factores, junto con la vía de exposición y la dosis, determinan la magnitud de los efectos adversos en la salud (Pozo Rodríguez y Carretero León, 2007).

El SGC ha realizado diferentes estudios para la identificación de EPP en la cuenca del río Suratá. Es así como conocemos de la presencia de los minerales radiactivos en zonas específicas del distrito minero Vetas-California, pero no conocemos su migración y dispersión en las aguas para consumo humano (Bautista, et al., 2006). También, y a partir de un diagnóstico geoquímico ambiental de la cuenca del río Suratá (Sierra, et al., 2023), se pudieron identificar concentraciones anómalas de elementos potencialmente peligrosos (mercurio, arsénico, níquel, plomo, cadmio y cianuro, y de elementos esenciales como cobre, cinc y cromo) en aguas y sedimento en concentraciones que podrían generar afectaciones en la salud de las personas.

Estas altas concentraciones están relacionadas con el desarrollo de la actividad minera, por la cual se da la liberación al ambiente de los EPP que contienen las rocas a través la generación de drenajes ácidos que descargan al río Suratá, así como por la liberación de polvo con contenidos de estos elementos; también por el uso de sustancias que representan amenazas a la salud y que son empleadas para el beneficio minero, como cianuro y mercurio. Especial atención requiere la radiación natural emanada de las rocas con contenidos altos de minerales radioactivos. Es importante destacar que la presencia de concentraciones elevadas de elementos potencialmente peligrosos en un área determinada no equivale automáticamente a un riesgo para la salud. La evaluación de riesgos requiere considerar múltiples factores como las características fisicoquímicas (especiación), el perfil toxicológico de los contaminantes, las vías de exposición, los factores demográficos y socioeconómicos.

El tipo y la magnitud de las actividades que pueden alterar la matriz geológica para generar una exposición a EPP no son los determinantes únicos que permiten evaluar el grado de afectación a la salud generado por los minerales y los elementos químicos que los componen. Las diferencias se pueden asumir con base en la variedad existente en la composición geoquímica del territorio, pues según la región terrestre considerada, las rocas pueden ser

sustancialmente distintas y la disponibilidad potencial de los componentes químicos será diferente, esto explica la existencia de zonas de déficit o exceso de determinados elementos (Pozo Rodríguez y Carretero León, 2007). Otro aspecto que puede marcar diferencias dentro de las actividades mineras es por ejemplo, el uso de sustancias de sustancias prohibidas (como el mercurio) para el beneficio de oro y los volúmenes de material extraído y la forma en que se hace disponible al ambiente.

Los impactos de la minería en la salud humana se reflejan en efectos adversos que pueden surgir de forma directa o indirecta. Los efectos directos ocurren cuando los trabajadores, ya sea formales o informales, están expuestos a diversos químicos durante sus labores, o cuando las comunidades cercanas a las zonas mineras están expuestas a contaminación en el aire, agua o suelo. Además, se pueden generar efectos indirectos debido a cambios en el uso del suelo, condiciones laborales y dinámicas sociales que pueden afectar la salud mental tanto de individuos como de comunidades enteras (MADS, 2016).

Los materiales radiactivos de origen natural comprende los radionúclidos asociados a la cadena de decaimiento de uranio (^{238}U), torio (^{232}Th) y potasio (^{40}K) (IAEA, 2003). La distribución de los radionúclidos en la geoesfera depende principalmente de la litología (composición de las rocas) y su acumulación posterior depende de procesos secundarios como la formación de suelo y estructuras geológicas y por último en actividades antrópicas (Cinelli et al., 2019). Igualmente, las actividades industriales que contienen materiales radiactivos de origen natural, a causa de la acumulación de los mismos son: extracción de elementos de tierras raras, producción y uso de torio, niobio y ferroniobio, minería de metales, producción de hidrocarburos y otras industrias como del zircón, titanio, fosfatos, cobre, aluminio, zinc, carbón y tratamiento de aguas residuales (IAEA, 2013; UNSCEAR, 2000).

Riesgos para la salud debido a la exposición a elementos radiactivos

La distribución de los radionúclidos en la geoesfera depende principalmente de la litología (composición de las rocas) y su acumulación posterior depende de procesos secundarios como la formación de suelo y estructuras geológicas, y actividades antrópicas (Cinelli et al., 2019).

Actividades mineras como el descapote, la construcción de vías e infraestructura minera, los procesos de beneficio mineral (IAEA, 2013), el tratamiento de aguas y efluentes e incluso la liberación de gases, pueden dar origen a la exposición de radionúclidos de ocurrencia natural como potasio (K), uranio (U), torio (Th) y sus productos de decaimiento como radio (Ra) y radón (Rn), entre otros.

Es importante generar y seguir una metodología sistemática para la identificación de materiales radiactivos de origen natural - NORM (Michalik, B. et al., 2023; Popic, J. et al., 2023)

y realizar el inventario nacional que reporte las actividades industriales que generan su acumulación.

Dado que en Colombia no existe un modelo metodológico estandarizado para el muestreo y caracterización de NORM, el SGC diseñó, para el estudio de la interacción agua-geología y la caracterización radiológica en el páramo de Santurbán, una metodología rigurosa y adaptada a las condiciones específicas de la región (**Figura 20**), la cuál se enfoca en el muestreo y la caracterización de materiales, integrando criterios geológicos, radiológicos y normativos, empleando específicamente técnicas radiactivas y nucleares (Muñoz-Rocha et al., 2024), bajo las recomendaciones internacionales del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la norma del Organismo Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés), ISO/IEC 17025:2017 (ISO, 2005).

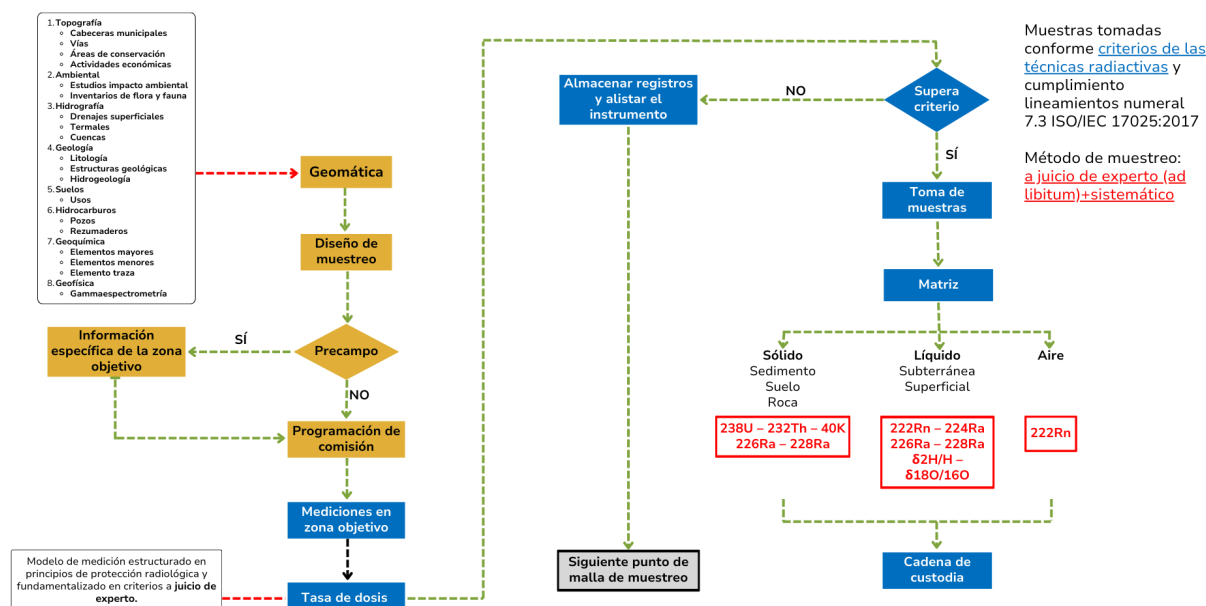


Figura 20. Modelo metodológico de muestreo y análisis NORM.

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) recomienda un límite de dosis efectiva anual para el público en general de 1 milisievert (mSv). Si se superan los valores de exposición "normales" a la radiación gamma proveniente de NORM, pueden surgir efectos adversos a la salud humana, cuya gravedad depende de la dosis y duración de la exposición. A largo plazo, incluso exposiciones bajas pero prolongadas pueden aumentar el riesgo de desarrollar cáncer, cataratas y enfermedades cardiovasculares. Grupos vulnerables como niños, mujeres embarazadas y fetos son especialmente susceptibles. Por tanto, es fundamental implementar medidas de prevención y mitigación para minimizar la exposición a la radiación en áreas afectadas por actividades mineras, especialmente para proteger a los grupos más vulnerables.

Los impactos que se documentan a continuación se basan en mediciones *in situ* en suelo, roca y matriz líquida por medio del equipamiento BGO-RS-230, un equipo de espectroscopía gamma de centelleo que posee capacidades de análisis para determinar la masa de U (ppm), Th (ppm) y K (%), empleado para estudiar la concentración y distribución de estos radionúclidos, y el Identifinder2 R-400, que permite detectar radionúclidos emisores gamma NORM. Los resultados se presentan en mSv/a (mili Sievert por año).

1. Exposición radiactiva

Pequeña a gran minería

Los mapas de interpolación de la tasa de dosis, generados a partir de las mediciones *in situ*, permiten visualizar la distribución espacial de la radiación gamma (Cinelli et al.i, 2019), en este caso en la cuenca del río Suratá y la quebrada La Baja (Muñoz-Rocha et al., 2024). Estos mapas muestran una clara influencia de la geología y los procesos superficiales (meteorización, reptación del suelo) en la distribución de los radionucleidos (**Figura 21**).

En la RTS predomina la radiación gamma debido a uranio y potasio sobre la cuarzomonzonita del Granito de Pescadero, en centro de la zona de estudio, mientras que los aportes a la radiación gamma debido a torio en superficie se dan sobre las unidades sedimentarias subyacentes al municipio de Suratá y sobre el Neis de Bucaramanga, en el sector de las lagunas de Páez, en los extremos suroeste y noreste.

Convenciones

- Minas
- Cabecera municipal
- Drenajes
- Delimitación Páramo
- * Medición Radiométrica
- IsoDosis

Tasa de Dosis Efectiva mSv/a

- 0,091 - 0,1
- 0,101 - 0,15
- 0,151 - 0,2
- 0,201 - 0,25
- 0,251 - 0,3
- 0,301 - 0,35
- 0,351 - 0,4
- 0,401 - 0,45
- 0,451 - 0,5
- 0,501 - 0,55

* Valor promedio mundial: 0,07 mSv/a

SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO

Figura 21. Mapa de medición de tasa de dosis (mSv/a) en la cuenca La Baja.

En el tramo que comprende la población de La Baja hasta la quebrada de Angostura, una tendencia hacia el este (E), de incremento en los valores de tasa de dosis gamma, se evidencia igualmente para los valores de concentración de uranio, torio y potasio. Este efecto de incremento parece tener relación con la mayor exposición de roca en superficie a causa de la actividad minera asociada a los socavones (**Figura 22**). Pese a esta tendencia, los mayores

registros se hallaron en el sector de la población de La Baja, especialmente hacia la mina Azul a 180 m al norte del casco urbano, donde se registran las mayores anomalías.

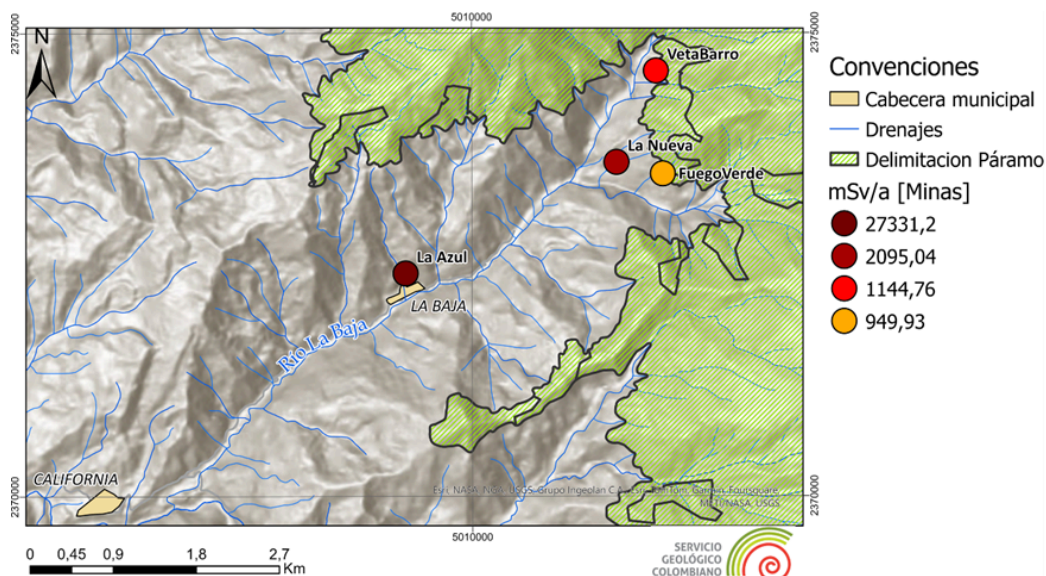


Figura 22. Mapa de medición de tasa de dosis (mSv/a) en los socavones.

Riesgos para la salud debido a la exposición a otros EPP

El diagnóstico geoquímico ambiental de la cuenca del río Suratá realizado por el SGC (Sierra et al. 2023), identificó concentraciones anómalas de elementos potencialmente peligrosos en el análisis de muestras de agua y sedimento: las concentraciones halladas de mercurio, arsénico, níquel, plomo, cadmio y cianuro, y de elementos esenciales como cobre, zinc y cromo, podrían generar afectaciones en la salud de las personas. Algunos de los elementos químicos encontrados, en particular el arsénico, encabezan la lista de sustancias más tóxicas y peligrosas para la salud (ATSDR, 2019). Según el estudio, esto puede ser consecuencia de drenajes ácidos en zonas de influencia de la actividad minera.

Adicionalmente, en los sedimentos se hallaron importantes concentraciones de mercurio, posiblemente relacionado con actividades de minería artesanal e informal en la subcuenca de la quebrada La Baja, así como concentraciones elevadas de cianuro total en agua, químico usado para el proceso de beneficio del oro. El mercurio ha sido investigado con particular interés debido a su reconocida toxicidad aguda y crónica, en varios países suramericanos que cuentan con una significativa producción aurífera (De Miguel et al., 2014).

La evaluación de los posibles riesgos para la salud humana debido a EPP asociados a esta actividad, implica determinar la identidad y el alcance de los elementos químicos, caracterizar su toxicidad y estimar la magnitud de su exposición a la población local, tanto en la población ocupacionalmente expuesta, como en la exposición ambiental. Teniendo en cuenta lo

mencionado anteriormente, es importante tener presente los posibles efectos a la salud por los EPP identificados en el área, los cuales se plasman en las **tablas 2 y 3**.

Tabla 2. Elementos potencialmente peligrosos y efectos tóxicos asociados. Adaptado de Pozo Rodríguez y Carretero León (2007).

Efecto tóxico	Elemento
Neurotoxicidad	Mercurio, arsénico, níquel, plomo, cadmio, zinc, hierro, manganeso, cobalto.
Hepatotoxicidad	Arsénico, hierro, molibdeno, cromo.
Nefrotoxicidad	Arsénico, mercurio, plomo, cadmio, cromo, molibdeno.
Cardiovasculotoxicidad	Arsénico, cadmio, cobalto.
Dermatotoxicidad	Arsénico, níquel, zinc, cromo, cobalto.
Inmunotoxicidad	Mercurio, arsénico, plomo, estaño, cobalto, níquel, cadmio, cromo.
Carcinogenicidad	Arsénico, plomo, cadmio, níquel, cromo.
Hematotoxicidad	Arsénico, plomo, cobre, hierro, molibdeno.
Gastrotoxicidad	Arsénico, plomo, cadmio, zinc, cadmio, cobre, hierro, cobalto.
Embriotoxicidad	Arsénico, plomo, cadmio, zinc, selenio, molibdeno.

Los elementos esenciales identificados en la cuenca que pueden generar efectos adversos, tanto por deficiencia fisiológica como por exceso, se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Efectos adversos generados por deficiencia y exceso de elementos esenciales. Adaptado de Pozo Rodríguez y Carretero León (2007).

Elemento	Deficiencia	Exceso
Cobre	Anemia, despigmentación, pérdida de elasticidad arterial, reducción del crecimiento	Desórdenes del metabolismo del cobre (enfermedad de Wilson). Cirrosis hepática.
Zinc	Falta de apetito y reducción del crecimiento (enanismo), acrodermatitis enteropática, retraso en el crecimiento de las gónadas.	Irritabilidad, náuseas, fiebre metálica, diarrea.
Cromo	Arteriosclerosis, trastornos en el metabolismo de la glucosa.	Necrosis renal.

La relación entre la exposición a elementos químicos y la actividad económica realizada por los habitantes de la zona de interés debe tenerse en cuenta para evaluar el riesgo para la salud ocasionado por EPP. Florez-Vargas et al. (2023) evidenciaron, para la cuenca del río Lebrija (Santander), que las personas que viven cerca de las minas de oro tenían concentraciones más altas de metales como mercurio, plomo, plata y arsénico en el cabello, a diferencia de las personas que viven cerca de las zonas agrícolas, las cuales tenían concentraciones más altas de bario y estroncio en el cabello, elementos que se encuentran comúnmente en los pesticidas. El estudio sugiere que las concentraciones de elementos químicos en el cabello están influenciadas por la actividad económica local (minería o agricultura) y las condiciones geoquímicas naturales del suelo.

A continuación se describen algunos impactos en la salud humana, identificados en la RTS o en cercanía a esta, relacionados a las actividades mineras. Aunque la cantidad de estudios en este tema particular han sido limitados, se han demostrado de manera preliminar algunas consecuencias en la salud humana debido a la exposición a EPP, en particular al mercurio.

2. Exposición a vapor de mercurio	Pequeña minería
<p>El estudio realizado por Sánchez Rodríguez et al. (2015) presenta una evidencia sólida de la exposición significativa al mercurio en trabajadores involucrados en la extracción artesanal de oro. Los mineros mostraron concentraciones considerablemente más altas de mercurio en sangre (7,03 µg/L vs. 2,46 µg/L), orina (3,96 µg/g de creatinina vs. 1,48 µg/g de creatinina) y cabello (0,79 µg/g vs. 0,39 µg/g) en comparación con el grupo de control. Estos hallazgos son consistentes con la naturaleza de su trabajo, que involucra una exposición directa a vapores de mercurio durante el proceso de amalgamación del oro. Esto, sin embargo, no implica necesariamente el desarrollo de patologías, pues como lo mostró posteriormente Sánchez Rodríguez et al. (2020), frente a la toxicidad del Hg en población minera y no minera del norte de Santander, el polimorfismo genético puede influir en el metabolismo del Hg y modular la patogénesis de la nefrotoxicidad por Hg en la población ocupacionalmente expuesta a vapores de mercurio.</p> <p>Esto explica en parte los resultados de otros estudios, como el de Ávila Gamboa et al. (2021), quienes evaluaron la exposición al mercurio en mineros de Vetás-California (grupo expuesto) y residentes de Charta (grupo control) y analizaron los niveles de creatinina, para evaluar la función renal. Los mineros mostraron niveles significativamente mayores de mercurio en comparación con el grupo control, aunque no se observaron alteraciones renales en ninguno de los grupos evaluados.</p> <p>El entendimiento más reciente sobre la asociación entre las actividades mineras y la disminución de la función renal considera que ésta es más compleja de lo que se pensaba</p>	

inicialmente. Rodríguez-Villamizar et al. (2023) proponen que los efectos combinados de varios metales pesados, como el berilio, cadmio y plomo, pueden ser más dañinos para los riñones que la exposición a un solo metal. Estos hallazgos sugieren que la sinergia entre diferentes elementos químicos puede aumentar la probabilidad de daño renal en poblaciones expuestas a la minería.

Si bien se han logrado identificar metales tóxicos en diferentes matrices ambientales de los municipios de Vetás y California, los resultados sobre los impactos en salud no son aún concluyentes. Los estudios realizados a la fecha han presentado algunas limitaciones:

- Enfoque en poblaciones ocupacionalmente expuestas: La mayoría de las investigaciones se han centrado en trabajadores de la minería, dejando de lado la evaluación de la exposición en la población general que vive en las zonas mineras.
- Limitación en los biomarcadores: Los biomarcadores utilizados hasta ahora, como el cabello, la sangre y la orina, aunque útiles para demostrar la exposición, no permiten evaluar completamente el impacto de los elementos potencialmente peligrosos sobre la salud (efectos adversos) dada por la exposición a EPP en el área.
- Falta de consideración de otras especies químicas del mercurio (metilmercurio): La mayoría de los estudios se han centrado en el mercurio elemental (prevalente en ambientes laborales), sin considerar la presencia de metilmercurio, una forma más tóxica del mercurio que puede bioacumularse en la cadena alimentaria.
- Ausencia de estudios a largo plazo: Se necesitan estudios epidemiológicos a largo plazo para evaluar los efectos crónicos de la exposición a bajas dosis de mercurio y otros elementos potencialmente peligrosos que se presentan en la cuenca del río Suratá.

Es fundamental ampliar la investigación para evaluar los efectos a largo plazo de la exposición a mezclas de metales tóxicos, incluyendo el metilmercurio, en la población general. Además, se deben desarrollar nuevas herramientas y biomarcadores para evaluar los efectos en la salud secundaria a la exposición a EPP, a través de diferentes vías y rutas de exposición. Estos estudios se podrían enfocar en la realización de proyectos de evaluación de riesgo en salud.

10. Impactos y riesgos físicos en el ambiente

La remoción física de grandes volúmenes de elementos geoambientales que configuran el suelo y el subsuelo -y son la base material de los ecosistemas- es uno de los principales

impactos de la minería, especialmente la de gran escala (Gudynas, 2015). Esta remoción o sustracción física de rocas, depósitos, suelos y agua, puede llegar a considerarse un daño ambiental de acuerdo con el artículo 42 de la Ley 99 de 1993, ya que involucra elementos que no son renovables en una escala de tiempo humana y cuya afectación es irreversible. Incluso, se puede afirmar que de este proceso de remoción física se derivan los principales impactos que tiene la minería, incluidos los desequilibrios geoquímicos que pueden ocasionar la dispersión de elementos potencialmente peligrosos para la salud ambiental y humana.

La sustracción de la base física del subsuelo implica, desde un punto de vista hidrogeológico, la pérdida de grandes volúmenes de materiales que almacenan y transmiten el agua subterránea (los acuíferos), o que cumplen un papel fundamental para su protección (los acuitardos) (Cherry & Parker 2004; Filippini et al. 2020). En ambos casos, el impacto ambiental es irreversible, dada la imposibilidad de recrear las condiciones ambientales pasadas -y los largos tiempos de formación, en escala geológica- que les dieron origen. Esto deriva también en impactos sobre la oferta y disponibilidad de agua, pues se pierde capacidad de almacenamiento en el subsuelo y se generan fenómenos como el abatimiento del nivel del agua subterránea.

Por otra parte, la remoción de grandes volúmenes de materiales geológicos y la extracción de agua como producto de las excavaciones de la minería generan cambios en las condiciones de esfuerzo y deformación de las rocas (Tajduś et al., 2021; Bell et al., 2000). La creación de cavidades y vacíos puede incidir en procesos de inestabilidad relacionados con el colapso o subsidencia del material del subsuelo (Altun et al., 2010; Bell et al., 2000). Adicionalmente, las actividades asociadas con los procesos de extracción, pueden aumentar la frecuencia y magnitud de los movimientos en masa debido a los cambios de cobertura, en las condiciones hidrogeológicas y en las solicitaciones a las que se encuentran sometidas las laderas naturales.

Como la proporción de material removido que no tiene valor económico frente a los minerales de interés tiende a ser muy alta, se generan cantidades enormes de desechos mineros (Hudson-Edwards et al., 2011; ELAW, 2010). Estos desechos, representados en botaderos o relaves, se disponen en superficie o como retrolleado de tajos abiertos y galerías de túneles (ELAW, 2010). La disposición de relaves no solo representa un factor de riesgo en términos de contaminación de aguas superficiales y subterráneas (Sharma & Al-Busaidi 2001; Kossoff et al. 2014; Wang et al. 2019), sino que en caso de presentarse la falla o colapso, podría llegar a afectar o destruir poblaciones cercanas.

En este capítulo se discuten los impactos físicos asociados a la minería y su posible expresión en el área delimitada para la reserva temporal.

Remoción y sepultamiento de elementos geoambientales

La minería, ya sea superficial o subterránea, implica la remoción física de elementos geoambientales, como suelos o rocas, que constituyen la estructura o basamento material del subsuelo. De estos grandes volúmenes de material, solo una pequeña fracción es considerada económicamente valiosa, mientras que el resto se convierte en desechos mineros que son dispuestos como botaderos o relaves. La proporción entre el material que no tiene valor económico y el mineral de interés se conoce como relación estéril/mineral o como relación de descapote, esta última para el caso de la minería a cielo abierto. No obstante, es preciso señalar la inconveniencia de denominar “estéril” al material que no contiene minerales de interés económico, en cuanto desde el punto de vista geoquímico este sí puede contener otros minerales y elementos que son de extrema relevancia para la evaluación de impactos ambientales como el drenaje ácido de mina.

La relación entre el material que no tiene valor económico y el mineral de interés tiende a ser muy alta, de tal manera que durante la explotación minera se generan cantidades enormes de desechos mineros (Hudson-Edwards et al., 2011; ELAW, 2010). En el caso de la minería de metálicos, el material que no tiene valor económico podría constituir más del 90% del material total removido (Vriens et al., 2020; Moran, 2003) y, en casos críticos, como en la explotación del oro (considerándolo un mineral aislado), la relación se encuentra alrededor de 3×10^6 (Nassar et al., 2022). Es decir, para obtener un gramo de oro, se pueden generar hasta 3 toneladas de desechos. La remoción de grandes cantidades de material tiene como consecuencia la necesidad de disponer los desechos en superficie o como retrolleado de tajos abiertos y galerías de túneles (ELAW, 2010). La práctica de disponer botaderos o relaves en superficie es común en la minería a cielo abierto y subterránea e implica el sepultamiento de otros elementos geológicos como suelos, rocas, corrientes de agua, entre otros. Es decir, se pueden delinear zonas en las cuales, aun cuando no existe una remoción del material del subsuelo, este queda sepultado bajo grandes volúmenes de desechos, lo cual constituye un impacto que altera el paisaje y múltiples dinámicas naturales como la infiltración del agua.

En cuanto a los contrastes entre la minería a cielo abierto y la subterránea, desde un punto de vista relativo, los volúmenes de remoción de materiales en la última tienden a ser menores, en cuanto hay un acceso directo al yacimiento de interés que no implica la remoción total de elementos geoambientales como los suelos (ELAW, 2010). Por otra parte, la minería a cielo abierto implica una modificación directa de la topografía y la alteración de las geoformas. En el contexto de explotaciones a cielo abierto con métodos altamente invasivos, como la remoción de cimas o cumbres de montaña, han sido documentadas alteraciones significativas de las geoformas (Maxwell & Strager, 2013) y la desaparición de manantiales o corrientes de agua, ya sea por la remoción directa de los materiales geológicos de la montaña o por sepultamiento bajo grandes espesores de desechos mineros en los valles (U.S. EPA, 2011).

Aunque la minería subterránea implica menores alteraciones en la superficie, existen impactos diferenciales que se podrían magnificar de acuerdo con el tipo de minería (Samimi et al., 2011).

Por ejemplo, en el caso de la subterránea, existen mayores riesgos en términos de seguridad de las operaciones mineras (ELAW, 2010) y de fenómenos como la subsidencia (Altun et al., 2010). Lo anterior es de gran importancia porque ambos tipos de minería tienen el potencial de generar modificaciones permanentes y de gran magnitud en el paisaje, lo que de acuerdo con el artículo 42 de la Ley 99 de 1993 podría llegar a conceptualizarse como un daño social.

1. Potencial remoción y sepultamiento	Agua, suelo, sedimento, roca, relieve	Gran minería
<p>Con el fin de dimensionar la magnitud de este posible impacto en el área donde se propone la reserva temporal, se reseñan algunos de los datos provenientes de la descripción de los proyectos potenciales de gran minería “Soto Norte” y “Angostura”. Este último proyecto se planteó inicialmente como minería a cielo abierto, pero luego fue reconfigurado para desarrollarse de forma subterránea. En todos los casos se tienen estimaciones de los volúmenes de remoción de materiales. Lo anterior, aclarando que se toman estos datos como referencia en cuanto son proyectos de gran minería que se han planteado en el contexto específico de la zona.</p> <p>En la Figura 23 se muestran los volúmenes y masas del material que se podría remover, así como la magnitud del depósito de relaves para disponer en superficie que se planteó en cada caso. Para el proyecto “Soto Norte” se tomaron los valores reseñados en la descripción del EIA (Minesa, 2020), pero para la estimación del volumen total de material removido, en millones de metros cúbicos (Mm³), se tomó como referencia la densidad entre 2,5 y 2,8 g/cm³ reportada para el “material útil” y el “material estéril”, utilizando un valor conservador de 2,8 g/cm³.</p> <p>En el caso de Angostura (proyecto a cielo abierto) el volumen de relaves en Mm³ se estimó utilizando el valor de 1,9 g/cm³ reportado en el mismo EIA (Greystar, 2009). En el caso del material removido total se utilizó el valor conservador de 2,8 g/cm³ al no hallar otro en el estudio. En el estudio de prefactibilidad de Angostura (proyecto subterráneo) se reportan los datos de remoción de materiales correspondientes a la mena, pero no se aclara el volumen de material no aprovechable, por lo que el valor registrado en la tabla puede estar subestimado. En este mismo estudio, se reportan valores de densidad medios entre 2,5 y 2,6 g/cm³ (Golder, 2012); no obstante, adoptando una perspectiva conservadora, se utiliza el valor de 2,8 g/cm³.</p> <p>En el caso de los relaves, el estudio de prefactibilidad de Golder (2012) menciona un estimado de 14 toneladas de relaves de los cuales 4 se dispondrían de forma superficial. Esto para el escenario “base” del proyecto, pues se consideran escenarios de expansión en</p>		

los cuales se incrementaría significativamente la cantidad. Así mismo, se estima una densidad de $1,6 \text{ T/m}^3$ correspondiente a depósitos de relaves filtrados (Golder, 2012).

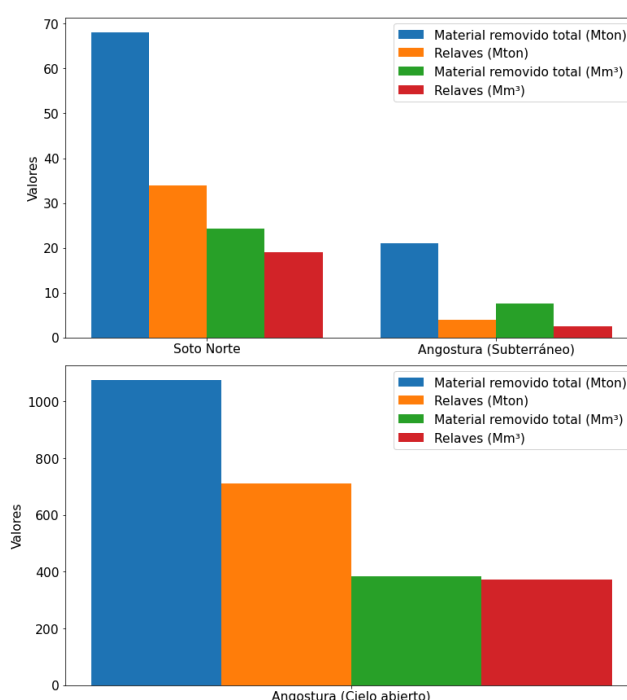


Figura 23. Volúmenes potenciales de remoción de material y de depósitos de relaves dispuestos superficialmente para algunos de los proyectos de gran minería propuestos en la zona de interés. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Minesa (2020), Greystar (2009) y Golder (2012).

De esta forma, a pesar de las limitaciones de la metodología, es posible apreciar que el impacto potencial de remoción de materiales geológicos para algunos proyectos representativos de la gran minería podría estar en el orden de decenas a centenares de millones de metros cúbicos de materiales geológicos que tienen múltiples valores ambientales, como por ejemplo la capacidad de almacenar agua subterránea.

En cuanto al sepultamiento de materiales geológicos con desechos mineros, estos proyectos representativos de la gran minería podrían implicar la afectación de un área que se encuentra entre las decenas y centenares de hectáreas. En el caso de Soto Norte, la extensión del depósito de relaves propuesto es de algo menos de 75 ha, para Angostura (cielo abierto) es de 394 ha, mientras que en el caso del proyecto Angostura (subterráneo), se tienen dos alternativas espaciales para la disposición de relaves, cada una diseñada para una capacidad máxima de $15,625 \text{ Mm}^3$, las cuales tendrían una extensión de 89 y 113 ha, respectivamente.

Para el caso particular de los proyectos reseñados, una de las alternativas de ubicación potencial de los depósitos de relaves coincide con zonas de recarga de acuíferos reconocidas por las autoridades ambientales (**Figura 24**). Más allá de este hecho particular, se resalta

que estas áreas son zonas de especial vulnerabilidad y fragilidad ante la disposición de desechos de cualquier proyecto minero.

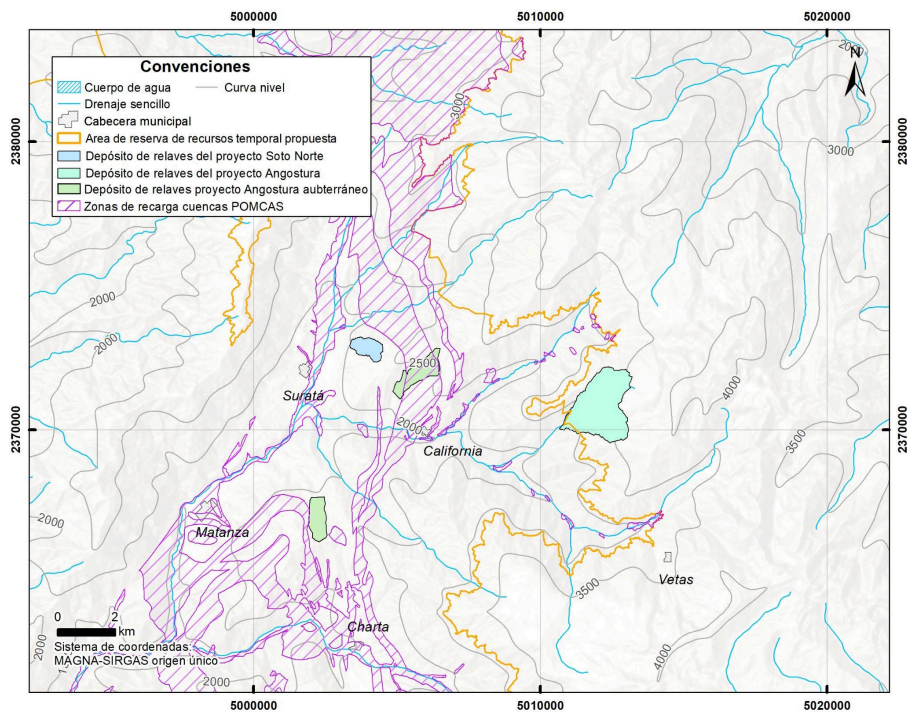


Figura 24. Ubicación potencial de depósitos de relaves en proyectos de gran minería propuestos dentro del área en relación con las zonas de recarga definidas por la autoridad ambiental. Fuente: Elaboración propia a partir de la información geoespacial de los POMCA de los ríos Cáchira Sur y Alto Lebrija (CMBD, 2019; CMBD, 2020) y la descripción de proyectos de gran minería contenida en Minesa (2020), Greystar (2009), Golder (2012) y Schlumberger (2013).

Estos datos sólo ofrecen una idea de la posible magnitud del impacto de remoción y sepultamiento de elementos geoambientales en la gran minería, en cuanto se necesita mayor información y una evaluación ambiental detallada para poder llegar a cuantificar, por ejemplo, las alteraciones del paisaje que puede implicar un proyecto en específico.

2. Potencial remoción y sepultamiento	Agua, suelo, sedimento, roca, relieve	Pequeña minería
Para tener una idea de la magnitud del impacto de remoción en la pequeña minería, de acuerdo con los criterios del Decreto 1666 de 2016 se puede pensar en un hipotético proyecto de minería subterránea a 25 años que extrae un “volumen útil” de 25000 toneladas por año (el máximo para estar clasificado dentro de esta categoría). Para el caso del proyecto Soto Norte, esta masa útil está alrededor del 80% del material removido. Acogiendo esa misma proporción para un hipotético proyecto de pequeña minería, esto significaría la		

remoción de 31250 toneladas por año de material durante 25 años; es decir, 788000 toneladas de material removido total y 281500 metros cúbicos, lo cual contrasta con los valores en unidades de millones de toneladas o de metros cúbicos de la gran minería. Esto implica un proyecto entre uno y tres órdenes de magnitud más pequeño respecto a los proyectos de gran minería que se reseñaron a manera de ejemplo, con lo cual los impactos de remoción de elementos geológicos también serán significativamente menores.

Para este caso no se presentan estimaciones sobre el impacto de sepultamiento, al no tener datos concretos. Adicionalmente, en la minería de pequeña escala que se desarrolla en el sector no se disponen desechos de gran magnitud espacial, aunque la forma de disposición sí puede ocasionar la contaminación de suelos y fuentes de agua.

Como se señaló para el caso de la gran minería, estos datos sólo ofrecen una idea de la posible magnitud del impacto y presentan aún más limitaciones en cuanto se plantea un proyecto hipotético representativo de la pequeña minería, pues no se tienen estimaciones de los volúmenes de remoción de material de la minería de pequeña escala que se adelanta en la zona, con el fin de contrastar con valores reales.

Alteración de la oferta y disponibilidad de agua

La remoción de grandes volúmenes de materiales geológicos, además de la pérdida de acuíferos y acuitardos, necesariamente implica una disminución en la capacidad de almacenamiento de agua subterránea. Esto, a su vez, tiene implicaciones en el ciclo del agua, en cuanto el almacenamiento tiene una relación directa con la dinámica de la recarga y la descarga, así como con las condiciones de flujo subterráneo (Schicht & Walton, 1961; Theis, 1938). La disposición de desechos mineros en superficie puede sepultar elementos geoambientales como los suelos, o áreas como las zonas de recarga, las cuales son de importancia ambiental hidrogeológica porque permiten la renovación del agua subterránea y la regulación hídrica. Otro tipo de infraestructuras relacionadas con la explotación minera también pueden modificar las características superficiales del suelo que controlan el proceso de infiltración.

Como resultado de las excavaciones a cielo abierto o subterráneas de la minería, generalmente se intercepta el nivel del agua subterránea en profundidad. Esto genera el influjo de aguas subterráneas dentro de las excavaciones y obliga a la implementación de medidas como los sistemas de drenaje para su evacuación, las cuales no solo permiten la ejecución de las actividades mineras, sino que son necesarias para garantizar la estabilidad geotécnica de la operación (Smith, 2021). Los tajos, túneles o galerías funcionan como sumideros que atraen el flujo de agua subterránea (Smith, 2021; ELAW, 2010). El desagüe del sistema hídrico subterráneo es un fenómeno directamente relacionado con la pérdida de capacidad de

almacenamiento provocada por la remoción de elementos geológicos como los acuíferos y los acuitardos. Este desagüe, que representa un detrimento para la oferta y disponibilidad hídrica de una región, tiene como efecto la modificación de las condiciones naturales de flujo y el abatimiento o descenso del nivel del agua subterránea en un área alrededor de la excavación minera (**Figura 25**) (Motyka & dÓbyrn, 2022; Karmakar & Das, 2012; Plume, 2005), lo cual desencadena múltiples impactos ambientales.

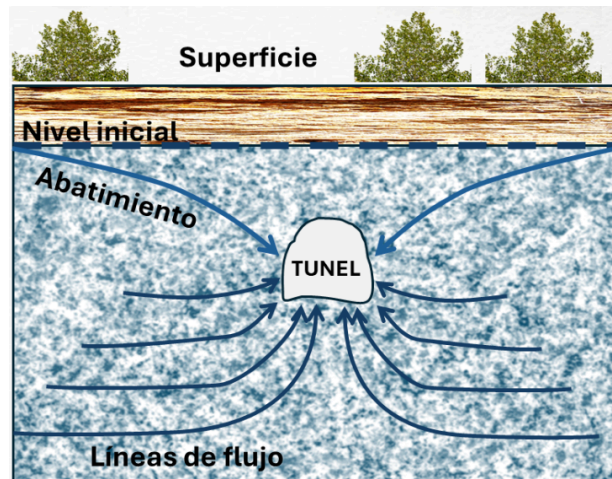


Figura 25. Esquema de los cambios en las direcciones del flujo del agua subterránea, la cual se ve atraída hacia un túnel. Fuente: Elaboración propia.

El más significativo de ellos puede ser la afectación del flujo base hacia manantiales o cuerpos de agua superficial relacionados con el agua subterránea, tales como quebradas, ríos, lagunas o humedales (ELAW, 2010; Kohv et al., 2023), dada la estrecha relación entre el agua superficial y subterránea (**Figura 26**) (Winter et al., 1998). Adicionalmente, se pueden afectar otras captaciones de agua subterránea o incluso acuíferos que no se encuentran directamente afectados por el cono de abatimiento, pero si tienen conexión hidráulica con los materiales geológicos donde ocurre la excavación (Motyka & dÓbyrn, 2022). Finalmente, el descenso del nivel del agua subterránea tiene efectos conexos como la pérdida de humedad del suelo (Karmakar & Das, 2012).

La magnitud de un potencial impacto del abatimiento o descenso del agua subterránea, en términos de la extensión de la afectación, depende de múltiples factores como las características propias de un proyecto minero y, principalmente, de las propiedades hidráulicas de los materiales geológicos intervenidos (Smith, 2021; Motyka & dÓbyrn, 2022). Aunque existen soluciones analíticas o empíricas que permiten aproximar esta magnitud asumiendo valores y distribuciones homogéneas de propiedades como la conductividad hidráulica (Smith, 2021; Motyka & dÓbyrn, 2022), generalmente es necesario utilizar metodologías más sofisticadas como los modelos numéricos computacionales, cuya confiabilidad depende de los insumos y la existencia de datos e información suficiente (Wolkersdorfer, 2008).

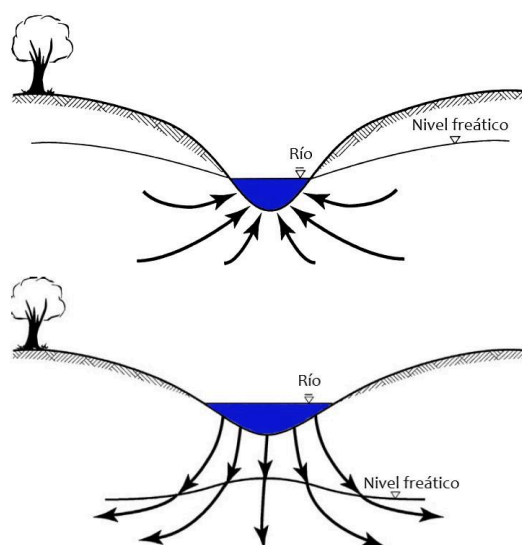


Figura 26. Esquema de la conexión hidráulica entre aguas superficiales y subterráneas. Fuente: Modificada de Delleur (2006)

A pesar de que la magnitud del abatimiento del agua subterránea depende de muchas variables, este puede alcanzar valores entre las decenas y cientos de metros, y el radio de afectación tomar valores entre cientos de metros y varios kilómetros, de acuerdo con múltiples casos de estudio en otros países (Toran & Bradbury, 1988; Libicki, 1982; Yihdego & Drury, 2016; Hu et al., 2020; Lines, 1985). Cabe destacar, además, que este impacto se relaciona con la ocurrencia de fenómenos como la subsidencia.

Para el contexto colombiano, el artículo de Pérez (2014) sitúa varios elementos de discusión significativos alrededor de los impactos de la minería subterránea sobre el agua. Además de resaltar las alteraciones al flujo subterráneo, el abatimiento regional del nivel del agua subterránea y sus posibles afectaciones a cuerpos de agua superficial, resalta la importancia de los medios fracturados para el entendimiento de las condiciones hidrogeológicas y la correcta evaluación de los impactos ambientales atribuibles a la extracción de agua desde túneles. De acuerdo con este autor, en Colombia se sigue asumiendo que las formaciones fracturadas tienen conductividades hidráulicas despreciables, a pesar de que la evidencia demuestra lo contrario.

Para abordar los impactos relacionados con la alteración de la oferta y disponibilidad de agua, primero se presenta un contexto general que establece algunas condiciones hidrogeológicas del área y las condiciones que podrían generar la salida de agua por los túneles y el abatimiento de las aguas subterráneas producto de la minería.

En el área de estudio, diversas investigaciones enfocadas en evaluar el potencial hidrogeológico de las rocas del basamento del Macizo de Santander, asociadas a las unidades geológicas Neis de Bucaramanga, Grupo Plutónico de Santander y Formación Silgará, han

demostrado que las redes de fractura relacionadas estas rocas, tiene las propiedades de intensidad, densidad, conectividad y abertura adecuadas para permitir la infiltración y tránsito del agua subterránea.

Desde el SGC, se elaboró una caracterización detallada de parámetros geométricos y cuantitativos de las redes de fractura asociadas a las zonas de daño de las fallas La Baja y río Cucutilla en la parte alta de la cuenca del río Suratá (Cañas et al., 2022). De allí se concluye que las características estructurales y de deformación que afectan a las rocas cristalinas aflorantes en el área de estudio, permiten la infiltración y tránsito del agua subterránea a través de redes de fractura con alta intensidad y conectividad. Estas conclusiones fueron validadas mediante técnicas isotópicas e hidrogeoquímicas que permitieron establecer la existencia de flujos de agua subterránea de carácter regional (Herrera et al., 2023).

El modelo hidrogeológico conceptual presentado por Rueda (2013) para el macizo de Santander, resalta la importancia de las fallas oblicuas con respecto a la falla de Bucaramanga, de dirección NE-SW (similar a las fallas La Baja y del río Cucutilla), en el control de flujos de agua subterránea de carácter regional. Tales estructuras afectan rocas cristalinas de las unidades Neis de Bucaramanga y Cuarzomonzonita de la Corcova, las cuáles también predominan en un sector amplio de la reserva temporal de Santurbán. Se identifica, sin embargo, una ausencia de datos provenientes de ensayos hidráulicos que permitan asignar un valor cuantitativo a la alta capacidad que tienen los medios fracturados de la zona para almacenar y transmitir el agua. En la actualidad el SGC se encuentra realizando algunos ensayos para obtener tensores hidráulicos y valores de conductividad a partir de redes de fracturas (Singhal & Gupta, 2010; Priest, 1993), pero los resultados son preliminares y no se presentan hasta contar con mayor validación.

Un estudio de prefactibilidad de minera (Schlumberger, 2013) ha reportado valores de conductividad hidráulica en rocas neisicas e intrusivas fracturadas aflorantes en la cuenca del río La Baja, que varían desde 1×10^{-7} hasta 1×10^{-5} m/s, valores que según Singhal y Gupta (2010) se pueden considerar moderados. A su vez, SRK (2017) plantea valores de conductividad en el área del proyecto Soto Norte que varían entre 1×10^{-8} hasta 1×10^{-3} m/s. Los datos de Schlumberger (2013) y SRK (2017) no se toman como representativos del área -ni se validan como tal-, pero se presentan para tener una idea del orden de magnitud de las propiedades hidráulicas que caracterizan los medios fracturados del Macizo de Santander: el valor de 1×10^{-7} suele ser un valor de partida a partir del cual las unidades se consideran acuíferas (Freeze & Cherry, 1979). Desde el punto de vista ambiental, incluso las unidades que se describen como acuitardos tienen valores fundamentales para la protección del agua subterránea o la regulación del ciclo hidrológico (Cherry & Parker 2004; Filippini et al. 2020).

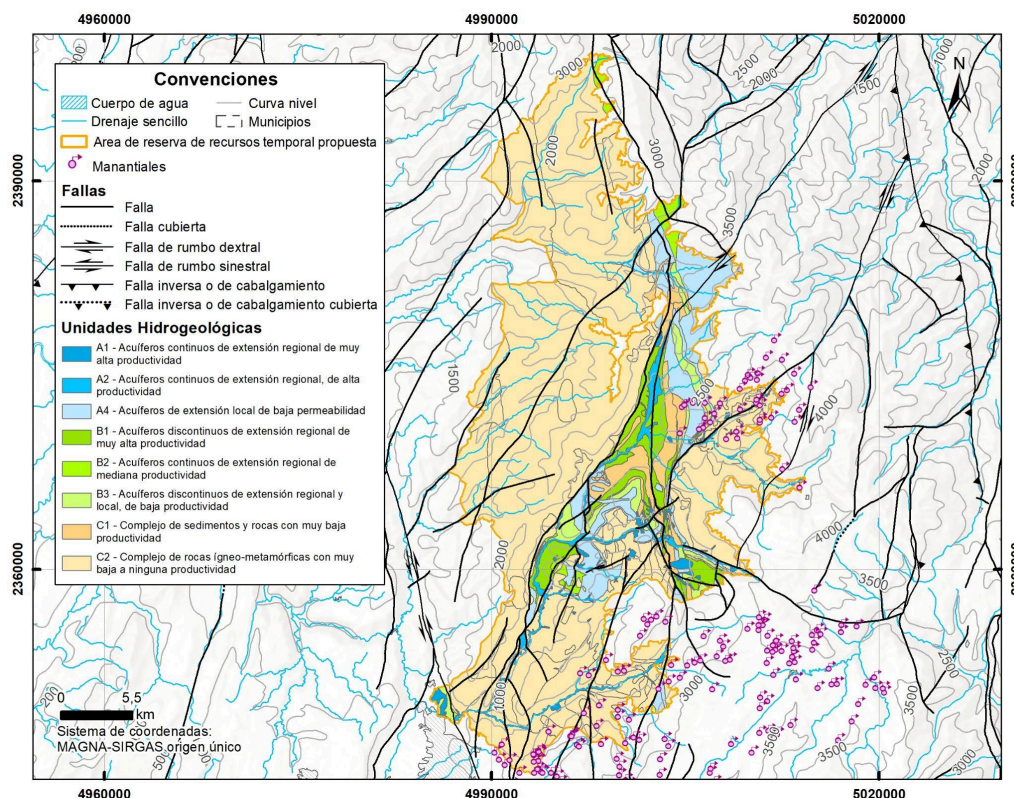


Figura 27. Ocurrencia de manantiales y distribución de unidades hidrogeológicas dentro del área de reserva temporal. Fuente: Elaboración propia a partir de la información geoespacial de los POMCA de los ríos Cáchira Sur y Alto Lebrija (CMBD, 2019; CMBD, 2020), Rueda (2013) y Cañas et al. (2022).

Con respecto a la ocurrencia de manantiales en el área de la reserva temporal, la **Figura 27** muestra la distribución de los manantiales reportados por Rueda (2013) y Cañas et al. (2022) contrastados con las unidades hidrogeológicas reportadas en los POMCA de las cuencas hidrográficas Alto Lebrija y Cáchira. Es importante resaltar que estos puntos de agua subterránea son susceptibles de verse afectados e incluso desaparecer por efecto de los descensos de niveles que algunas actividades antrópicas como la minería generan.

En el mapa presentado se evidencia que en los complejos ígneos-metamórficos de baja a nula productividad (C2), se presenta una alta concentración de manantiales, a su vez, estos se relacionan espacialmente con fallas de dirección NE-SW oblicuas con respecto a la falla de Bucaramanga. Lo anterior resalta la importancia del fracturamiento asociado a estas fallas, el cual condiciona la ocurrencia de los manantiales relacionados con flujos en la misma dirección y a su vez, aumenta el potencial hidrogeológico de las unidades conformadas por rocas cristalinas dentro del área de interés.

A su vez, es importante resaltar que se ha establecido que el flujo base en la cuenca alta del río Lebrija corresponde al 70% del caudal total (Gómez- Isidro & Gómez- Ríos, 2016). Por otro lado, estudios como el de Schlumberger (2013) han sugerido impactos en el flujo base de ríos que conforman las cuencas de Paez, Angostura, La Baja y Vetás por el abatimiento del agua

subterránea que podría generar la actividad minera, si bien en este concepto no se valida la magnitud del impacto descrito en dicho estudio. El descenso de los niveles y la pérdida de manantiales y flujo base relacionada con el desagüe ó la extracción de agua en excavaciones mineras podrían afectar la oferta hídrica superficial en esta área.

Por otra parte, en un estudio realizado por el SGC (Herrera et al., 2023) se utilizaron los isótopos naturales como trazadores para contribuir en la determinación de la recarga, origen y flujo del agua subterránea, teniendo en cuenta que cada fuente de agua tiene una firma isotópica única, que permite rastrear su movimiento a través del ciclo hidrológico: evaporación, precipitación, infiltración, escurrimiento, evapotranspiración, entre otros.

A continuación se presentan evidencias concretas de impactos y riesgos en la zona de la reserva. Posteriormente, se brindan elementos para contextualizar el impacto en función de la minería de pequeña y gran escala.

1. Pérdida de capacidad de almacenamiento de agua subterránea	Agua subterránea	Gran minería
<p>Para estimar la posible magnitud del impacto de pérdida de capacidad de almacenamiento de agua subterránea, se retoman los valores de remoción de materiales presentados anteriormente, indicando que no se tienen datos reales de la porosidad eficaz o rendimiento específico de los macizos fracturados que afloran en el área propuesta para la reserva. No obstante, una idea de los órdenes de magnitud de la porosidad a escala de macizo rocoso se han obtenido a partir de levantamientos sistemáticos de fracturas (con más de 1800 datos) levantados por el SGC en diversos trabajos en la zona (Anexo 3). Con base en estos datos se han realizado simulaciones de redes de fracturas (Figura 28) y se ha considerado el volumen de vacío de fractura (abertura x área de fractura). Dichas simulaciones muestran que en zonas con alta deformación la porosidad podría estar en rangos de 0,05 a 0,19. Aunque dichos valores solo constituyen aproximaciones y no han sido validados, se puede considerar que una porosidad eficaz de 0,01 o 1% no es desproporcionada para tomar como valor conservador.</p> <p>Así, teniendo en cuenta los volúmenes de remoción de material reseñados con anterioridad para proyectos de gran minería, se puede estimar que la pérdida de capacidad de almacenamiento de agua estaría en el orden de cientos de miles a millones de metros cúbicos</p>		

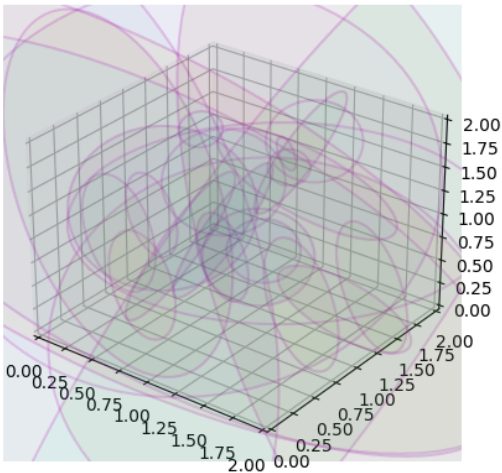
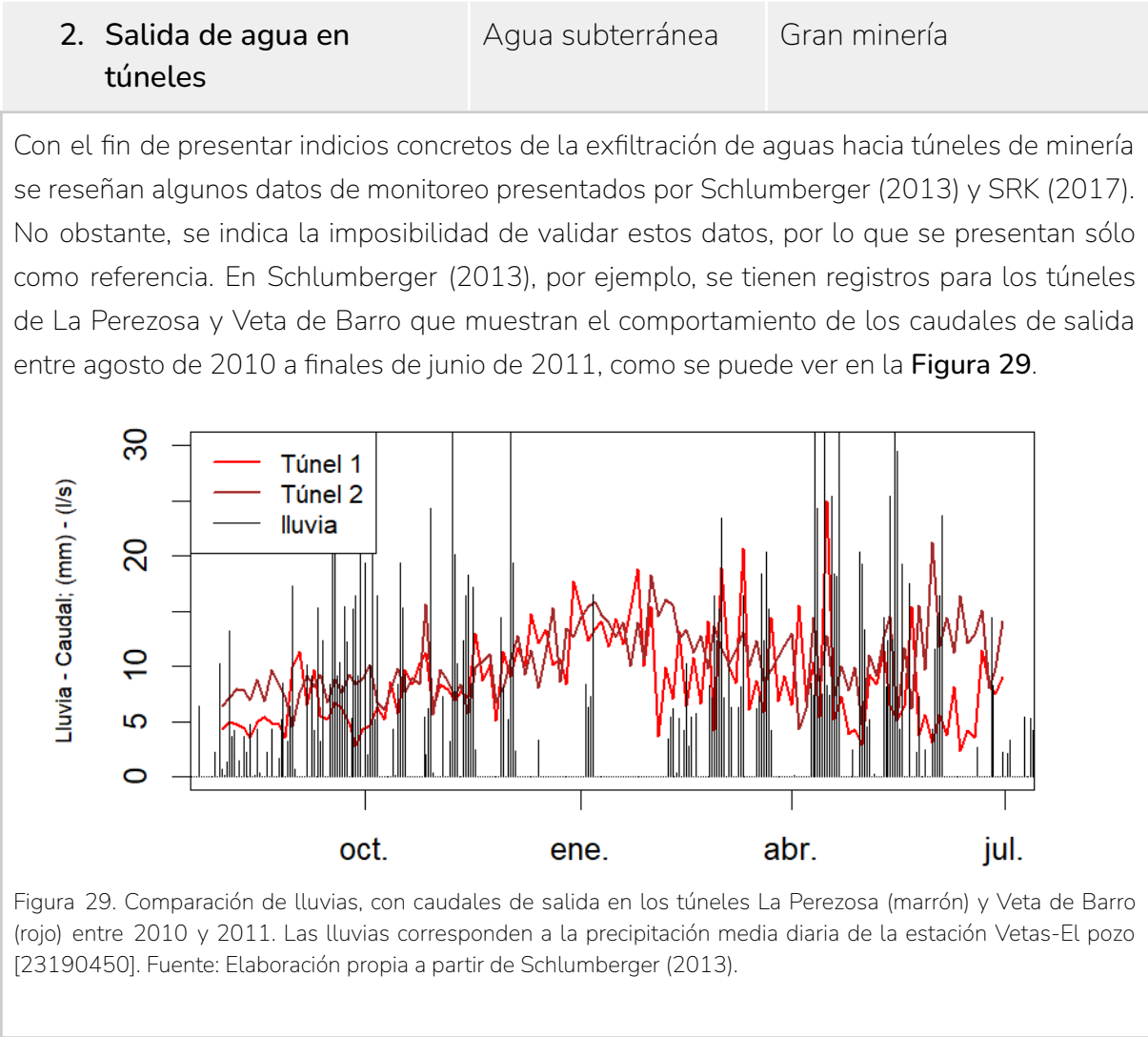


Figura 28. Ilustración de redes de fracturas simuladas para evaluar su conectividad en el macizo rocoso. Fuente: Elaboración propia.



Los valores reportados por Schlumberger (2013) para los túneles de La Perezosa y Veta de Barro, dan una idea del orden de magnitud de salida de agua en túneles de gran minería, con 10 l/s. Además, en ese mismo estudio se sugieren valores proyectados de salida de agua de 40 l/s en el túnel Móngora. Por otra parte, SRK (2017) presenta valores de salida de agua entre 15 y 32 l/s para el túnel El Emboque - también representativo de la gran minería - entre septiembre de 2012 y febrero de 2016. Finalmente, Schlumberger (2013) reporta caudales medidos esporádicamente y de forma aislada en la zona para cuerpos de agua superficial, entre los que se encuentran las quebradas La Baja y Móngora, y donde en promedio - exceptuando la Baja - los caudales se encuentran por debajo de los 50 l/s. Es decir, que los caudales de salida registrados en los túneles pueden ser equiparables a un porcentaje significativo de la cantidad de agua que lleva una corriente pequeña de la zona, ilustrando la magnitud del impacto. Nótese que esta aproximación tiene evidentes limitaciones al no contar con mayores datos, pero permite dar una idea de los órdenes de magnitud de la afectación.

Otro enfoque para aproximar la magnitud de la salida de agua en túneles de gran minería se aplicó recopilando las longitudes y dimensiones típicas de los túneles de acceso de algunos proyectos potenciales (**Anexo 4**). Para la gran minería se toman los valores de los estudios de Golder (2012), Schlumberger (2013), y Minesa (2020).

Se decidió tomar únicamente la magnitud de los túneles de acceso porque es el único dato que se tiene con suficiente detalle para la gran y pequeña minería. Sin embargo, la magnitud de cada escala de explotación está dada no solo por la magnitud de un túnel individual, sino por la cantidad total. En relación con lo anterior y para dar un ejemplo de esta situación, en el caso del proyecto subterráneo Angostura se plantean trece niveles de explotación. Esto contrasta con los proyectos más pequeños desarrollados en el área, que suelen tener solo uno o dos nivel de explotación, lo que disminuye significativamente la cantidad total de material removido y la longitud de los túneles. Por esta razón, los resultados obtenidos se pueden considerar muy conservadores en términos de los contrastes entre los impactos según la escala.

Para aproximar la magnitud del caudal que exfiltraría en función de las dimensiones de los túneles de gran minería, se aplica la ecuación de Goodman et al. (1965) utilizando una conductividad hidráulica de 1×10^{-7} m/s. Adicionalmente, se consideran profundidades hipotéticas de 20, 50, 100 y 200 metros del túnel respecto al nivel del agua subterránea. Es decir, con este ejercicio no se pretenden dar valores de caudales de exfiltración de los túneles específicos que se tomaron como ejemplo, sino establecer órdenes de magnitud de los caudales que, en un mismo contexto hidrogeológico, podría generar un túnel típico de la gran minería, respecto a uno típico de la pequeña minería.

Aunque los caudales cambian significativamente en función de la profundidad, es posible apreciar que los volúmenes asociados a los túneles de la pequeña minería se mantienen en el rango de uno a dos órdenes de magnitud por debajo de los volúmenes de agua que podrían ser extraídos en un túnel de la gran minería (**Anexo 4**). Como se asumieron condiciones constantes de conductividad hidráulica y se tomaron los mismos intervalos de profundidad en cada caso, esta diferencia claramente es atribuible a la dimensión del túnel, en particular a la longitud, variable que tiene una relación directa con el caudal que exfiltra. El radio tiene una influencia menor.

Es decir, en un mismo contexto hidrogeológico y dadas las magnitudes típicas de los túneles de explotación minera en la zona, un túnel de la gran minería podría extraer volúmenes de agua de 10 a 100 veces mayores que los de la pequeña minería. Este cálculo es extremadamente conservador teniendo en cuenta que la gran minería tiende a desarrollarse a mayores profundidades respecto al nivel freático que la pequeña minería. Así mismo, los proyectos de gran minería contemplan la explotación en varios niveles topográficos, lo que aumenta significativamente la cantidad y longitud de los túneles.

Aunque los caudales drenados por las tuneles y la mina pueden verse posteriormente en las quebradas y no cambiar el balance en general, hay afectaciones en la disponibilidad del agua a largo plazo, impactos en la regulación hídrica y, muy probablemente impactos en la calidad, pues ya se han reseñado algunas de las propiedades químicas que caracterizan las aguas que drenan por túneles de minería, generalmente ácidas, con altos valores de turbiedad y conductividad eléctrica, y en algunos casos con presencia de elementos potencialmente peligrosos para la salud ambiental y humana.

Si bien se necesita más información respecto a la magnitud de la salida de agua en túneles de gran minería, ya se tienen evidencias concretas de ocurrencia del impacto. Los datos de isótopos estables obtenidos en tres campañas de monitoreo (Herrera et al., 2023) revelan que el agua del túnel de exploración El Emboque, así como de los puntos termales asociados con la actividad minera, como la surgencia antrópica El Gigante y el pozo TW2, tienen un contenido isotópico similar al de las muestras del páramo. De manera similar, los drenajes de los túneles La Perezosa y Veta Barro presentan condiciones isotópicas parecidas, lo que indica que el agua en todos estos puntos proviene del páramo. Además, los resultados isotópicos en fuentes de agua superficial, como los ríos La Baja, Vetás y Suratá, muestran un empobrecimiento isotópico significativo, sugiriendo que estos cuerpos de agua se alimentan principalmente del ecosistema de páramo.

Los resultados sugieren una conexión hídrica entre la zona de páramo y la zona de actividad minera. La medición de isótopos de carbono realizada por el SGC, confirmó que los puntos

termales, la surgencia antrópica El Gigante y el pozo TW2 tienen un tiempo de tránsito más largo en el subsuelo, mientras que el agua del túnel de exploración El Emboque presenta características de flujo intermedio. Esto respalda el argumento de que una parte significativa del agua se recarga en el páramo y puede ser drenada por los túneles asociados con la minería en la parte más baja, reduciendo la cantidad de agua disponible e impactando el abastecimiento de ríos y acuíferos en la región.

3. Abatimiento y afectación al flujo base	Agua superficial y subterránea	Gran minería
<p>Respecto al impacto de la magnitud y extensión del abatimiento, al no contar con datos robustos de propiedades hidráulicas del macizo rocoso ni información detallada sobre todas las intervenciones de proyectos representativos de la gran minería, la única fuente sobre este impacto proviene de los mismos estudios de prefactibilidad contratados para los proyectos de Angostura (Schlumberger, 2013) y Soto Norte (SRK, 2017). Ambos estudios predicen abatimientos que en el área cercana a la intervención minera están en el orden de cientos de metros en vertical. En cuanto a la extensión areal, esta puede estar en el orden de kilómetros. No obstante, no se pueden validar estas magnitudes ante la incapacidad de verificar las suposiciones y datos en los que se soportan los modelos numéricos de estos estudios. De hecho, el estudio de SRK (2017) asigna propiedades hidráulicas bajas en una zona alrededor de la mineralización. Aunque no se puede verificar que esto corresponda o no a la realidad, desde un punto de vista numérico esto restringe espacialmente la extensión del abatimiento simulado en el modelo.</p> <p>En cualquier caso, la afectación de cuerpos de agua superficial por efecto del abatimiento es un impacto probable de la minería a gran escala y, de hecho, es reconocido en estudios como el de Schlumberger (2013). Se requiere de datos robustos y de un mayor conocimiento de las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas de la reserva para llegar a estimar la magnitud por el abatimiento de aguas subterráneas de una manera más robusta.</p>		

4. Pérdida de capacidad de almacenamiento de agua subterránea	Agua subterránea	Pequeña minería
<p>Bajo las mismas hipótesis planteadas en el caso de la minería a gran escala y considerando el volumen de remoción de materiales calculado para un proyecto de pequeña minería anteriormente, se puede estimar que la pérdida de capacidad de almacenamiento de agua</p>		

estaría en el orden de miles de metros cúbicos, dos o tres órdenes de magnitud por debajo de lo obtenido para proyectos representativos de la gran minería.

5. Salida de agua en túneles	Agua subterránea	Pequeña minería
<p>En cuanto a valores absolutos y cercanos a la realidad de la salida de agua en túneles típicos de la pequeña minería los datos son escasos. Algunos de los datos de salida de agua reportados por SRK (2017) para túneles históricos entre 4 a 10 l/s en promedio, pueden corresponder a túneles de pequeña minería. Sin embargo, además de que no se pueden validar (como en el caso de la gran minería) no se tiene completa certeza y solo se tienen en cuenta como una idea del orden de magnitud. Por otro lado, es necesario reiterar que los contrastes entre la pequeña y la gran minería no se dan en términos de un túnel individual, pues la gran minería requiere mayor cantidad de túneles, comúnmente más profundos y en varios niveles de explotación, con un potencial de drenar mayores volúmenes de agua.</p> <p>Con el fin de aproximar la magnitud de los túneles que se requieren para el desarrollo de la pequeña minería en el área de la reserva, se recopilaron las longitudes y dimensiones típicas de los túneles de acceso de proyectos existentes en la zona (Anexo 4). Los datos se derivan de las observaciones de campo realizadas en el marco de la <i>Guía metodológica para el mejoramiento productivo del beneficio de oro sin el uso de mercurio ni cianuro en Vetás, California y Suratá (Santander)</i> (Candela et al., 2024), resumidas en un documento interno del SGC (Mojica, 2024), que se dispone como anexo (Anexo 5)</p> <p>Se siguió la misma metodología descrita anteriormente para la gran minería. Los caudales de salida en un túnel típico de la pequeña minería podrían estar entre uno o dos órdenes de magnitud por debajo de los característicos en un túnel de la gran minería en la zona.</p>		

6. Abatimiento y afectación al flujo base	Agua superficial y subterránea	Pequeña minería
<p>Respecto al impacto de la magnitud y extensión del abatimiento no se pueden establecer estimaciones cuantitativas sin contar con mayores datos. No obstante, y desde una perspectiva enteramente cualitativa, este impacto debería tener una expresión más localizada y un menor potencial de afectar el flujo base de cuerpos de agua superficial, respecto a la gran minería.</p>		

Inestabilidad geotécnica

Los movimientos en masa constituyen uno de los fenómenos más recurrentes en las zonas montañosas del país, los cuales generan pérdidas materiales y cobran la vida de cientos de personas. La existencia de zonas propensas a movimientos en masa y avenidas torrenciales, junto con el desarrollo de diversas actividades humanas y condiciones variables del clima, configuran escenarios y procesos continuos de construcción y acumulación del riesgo.

La minería típicamente genera alteraciones o cambios en la cobertura y uso de suelo y altera las condiciones geológico-geotécnicas del terreno. Dichas alteraciones pueden derivar en procesos de inestabilidad que, al presentarse en cuencas en donde hay evidencia de torrencialidad, pueden llegar a afectar la oferta y disponibilidad del agua. Otro elemento de gran importancia es la existencia de depósitos de origen antrópico producto de la necesidad de disponer los desechos provenientes de la actividad minera. Los depósitos de relaves son una estructura que se presenta como una alternativa para la disposición final de estos materiales, su tamaño suele exceder en órdenes de magnitud a otras intervenciones antrópicas. Estos representan una amenaza, dado que ante una posible falla pueden afectar la calidad del agua de fuentes abastecedoras así como destruir o afectar en algún grado poblaciones cercanas.

Los impactos descritos aquí se sustentan en un informe del SGC enmarcado en este concepto y aún no publicado oficialmente (Aponte et al., 2024). Este constituye el **Anexo 6**.

1. Probabilidad de falla de presas de relaves y afectaciones al agua.	Agua superficial, relieve	Mediana y gran minería
<p>La ubicación de las presas de relaves condiciona en gran medida su estabilidad, en cuanto tiene una influencia directa en la magnitud de los principales factores detonantes de fallas de materiales naturales y antrópicos, como lo son la lluvia y las solicitaciones sísmicas.</p> <p>A partir de los análisis realizados se determinó que un valor de precipitación de 120 mm es el valor mínimo de agua necesario para saturar los relaves. Además, se observa que en la zona de estudio se tiene una probabilidad del 50% de que se presenten precipitaciones acumuladas iguales o mayores a este valor entre 2 y 3,5 días, de acuerdo con las estaciones hidrometeorológicas. Debido a que en el sector se encuentran varias fallas geológicas (Figura 30), las solicitaciones requeridas para garantizar su estabilidad son mayores que en otras zonas donde se han ubicado este tipo de estructuras.</p> <p>Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó un análisis del efecto del colapso parcial de la presa de relaves del proyecto Soto Norte, encontrando que la extensión de la afectación y la distancia de viaje de los relaves se encuentra entre 10,4 km hasta 34 km aguas abajo de la</p>		

presa. Esta condición es debido a la energía que descarga el volumen retenido en la presa combinado con las altas pendientes del sector y del comportamiento reológico que pueden presentar los relaves fluidizados.

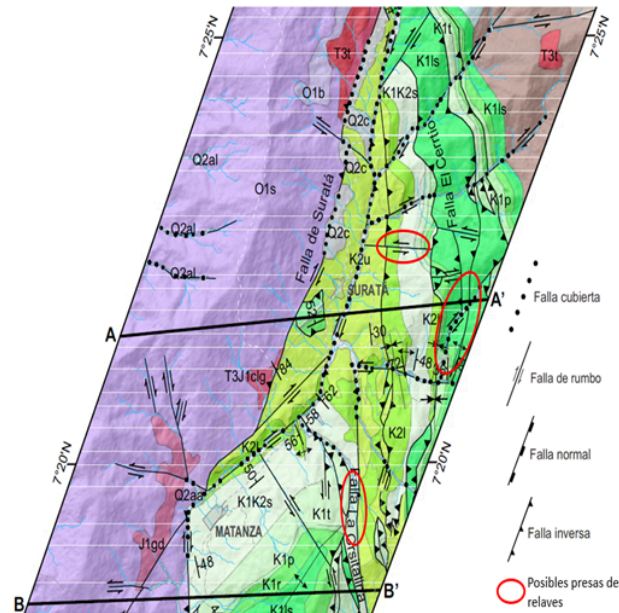


Figura 30. Mapa geológico de la zona cercana al río Surata, y ubicación de las posibles presas de relaves de los proyectos de Angostura y Soto Norte. Fuente: mapa geológico adaptado de Laguado (2023) y ubicación de presas de Golder (2012) y SRK (2021).

El flujo afectaría la disponibilidad y calidad del agua sobre el río Suratá donde se encuentran 4 concesiones de agua para su uso por parte de la población. También se verían afectados los centros poblados de Suratá y Matanza y tramos de la vía que conduce a Bucaramanga (**Figura 31**).

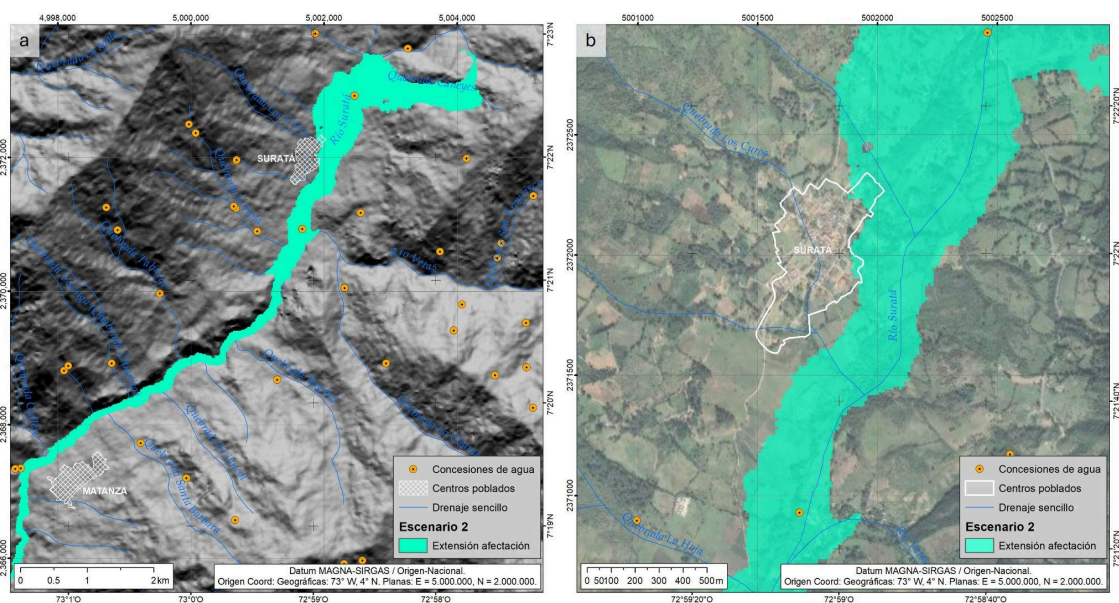


Figura 31. **A.** Resultados preliminares de la zona de afectación por colapso parcial de una presa de relaves del Proyecto Soto Norte **B.** Detalle de resultados en casco urbano de Suratá. Fuente: Elaboración propia.

Si bien es un análisis de un proyecto puntual a partir de información secundaria, los resultados dan una idea de las consecuencias de proyectar este tipo de infraestructura - asociada a la mediana o gran minería - en la Área de Reserva Temporal, donde las cuencas comparten varias características de relieve, climatología y sismicidad.

2. Cambios en condiciones morfodinámicas	Relieve	Pequeña, mediana y gran minería
--	---------	---------------------------------

Para realizar un análisis de posible correlación entre los procesos morfodinámicos del terreno y las zonas con estructuras mineras sobre sectores de las cuencas de la quebrada Vetas, La Baja y río Charta, se realizó la fotointerpretación de estos eventos y la recopilación de información secundaria que permitió construir una base de datos para el estudio de la correlación entre la presencia de movimientos en masa y la localización de los elementos asociados a la práctica de la minera. La **Figura 32** presenta la proporción de puntos asociados a movimientos en masa en función de puntos de actividades mineras, donde los resultados muestran una correlación positiva entre las dos variables analizadas. En términos de proporciones, la relación entre minería y movimientos en masa sigue una ley de potencias, la cual indica que zonas con una mayor proporción de intervenciones mineras reflejan un aumento igualmente proporcional en la presencia de movimientos en masa.

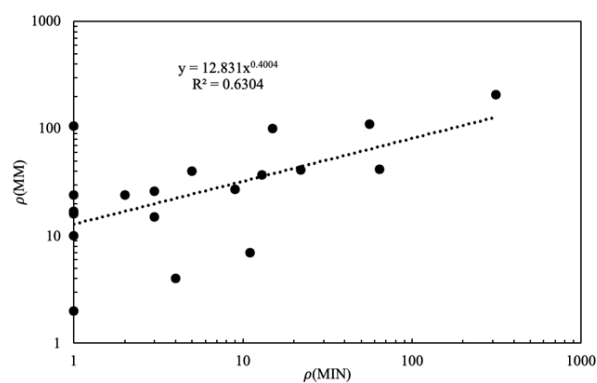


Figura 32. Correlación espacial entre la densidad de movimientos en masa y puntos de minería, ($p(MM)$ y $p(MIN)$). Fuente: Elaboración propia.

De la figura **Figura 32** también se observa que hay una cantidad mínima de movimientos en masa independiente de si estos están en el área de influencia o no de actividad minera.

El análisis también permitió identificar la zona en la que dicha correlación, mostrada en la **Figura 32**, es una correlación más fuerte. Los resultados mostraron que en zonas menores a 2000 metros a la redonda de zonas mineras hay una mayor concentración de puntos

asociados a movimientos en masa (**Figura 33**). Esto permite mostrar que rara vez el efecto de dichas intervenciones son puntuales y por el contrario afectan áreas. Lo descrito anteriormente se puede ver con claridad en la distribución de distancias entre los puntos de minería y los movimientos en masa detectados ($Distancia = \overline{MM, MIN}$). El límite de 2000 m es indicativo y es dependiente del hecho de que se conoce, solo de forma parcial, las intervenciones asociadas a minería subterránea y que hay evidencias de sus efectos en superficie.

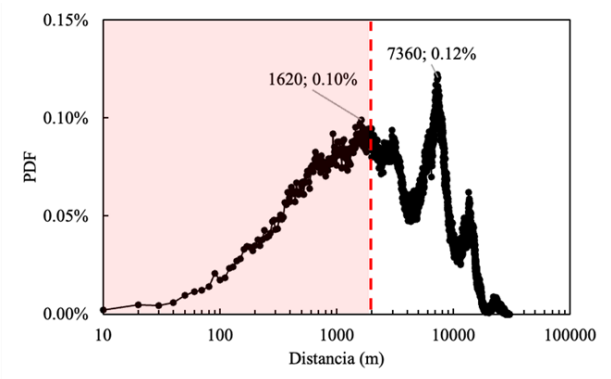


Figura 33. Análisis de la frecuencia distancia entre puntos de minería y puntos asociados a movimientos en masa. Fuente: Elaboración propia

Lo anterior permitió no solo correlacionar cuantitativamente las dos variables analizadas sino también proyectar los impactos asociados a la actividad minera y, en específico, a aquellos en donde dicha actividad puede detonar cambios en las condiciones geológicas, de las geoformas y de las condiciones geotécnicas del terreno. Dicho impacto se concentra en la cuenca de la quebrada La Baja, desde su parte alta hasta las zonas colindantes con el casco urbano de California y con la cuenca alta de la quebrada Vetás, en donde su interacción con la zona de páramo es evidente y acarrea mayores efectos e impactos que los acá analizados.

Es relevante resaltar que no es posible estimar la magnitud, sino sólo se analiza la posible correlación de los movimientos en masa y zonas con estructuras mineras sin determinar factores espaciales o temporales. El análisis se concentró en el estudio de la posible correlación de toda actividad minera identificada y la presencia de movimientos en masa. La metodología y la información disponible no permite distinguir entre escalas de la actividad minera por lo cual no se pueden obtener análisis diferenciales.

3. Cambios en la cobertura de la tierra	Relieve	Pequeña, mediana y gran minería
Con el fin de caracterizar el cambio de coberturas en el área de interés se realizó la		

interpretación a partir de los sensores remotos disponibles, donde se analizó las coberturas de la tierra y la densidad de construcciones. Esto permite visualizar los patrones de ocupación respecto a la correlación de estas dos variables.

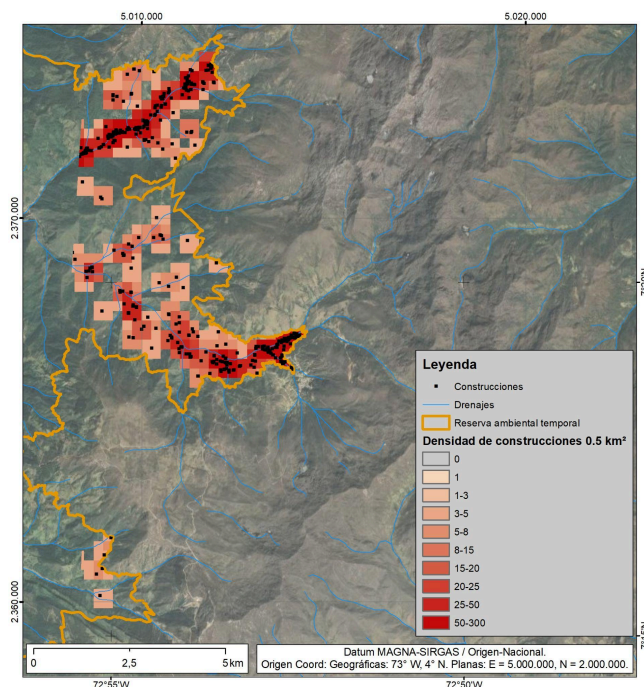


Figura 34. Densidad de construcciones por medio kilómetro cuadrado.. Fuente: Elaboración propia.

A partir de la capa de construcciones, información de análisis elaborada a partir de herramientas de interpretación masiva con inteligencia artificial de imágenes satelitales de Microsoft Bing Maps (2014 a 2023). Se generó un mapa de densidad de construcciones por medio kilómetro cuadrado (**Figura 34**), el cual muestra la tendencia de ocupación en la zona de estudio, donde se evidencia la concentración de construcciones sobre el curso de la quebrada La Baja, construcciones que se asocian a un uso minero principalmente. Sobre la cuenca del río Vetás se encuentra otra zona de aglomeración de construcciones, las cuales se encuentran principalmente cerca del río. Además, la zona de estudio se caracteriza por fuertes pendientes en donde no existen grandes terrenos planos que favorezcan la ocupación agrícola. Solo el 0,48% del área posee pendientes menores al 4% y el 96,6% del área posee pendientes mayores al 25% que de acuerdo a la clasificación de pendientes con fines agrológicos del IGAC se clasifican como ligeramente escarpadas, moderadamente escarpadas y fuertemente escarpadas

Del análisis de las zonas de extracción minera con las fotografías aéreas de 1995 se evidencia, en el 75 % de los polígonos analizados, pérdida de la cobertura natural y procesos de degradación de los suelos, para el polígono de mayor extensión para 1995 ya se

evidencia la actividad minera y se observan procesos de mayor intensidad de la actividad para el 2022 (**Figura 35**).

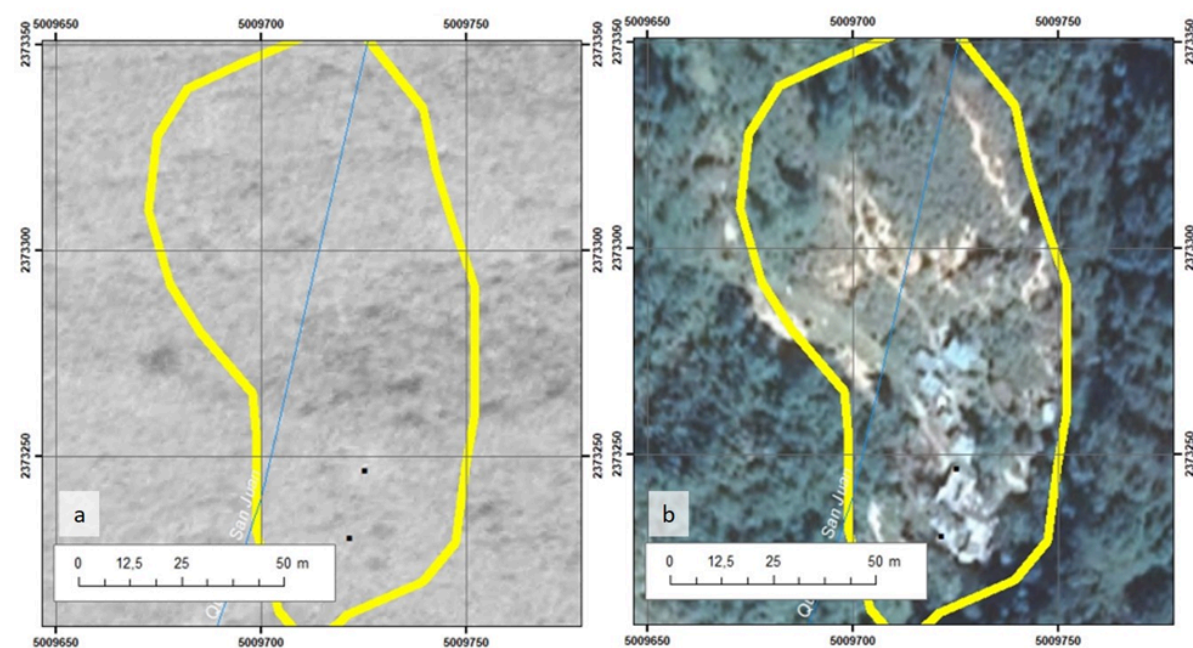


Figura 35. Ejemplo de cambio de cobertura por zona de extracción minera en la cuenca quebrada La Baja. a) Fotografía aérea 1995; b) imagen satelital 2022. Fuente: Elaboración propia.

Lo anterior ilustra los impactos de la minería en términos de la modificación de coberturas. La magnitud en las diferentes escalas estará dada por la extensión de la intervención superficial relacionada con la construcción de infraestructuras para las labores de explotación, beneficio y disposición de desechos.

11. Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con el análisis detallado realizado en este documento, el área propuesta para la declaratoria de la reserva temporal cumple con varios de los criterios consignados en el artículo 2 del Decreto 044 de 2024.

El análisis y documentación de impactos de la minería, en relación con algunas características particulares de esta región, mostró que la remoción de materiales geológicos, la alteración de las direcciones de flujo de agua subterránea, el descenso del nivel freático y la consecuente afectación del flujo base relacionada con la extracción o salida de agua a través de las excavaciones, puede afectar la oferta y disponibilidad de agua, especialmente porque se reconocen condiciones de sensibilidad ambiental, como la conexión entre las aguas subterráneas y el drenaje superficial. Investigaciones desarrolladas por el SGC indican que el agua que fluye desde el páramo drena por las estructuras asociadas a la minería, como

túneles, pozos y surgencias antrópicas. Los volúmenes de agua que drenan por los túneles de la gran minería puede estar en órdenes de magnitud por encima de los que pueden drenar por túneles de la pequeña minería, implicando a su vez mayor potencial de afectar el flujo base de cuerpos de agua superficial.

La disposición de desechos mineros y la construcción de infraestructura en los cauces y márgenes de las fuentes hídricas, principalmente de la mediana y gran minería, alteran la dinámica fluvial e influyen en los procesos de erosión y socavación, contribuyendo a la generación de posibles escenarios de represamiento que ponen en riesgo la vida de las personas y sus medios de subsistencia. Además, los cambios de cobertura de la tierra asociados a tala de bosques, descapote de suelos y construcción de infraestructura, alteran la extensión, geometría y estructura del suelo, lo que constituye una variable adicional que contribuye a la generación de movimientos en masa.

Las excavaciones o el desarrollo de túneles también implican cambios adicionales en el paisaje: como la modificación de la topografía, las pendientes y/o el cambio en la orientación de las laderas. Estos cambios morfométricos controlan los regímenes hidrológicos y, por lo tanto, su modificación puede contribuir a variaciones en las direcciones de flujo superficial y subterráneo, con implicaciones para los ciclos biogeoquímicos en la zona de interés. Todas estas transformaciones pueden, además, acelerar la degradación de suelos y macizos rocosos, modificar las propiedades geomecánicas y propiciar la inestabilidad del terreno.

Análisis fisicoquímicos del agua en drenajes provenientes de estructuras mineras, i.e. túneles de exploración de gran minería y de explotación de minería de pequeña escala, así como en cuerpos de agua receptores de residuos y vertimientos mineros, han revelado la presencia de arsénico, níquel, plomo y cadmio en concentraciones que superan los valores de referencia. Estos hallazgos se relacionan con liberación y movilización acuosa de elementos potencialmente peligrosos a partir de procesos de generación de drenaje ácido de mina (DAM) y subrayan la necesidad de realizar estudios geoquímicos sistemáticos y detallados, así como de implementar estrategias de manejo ambiental que minimicen los riesgos asociados al DAM.

Otros indicios sugieren la exposición radiactiva para la población ante la presencia de radionúclidos de ocurrencia natural. En las cuencas del río Suratá y la quebrada La Baja, particularmente, existe un incremento en los valores de tasa de dosis gamma que parece tener relación con la mayor exposición de roca en superficie a causa de la actividad minera.

Aparte de las actividades y estructuras que promueven la movilización de elementos potencialmente peligrosos a partir de la roca afectada, los resultados de la caracterización geoquímica de pequeñas comunidades mineras en las zonas del río Suratá, realizadas por el SGC, permiten concluir que se ha producido contaminación de las aguas y sedimentos, debido a la introducción de mercurio y otros metales tóxicos en el proceso de beneficio. Los desechos mineros, como botaderos o relaves, constituyen fuentes de dispersión de estos elementos

potencialmente peligrosos (EPP), lo que pone en riesgo la salud de las comunidades y poblaciones locales.

Los EPP afectan negativamente la calidad de los cuerpos de agua superficial, subterránea, los sedimentos, los suelos y la salud de las comunidades expuestas. Elementos como el mercurio debido a su persistencia en el ambiente y su capacidad de bioacumulación y biomagnificación, representan amenazas en el largo plazo, que según la vulnerabilidad y exposición de los habitantes locales pueden incidir en el desarrollo de enfermedades neurodegenerativas, renales, cardiovasculares, entre otras.

Si bien se evidenciaron impactos y factores de riesgo comunes a cualquier actividad minera, algunos de estos se pueden magnificar con la escala: la gran minería implica la remoción de volúmenes de materiales geológicos mucho más significativos - entre uno y tres órdenes de magnitud respecto a la pequeña minería, según estimaciones preliminares presentadas en este informe - lo que incide en una pérdida de capacidad de almacenamiento de agua subterránea, relativa entre las dos escalas, en los mismos rangos.

Los abatimientos en la gran minería pueden ser calificados cualitativamente como regionales - con magnitudes de hasta cientos de metros en vertical y kilómetros en cuanto a extensión areal - respecto a aquellos locales y de menor magnitud de la pequeña minería. Esto también implica que en la gran minería aumenta significativamente la exposición de los materiales geológicos a condiciones aeróbicas que favorecen el incremento de la solubilización y desestabilización de minerales y consecuentes procesos erosivos, que se reflejan en cambios relativos del contenido de EPP y turbiedad en el agua. Así mismo, la mediana y gran minería requiere la disposición de grandes depósitos de relaves, lo cual constituye un factor de riesgo adicional en términos de contaminación y posibilidad de fallas o colapso.

La diferencia en el potencial de generación de DAM entre la pequeña y la gran minería en esta región puede radicar principalmente en dos aspectos: (1) El primero es que la pequeña minería explota la zona oxidada. Ésta comprende la zona insaturada del subsuelo que permite el flujo de oxígeno atmosférico y los subsecuentes procesos de oxidación de sulfuros, acidificación de aguas y liberación de elementos potencialmente peligrosos. Dado que la minería a pequeña escala explota una zona que ya tiene una oxidación parcial de los minerales acidificantes y, adicionalmente, generación de pátinas de óxidos sobre minerales acidificantes -que protegen dichos minerales de oxidación adicional-, tendrían lugar, desde una perspectiva teórica, procesos de generación (oxidación) más lentos y menor probabilidad de acidificación de los volúmenes de agua. La minería a gran escala, por el contrario, podría transgredir la zona oxidada, exponiendo continuamente grandes superficies de roca a oxígeno atmosférico que acelerarían procesos de oxidación, acidificación y liberación elementos potencialmente peligrosos contenidos en los minerales degradados. (2) El segundo aspecto consiste en las superficies de roca expuesta, la cual sería, de manera muy general, mayor en la gran minería,

comparada con la pequeña minería. Esto influiría principal y significativamente en la masa de elementos potencialmente peligrosos liberados en el medio acuoso y no necesariamente en la magnitud acidificación del mismo.

Los impactos diferenciales de los procesos de beneficio son mucho más difíciles de establecer por la coexistencia de condiciones de informalidad minera en la región y el uso de sustancias prohibidas por la ley como el mercurio. Sin embargo, se anticipa que en todas las escalas e, incluso, en operaciones amparadas bajo permisos ambientales y mineros, pueden utilizarse sustancias peligrosas desde el punto de vista toxicológico como las sustancias cianuradas.

Las condiciones de degradación ambiental asociadas a los impactos ya identificados de la minería en la zona y los potenciales impactos derivados del desarrollo de nuevos proyectos de gran minería van en contravía de escenarios tendenciales como los identificados por la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, los cuales señalan la necesidad de intervención intencionada para conservar o mejorar las condiciones de las cuencas que conforman la reserva temporal propuesta. Por ejemplo, en Cáchira Sur, la CDMB (2019) advierte sobre la necesidad de definir y ejecutar medidas de adaptación y mitigación para proteger las fuentes hídricas y realizar un uso racional del agua.

Aunque se requiere generar mayor conocimiento para llegar a cuantificar y delinear de mejor manera los valores geoambientales de este territorio y su vulnerabilidad ante la ejecución de ciertas actividades antrópicas, los elementos planteados aquí ilustran la existencia de zonas ambientalmente importantes desde el punto de vista del ciclo del agua, como acuíferos fracturados, zonas de recarga, manantiales y ríos que se ven alimentados por el agua subterránea. Se debe resaltar además la condición de zona abastecedora que tienen cuencas como la del río Suratá para el suministro de agua hacia Bucaramanga y áreas metropolitanas.

De acuerdo con el artículo 4 del Decreto 044 de 2024, se deberán adelantar los estudios técnicos necesarios y los correspondientes procesos para la declaratoria de áreas protegidas dentro de la reserva temporal o para la definición de estrategias de conservación. Por ejemplo, se recomienda ahondar en estudios hidrogeológicos que permitan caracterizar de mejor manera las propiedades hidráulicas de los medios fracturados, realizar inventarios detallados de manantiales, establecer de mejor manera el grado de conexión entre las aguas superficiales y subterráneas en la zona, delinear zonas de recarga teniendo en cuenta criterios de deformación estructural, entre otros. Así mismo, aunque algunos de los datos de suelos existentes para la zona sugieren el predominio de valores de pH ácidos, se recomienda realizar estudios que analicen las propiedades de minerales, estabilidad de agregados y la micro y macro biota, en comparación con zonas equivalentes pero no afectadas por la minería.

Dados los hallazgos de presencia de elementos potencialmente peligrosos en matrices ambientales como el agua o el sedimento, es recomendable realizar estudios espacial y temporalmente sistemáticos que permitan la identificación de EPP en el ambiente (en rocas,

suelos, sedimentos y agua) para conocer su concentración y movilización. Lo anterior considerando las dinámicas hidroclimatológicas de las cuencas hídricas implicadas. Esta información es básica para la gestión ambiental, del riesgo en la cuenca, la protección de la calidad del agua y la evaluación de impactos en la salud.

Mientras tanto, establecer esta reserva podría mitigar los impactos de algunas actividades antrópicas, mediante la implementación de medidas de protección de ecosistemas estratégicos, y proporcionaría un marco regulatorio para el control de las actividades mineras y la preservación de la calidad y cantidad del agua, garantizando un suministro sostenible para las comunidades y la biodiversidad.

12. Anexos

Anexo 1

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1r10HzNGt84bN-J2x24pnjmV-nJrd0VKM/edit?gid=981686766#gid=981686766>

Anexo 2

https://docs.google.com/document/d/1TjiBWd2y5GijvkhKlHshO_LgPtdCHkLw/edit

Anexo 3

https://drive.google.com/file/d/1dxh4cWlx3AMadmizRYATZYuiK8_7oahR/view?usp=drive_link

Anexo 4

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1rwBV-89MmXzS5U1YrLQ5RzkInsZWv0jF/edit?gid=1059439621#gid=1059439621>

Anexo 5

https://docs.google.com/document/d/1liFXxWJJZz_XdHCZE7Lt3vq_sBvF8Eo/edit?usp=drive_link

Anexo 6

https://docs.google.com/document/d/1sbRWLLSCGqwyLaAZID5xcR96MCUNH6A0/edit?usp=drive_link&oid=114033370951732738955&rtpof=true&sd=true

13. Referencias

Aduvire, O. (2006). Drenaje ácido de mina generación y tratamiento. Instituto Geológico y Minero de España. Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente.

Agencia de sustancias tóxicas y el registro de enfermedades - ATSDR (2019). Substance Priority List | ATSDR. U.S Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry. <https://www.atsdr.cdc.gov/SPL/index.html>

Altun, A.O.; Yilmaz, I. & Yildirim, M. (2010). *A short review on the surficial impacts of underground mining*. Sci Res Essays, 5(21), 3206-3212.

Aponte, D., Alvarado, L., Lozano, D., Trejos, G., Velásquez, M., González, H., Reina, C., Marínez, J., Aldana, T., Salcedo, M., Gamboa, C. y Larrota, L. (2024). Impactos geoambientales asociados a movimientos en masa [en proceso de publicación]. Bogotá D.C.: Servicio Geológico Colombiano.

Ávila Gamboa, A. M., Cardozo Arena M. D., Cruz Fonseca L. V., Medina Pérez O. M., y Sánchez L. H.. (2021). Influencia de los polimorfismos en las enzimas glutatión peroxidasa y tioredoxinas sobre los niveles de selenio como nefroprotectores en personas ocupacionalmente expuestas a mercurio.

Bautista, S.Y., Cáceres, A.M., Romero, F.A. Zamora, A. y Zappa, L.F. (2016). Exploración de Minerales Energéticos a partir de Mediciones Gamaespectrométricas para Potasio, Uranio y Torio Área Simacota – Lebrija y Área de California, departamento de Santander. Escala 1:25000. Servicio Geológico Colombiano. Memoria. Bogotá

Bell, F. G.; Stacey, T. R.; & Genske, D. D. (2000). Mining subsidence and its effect on the environment: some differing examples. *Environmental Geology*, 40, 135-152.

Bissig, T., Mantilla Figueroa, L. C., y Hart, C. J. R. (2014). Petrochemistry of igneous rocks of the California-Vetas mining district, Santander, Colombia: Implications for northern Andean tectonics and porphyry Cu (-Mo, Au) metallogeny. *Lithos*, 200–201(1), 355–367. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.05.003>.

Candela Soto, A. M., Londoño Escobar, J. I., Mojica Buitrago, J., Duarte Hernández, P., Abuela, F. M., Ramírez Pita, González, Óscar F., Franco, L. I., Vélez, J., Valencia, D. P. (2024). Guía metodológica para el mejoramiento productivo del beneficio de oro sin el uso del mercurio: Vetas, California y Suratá (Santander). [En preparación] Libros del Servicio Geológico Colombiano. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Cañas, H., Herrera, W., Ruiz, D., Manotas, D., Galvis, M., Viana, F., Ocampo, E., Becerra, J., Sotelo, A. y Porras, A. (2022). Generación de conocimiento hidrogeológico que permita establecer la ocurrencia, origen y conexión entre los flujos de agua subterránea de la cuenca alta de las quebradas La Baja y Angosturas con el Páramo de Santurbán mediante técnicas hidrogeoquímicas e isotópicas. Bogotá D.C.: Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/10.14.2022.1028>.

Cavanagh, J.E., Pope, P., Simcock, R., Harding, J.S., Trumm, D., Craw, D., Weber, P., Webster-Brown, J., Eppink, F., Simon, K. 2018. Mine Environment Life-cycle Guide: epithermal gold mines. Center for Minerals Environmental Research. New Zealand.

Cediel, F. (2019). Phanerozoic Orogens of Northwestern South America: Cordilleran-Type Orogens. Taphrogenic Tectonics. The Maracaibo Orogenic Float. The Chocó-Panamá Indenter. En F. Cediel y R. P. Shaw (Eds.), *Geology and*

Tectonics of Northwestern South America. (pp. 97–112). Frontiers in Earth Sciences. Springer, Cham. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9>

Cherry, J.A.; Parker, B.L. (2004) *Role of Aquitards in the Protection of Aquifers from Contamination: A "State of the Science" Report*. Awwa Research Foundation

Cinelli, G., Tollefsen, T., Bossew, P., Gruber, V., Bogucarskis, K., De Felice, L., & De Cort, M. (2019). Digital version of the European Atlas of natural radiation. Journal Of Environmental Radioactivity, 196, 240-252. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.02.008>

Clark & Fritz (1997). Environmental isotopes in hydrogeology. New York: Lewis Publishers. 311 p. New York.

Colegial, J.; Gómez, S. y Rojas, N. (2006). Cartografía geológica y caracterización estructural de la subcuenca de la quebrada Río Sucio, municipio de Tona, Santander, orientados a definir un modelo hidrogeológico conceptual. Boletín de Geología Vol. 28, No. 2, julio-diciembre de 2006.

Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB). (2014). Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca hidrográfica del río Alto Lebrija. Informe final, 4201 p.

Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga - CDMB, (2019). POMCA río Cáchira Sur Actualización, Informe Final.

Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga - CDMB, (2020). POMCA río Alto Lebrija Actualización, Informe Final.

Delleur, J. (2006). *The handbook of groundwater engineering*. CRC press.

De Miguel, E., Clavijo, D., Ortega, M. F., y Gómez, A. (2014). Probabilistic meta-analysis of risk from the exposure to Hg in artisanal gold mining communities in Colombia. Chemosphere, 108, 183–189. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2014.01.035>

Dethier, E.N., Silman, M., Leiva, J.D., Alqahtani, S., Fernandez, L., Pauca, P., Çamalan, S., Tomhave, P., Magilligan, F., Renshaw, C. y Lutz, D. 2023. A global rise in alluvial mining increases sediment load in tropical rivers Nature 620, 787–793. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06309-9>

Díaz, S. L., & Guerrero, A. M. (2006). Asociaciones mineralógicas de las menas auto argentíferas y su distribución espacial en el yacimiento Angostura (California, Santander). Tesis de Grado. UIS.

Dold, B. and Fontboté, L. 2002. A mineralogical and geo-chemical study of element mobility in sulfide mine tailings of Fe oxide Cu-Au deposits from the Punta del Cobre belt, northern Chile Chemical Geology, 189, 135-163.

Dörr, W., Grösser, J., Rodríguez, G., and Kramm, U., 1995. Zircon U-Pb age of the Páramo Rico tonalite-granodiorite, Santander Massif (Cordillera Oriental, Colombia) and its geotectonic significance. Journal of South American Earth Sciences, 8: 187-194.

El Tiempo. (2024, 1 de agosto). Aris Mining será el dueño mayoritario del proyecto de oro Soto Norte y le apunta a una operación más pequeña. El Tiempo. Recuperado de <https://www.eltiempo.com/economia/sectores/aris-mining-sera-el-dueno-mayoritario-del-proyecto-de-oro-soto-norte-y-le-apunta-a-una-operacion-mas-pequena-3345760>

Embajada de Estados Unidos y Universidad del Rosario. Abril 15 de 2024. Memorias Encuentro Nacional de Minería: Retos y propuestas para una minería legal. Bogotá

Environmental Law Alliance Worldwide - ELAW (2010) *Guidebook for Evaluating Mining Project EIAs*. ISBN# 978-0-9821214-36

Filippini, M; Parker, B.L.; Dinelli, E.; et al (2020) Assessing aquitard integrity in a complex aquifer – aquitard system contaminated by chlorinated hydrocarbons. *Water Res* 171:115388. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115388>

Florez-Vargas, O., Vilanova, E., Alcaide, C., Henao, J. A., Villarreal-Jaimes, C. A., Medina-Pérez, O. M., Rodríguez-Villamizar, L. A., Idrovo, A. J., y Sánchez-Rodríguez, L. H. (2023). Geological context and human exposures to element mixtures in mining and agricultural settings in Colombia. *Science of The Total Environment*, 898, 165632. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.165632>

Freeze, R.A. y Cherry, J.A. (1979) *Groundwater*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, Vol. 7632, 604.

Fúquen, J., Ceballos, L., Pedraza, A. y Marín, E. (2010). *Geología de la Plancha 98 Durania*. Escala 1:100.000. INGEOMINAS

Galvis Ramírez & Cia S.A. (2023, agosto 21). Contaminación con mercurio en el Páramo de Santurbán - Especiales. Vanguardia. <https://www.vanguardia.com/economia/local/2023/08/21/contaminacion-con-mercurio-en-el-paramo-de-santurban-es-peciales-vanguardia/>

Gobierno de Colombia. (2015). Decreto Número 1076 de 2015, por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. *Diario Oficial* No. 49.523.

Gobierno de Colombia. (2016). Decreto Número 1666 de 2016, por medio del cual se adiciona una sección al capítulo 13 del título 1 de la parte 2 del libro 2 del Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. *Diario Oficial* No. 49.981.

Golder (2012) *Updated Preliminary Economic Assessment on the Angostura Gold-Silver Underground Project, Santander Department, Colombia*.

Goldsmith, R., Marvin, R.F., Mehnert, H.H. 1971. Radiometric ages in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 750-D, D44-D49.

Gómez, S. y Anaya, Á. (2004). Acercamiento a un modelo conceptual de recarga de los acuíferos de la región de Bucaramanga. *Avances en recursos hidráulicos - Número 11*, septiembre de 2004 - Medellín - ISSN 0121 – 5701.

Gómez- Isidro, S. (2014). *Aguas subterráneas en zonas de montañas y trazadores ambientales*. Ediciones UIS. Bucaramanga, Santander.

Gomez, S., Taupin, J., Rueda, J. (2015). Estudio hidrodinámico, geoquímico e isotópico de las formaciones acuíferas de la región de Bucaramanga (Colombia). *Revista Peruana GEO-ATMOSFERICA RPGA* (4), 44-61. Bucaramanga.

Gómez- Isidro, S. y Gómez- Ríos, V. L. (2016). Análisis de flujo base usando curvas maestras de recesión y algoritmos numéricos en cuencas de montaña: Cuenca del río Suratá y cuenca del Río de Oro (Santander, Colombia). *DYNA* 83 (196), pp. 213-222.

Gómez, J. y Montes, N., compiladores. (2020). *Mapa geológico de Colombia en relieve 2020*. Escala 1:1 000 000. Servicio Geológico Colombiano, 2 hojas. Bogotá.

Goodman, R. E., D. G. Moye, A. Van Schalkwyk, y I. Javandel (1965), *Ground Water Inflows During Tunnel Driving*, College of Engineering, University of California.

Greystar (2009) Estudio de Impacto Ambiental - Proyecto Angostura. Greystar Resources Ltd.

Gudynas, E. (2015). *Extractivismos: ecología, economía y política de un modo de entender el desarrollo y la naturaleza*. CEDIB, Centro de Documentación e Información Bolivia.

Güiza, L., & Aristizabal, J. D. (2013). Mercury and gold mining in Colombia: a failed state. *Universitas Scientiarum*, 18(1), 33-49.

Herrera, W., Manotas, D., Viana, F., Ocampo, E., Galvis, M., Valbuena, J. (2023). Interacción del ciclo del agua con la actividad minera en la cuenca La Baja del municipio de California, Santander - Páramo de Santurbán. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Hu, L., Zhang, M., Yang, Z., Fan, Y., Li, J., Wang, H., & Lubale, C. (2020). Estimating dewatering in an underground mine by using a 3D finite element model. *Plos one*, 15(10), e0239682.

Hudson-Edwards, K. A.; Jamieson, H. E. & Lottermoser, B. G. (2011). Mine wastes: past, present, future. *Elements*, 7(6), 375-380.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC (2003). Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Santander.

International Atomic Energy Agency - IAEA. (2003). Extent of environmental contamination by naturally occurring radioactive material (NORM) and technological options for mitigation. Technical reports series, ISSN 0074-1914 ; no. 419. STI/DOC/010/419. ISBN 92-0-112503-8

International Atomic Energy Agency - IAEA. (2013). Management of NORM residues. IAEA-TECDOC series, ISSN 1011-4289; no. 1712) ISBN 978-92-0-142710-6

Karmakar, H. & Das, P. (2012) Impact of Mining on Ground and Surface Waters

Kohv, M.; Paat, R.; Lõhmus, A. & Jõeleht, A. (2023). Underground mining magnifies drought impacts in an adjacent protected raised bog. *Ecohydrology*, 16(8), e2594.

Kossoff, D.; Dubbin, W. E.; Alfredsson, M.; Edwards, S. J.; Macklin, M. G. & Hudson-Edwards, K. A. (2014). Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied geochemistry*, 51, 229-245.

Laguado, Erick (2023). Análisis del estilo estructural de la Falla de Suratá, Macizo de Santander. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2023.

Langmuir, D. (1997). *Aqueous Environmental Geochemistry*. Prentice Hall.

Leal-Mejía, H. (2011). Phanerozoic Gold Metallogeny in the Colombian Andes: A tectono – Magmatic Approach. En Tesis de Doctorado. Universitat de Barcelona.

Leal-Mejía, H., Shaw, R. P., y Melgarejo i Draper, J. C. (2019). Spatial-Temporal Migration of Granitoid Magmatism and the Phanerozoic Tectono Magmatic Evolution of the Colombian Andes. En F. Cedié & R. P. Shaw (Eds.), *Geology and Tectonics of Northwestern South America* (pp. 253–410). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9>

Libicki, J. (1982). Changes in the groundwater due to surface mining. *International journal of mine water*, 1(1), 25-30.

Lines, G. (1985). *The ground-water system and possible effects of underground coal mining in the Trail Mountain area, Central Utah* (Vol. 2259). Department of the Interior, US Geological Survey.

Londoño, J., Mojica, J., Abueta, Y., Pérez V., Ramírez, F., Franco, L., González, O., Duarte, P., (2021). Caracterización geometalúrgica y geoambiental de depósitos auríferos en Vetas, California y Suratá. Departamento de Santander-Colombia. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano. En publicación.

López-Isaza, J., Leal-Mejía, H., Luengas Burgos, C. S., Velásquez Cardenas, L. E., Celada Arango, C. M., Sepúlveda Ospina, M. J., Prieto Gómez, D. A., Gómez Casallas, M., y Hart, C. J. R. (2018). Memoria Explicativa Mapa Metalogénico de Colombia: Principios, conceptos y modelos de depósito y manifestaciones u ocurrencias minerales para Colombia (Número August).

MacDonald, D. D., Ingersoll, C. G., & Berger, T. A. (2000). Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 39(1), 20–31. <https://doi.org/10.1007/s002440010075>

Mantilla, F.L.C., Bissig, T., Valencia, V., and Craig, H. 2013. The magmatic history of the Vetass-California mining district; Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 45: 235-249.

Maxwell, A. E. & Strager, M. P. (2013). *Assessing landform alterations induced by mountaintop mining*.

Mendoza, O. H., Duarte, J., Pérez, A., Castellanos, F. y Orejuela, C. J., (2020). Mercurio-Hg. En: Atlas Geoquímico de Colombia, versión 2020, Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Minesa. (2020). Estudio de Impacto Ambiental para el proyecto de explotación subterránea de minerales auroargentíferos "Soto Norte".

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS (2016). Identificación y análisis de impactos de la actividad minera y la explotación ilícita de minerales en los ecosistemas del territorio colombiano. Documento técnico de Investigación científica y sociológica respecto a los impactos de la actividad minera y la explotación ilícita de minerales, en los ecosistemas del territorio colombiano. Bogotá.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (MADS). (2015a). Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado de: <https://www.parquesnacionales.gov.co/porta1/wp-content/uploads/2013/08/Decreto-Unico-Reglamentario-Sector-Ambiental-1076-Mayo-2015.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (MADS). (2015b). Resolución 0631 de 2015. Parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. Recuperado de: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-631-de-2015.pdf>

Ministerio de minas y energía - Minminas. Decreto 1666 de 2016. Octubre 21 de 2016. Artículo 2.2.5.1.5.5.

Ministerio de Protección Social (Minsalud) y Ministerio de Ambiente,Vivienda y Desarrollo territorial. (Minambiente). (2007). Resolución 2115 de 2007, Sistema de control y vigilancia para la calidad del agua. Recuperado de: https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/Resolución_2115_de_2007.pdf

Mojica, J. (2024) Características de desarrollo minero de explotaciones auríferas de Vetass, California y Suratá. Servicio Geológico Colombiano. 23 de Julio de 2024.

Moran, R. (2003). *Mining environmental impacts-integrating an economic perspective*.

Morrill, J., Chambers, D., Emerman, S., Harkinson, R., Kneen, J., Lapointe, U., Maest, A., Milanez, B., Personius, P., Sampat, P., y Turgeon, R. (2022) La seguridad ante todo: Lineamientos para el manejo responsable de relaves, Earthworks, MiningWatch Canada y London Mining Network.

Motyka, J., & d'Obyrn, K. (2022). The radius of influence of mine drainage—definitions, methods of determination, and practical issues. *Journal of Hydrology*, 613, 128422.

Nassar, N. T., Lederer, G. W., Brainard, J. L., Padilla, A. J., & Lessard, J. D. (2022). Rock-to-metal ratio: a foundational metric for understanding mine wastes. *Environmental Science & Technology*, 56(10), 6710-6721.

Neina, D. (2019). The Role of Soil pH in Plant Nutrition and Soil Remediation, Applied and Environmental Soil Science, 5794869, 9 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>

Nordstrom, Darrell & Alpers, Charles & Ptacek, Carol & Blowes, David. (2000). Negative pH and Extremely Acidic Mine Waters from Iron Mountain, California. *Environmental Science and Technology*. 34. 254-258. 10.1021/es990646v.

Nordstrom D.K. (2011) Sulfide Mineral Oxidation. In: Reitner J., Thiel V. (eds) Encyclopedia of Geobiology. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht.

Ofosu, G., Dittmann, A., Sarpong, D., & Botchie, D. (2020). Socio-economic and environmental implications of Artisanal and Small-scale Mining (ASM) on agriculture and livelihoods. *Environmental Science & Policy*, 106, 210-220.

Osorio, J.; Hernández, C.; Torres, E.; Botero, P. & Diederix, H. (2008) Modelo Geodinámico del Macizo de Santander. Escala 1:25.000. Instituto Colombiano de geología y Minería Ingeominas

Pearse, M. J. (2003). Historical use and future development of chemicals for solid–liquid separation in the mineral processing industry. *Minerals Engineering*, 16(2), 103-108.

Pérez, A. J. (2014). Impacto de la minería subterránea en acuíferos: perspectivas en el contexto colombiano. *INGE@UAN - TENDENCIAS EN LA INGENIERÍA*, 3(6). Recuperado a partir de <https://revistas.uan.edu.co/index.php/ingeuan/article/view/355>

Pérez, A., Jiménez, J. F., Mendoza, O., Mendoza, O. H., Ajiaco, F., Castellanos, F., Ceballos, L., Duarte, J., Portilla, K., Cruz, N., Prieto, G., y Winterburn, P. 2020. Atlas Geoquímico de Colombia versión 2020. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Plume, R. (2005) Changes in Ground-Water Levels in the Carlin Trend Area, North-Central Nevada, 1989–2003. USGS

Polania, J.H. 1980. Die Uranvorkommen von California be Bucaramanga (Kolumbien). Dissertation, University of Stuttgart, 152 p.

Pozo Rodríguez, M., y Carretero León, M. I. (2007). Efectos nocivos relacionados con la composición química de los minerales. En C. de la Fuente Rojo (Ed.), *Mineralogía Aplicada - Salud y Medio Ambiente* (pp. 263–284). Thomson Editores España

Priest (1993). *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*. Chapman and Hall.

Rimstidt, J. D. y Vaughan, D. J. (2003). Pyrite oxidation: a state-of-the-art assessment of the reaction mechanism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 67(5): 873-880.

Rincón, M.A., Bautista, S., Cáceres, A., Zamora, A., y Zappa, L. (2016). Exploración de minerales energéticos a partir de mediciones gama espectrométricas para potasio, uranio y torio en el área Simacota – Lebrija y área de California, departamento de Santander.

Rivera-Sánchez, G. Y., y Cruz-Palencia, Y. (2023). Evaluación de los impactos ambientales de la actividad minera sobre la calidad de agua de la quebrada La Baja en el tramo comprendido entre el sector conocido como La Bodega y la confluencia con el Río Vetás en el municipio de California Santander. [Ingeniería Ambiental]. Unidades Tecnológicas de Santander.

Rodríguez, A. (2014). Geology, Alteration, Mineralization and Hydrothermal Evolution of the La Bodega-La Mascota deposits, California-Vetas Mining District, Eastern Cordillera of Colombia, Northern Andes. University of British Columbia.

Rodríguez, A., Bissig, T., Hart, C., y Mantilla, L. C. (2017). Late pliocene high-sulfidation epithermal gold mineralization at the la bodega and la mascota deposits, northeastern cordillera of Colombia. *Economic Geology*, 112(2). <https://doi.org/10.2113/econgeo.112.2.347>

Rodriguez-Villamizar, L. A., Medina, O. M., Flórez-Vargas, O., Vilanova, E., Idrovo, A. J., Araque-Rodriguez, S. A., Henao, J. A., y Sánchez-Rodríguez, L. H. (2023). Chemical Element Mixtures and Kidney Function in Mining and Non-Mining Settings in Northern Colombia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), 2321. <https://doi.org/10.3390/IJERPH20032321/S1>

Rojas, S. (2013). Metalogenia de las mineralizaciones auríferas en la zona de Vetás, Santander. En Tesis de Maestría.

Rojas, S., Molano, J. C., y Cramer, T. (2020). Petrography, microthermometry, and isotopy of the gold veins from Vetás, Santander (Colombia). *Earth Sciences Research Journal*, 24(1), 5–18.

Rubiano, M. J., Vélez, M. A., & Rueda, X. (2020). Minería de oro artesanal y de pequeña escala. Estrategias para su formalización y diferenciación de la minería ilegal. Centro de Estudios sobre Seguridad y Drogas CESED.

Rueda, J.A. (2013). Modelo hidrogeológico conceptual y revisión de la vulnerabilidad, amenaza y peligro a la contaminación del agua subterránea en la CSRL. Tesis de maestría. Universidad Industrial de Santander (UIS).

Ruíz, L. (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.

Rumbo Minero. (2024, 1 de agosto). Aris Mining aumentará su participación en el proyecto Soto Norte al 51%. Rumbo Minero. Recuperado de <https://www.rumbominero.com/colombia/aris-mining-proyecto-soto-norte/>

Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical modelling*, 9(3-5), 161-176.

Samimi, F.; Shahriar, K., & Bascetin, A. (2011). *Environmental impact assessment of mining activities. A new approach for mining methods selection*. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi-Mineral Resources Management*, 113-143.

Sánchez Rodríguez, L. H., Flórez-Vargas, O., Rodríguez-Villamizar, L. A., Vargas Fiallo, Y., Stashenko, E. E., y Ramírez, G. (2015). Lack of autoantibody induction by mercury exposure in artisanal gold mining settings in Colombia: Findings and a review of the epidemiology literature. *Journal of immunotoxicology*, 12(4), 368–375. <https://doi.org/10.3109/1547691X.2014.986591>

Sánchez Rodríguez, L. H., Medina Perez, O. M., Gonzalez, F. R., Cruz, G. R., Muñoz, L. R., y Florez-Vargas, O. (2020). Genetic Polymorphisms in Multispecific Transporters Mitigate Mercury Nephrotoxicity in an Artisanal and Small-Scale Gold Mining Community in Colombia. *Toxicological sciences: an official journal of the Society of Toxicology*, 178(2), 338–346. <https://doi.org/10.1093/TOXSCI/KFAA142>

Scarpelli, W. (2021). The corridor of mineralization in the California gold district, in the Santander Department of Colombia. *Journal of the Geological Survey of Brazil*, 23-41.

Schicht, R. J. & Walton, W. C. (1961). *Hydrologic budgets for three small watersheds in Illinois*. Illinois State Water Survey. Report of Investigation; No. 40.

Schlumberger (2013) Angostura Underground Mine Project. Prefeasibility water management and geoenvironmental studies.

Sharma, R. & Al-Busaidi, T. (2001) Groundwater pollution due to a tailings dam. *Eng Geol* 60:235–244. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00104-6](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00104-6)

Sierra, J., Tabares, L. M., Mendoza, O., Dorado, L. F., Acevedo, M. P., Gonzáles, L. J. y Umaña, J. (2023). *Diagnóstico geoquímico ambiental de la cuenca del río Suratá*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano. <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=340120101069816119000000000>

Sillitoe, R. H., Jaramillo, L., Damon, P. E., Shafiqullah, M., y Escovar, R. (1982). Setting, characteristics, and age of the Andean porphyry copper belt in Colombia. *Economic Geology*, 77(8), 1837–1850.

Singhal, B. B. S., & Gupta, R. P. (2010). *Applied hydrogeology of fractured rocks*. Springer Science & Business Media.

Skousen, J., Ziemkiewicz, P., 1996. *Acid Mine Drainage Control and Treatment*, 2nd ed. National Research Center for Coal and Energy, National Mine Land Reclamation Center, West Virginia University, Morgantown, WV 362 pp.

Smith, L. (2021) *Hydrogeology and Mineral Resource Development*. Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada, 2021.

SRK Consulting (2017) A technical hydrogeological report on the Soto Norte Project, Colombia.

SRK Consulting (UK). (January 01, 2021). NI 43-101 TECHNICAL REPORT FEASIBILITY STUDY OF THE SOTO NORTE GOLD PROJECT, SANTANDER, COLOMBIA. Aris Gold Corporation.

Stumm, W., Morgan, J.J., 1996. *Aquatic Chemistry*. 3rd ed. Wiley, New York.

Sumi, L., & Gestring, B. (2013). *Polluting The Future: How mining companies are contaminating our nation's waters in perpetuity*. Earthworks, Washington, 52.

Tajduś, K.; Sroka, A.; Misa, R.; Hager, S.; Rusek, J.; Dudek, M. & Wollnik, F. (2021). Analysis of mining-induced delayed surface subsidence. *Minerals*, 11(11), 1187.

Theis, C. V. (1938). *The significance and nature of the cone of depression in ground-water bodies*. *Economic Geology*, 33(8), 889–902. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.33.8.889>

Toran, L. & Bradbury, K. (1988). Ground-water flow model of drawdown and recovery near an underground mine. *Groundwater*, 26(6), 724-733.

Ulloa, A. & Gómez, S. (2007). *Memoria Explicativa de la Investigación Geológica e Hidrogeológica en el Macizo de Santander*. INGEOMINASUIS.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation - UNSCEAR (2000). Sources and effects of ionizing radiation. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. *Isotope News*, 578, 10-16. <http://ci.nii.ac.jp/naid/10008636980/en/>

U.S. Environmental Protection Agency (2011) *The Effects Of Mountaintop Mines And Valley Fills On Aquatic Ecosystems Of The Central Appalachian Coalfields (2011 Final)*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-09/138F, 2011.

Vargas, R. y Arias, A. (1981). Geología de la Plancha 97 Cáchira. Escala 1:100.000. INGEOMINAS

Velandia, F., Cetina, M. y Castellano, E. (2016). Análisis de fracturas y cinemática de fallas geológicas como primer aporte al modelo conceptual de aguas subterráneas en la zona de Charta, macizo de Santander. *Revista de la Facultad de Ingeniería* 31 (2): 37-56.

Vriens, B.; Plante, B.; Seigneur, N. & Jamieson, H. (2020). Mine waste rock: Insights for sustainable hydrogeochemical management. *Minerals*, 10(9), 728.

Wang, P., Sun, Z., Hu, Y., & Cheng, H. (2019). Leaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact. *Science of the Total Environment*, 695, 133893.

Ward, D. E., Goldsmith, R., Cruz, J., y Restrepo, H. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H - 13 Pamplona. *Boletín Geológico Ingeominas*, 21(1-3), 1-132.

Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, J., Jaramillo, L., y Vargas, R. (1977a). Geología de la Plancha 110 Pamplona. Escala 1:100.000. INGEOMINAS

Ward, D., Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz, J., Restrepo, H. y Gómez, E. (1977b). Geología de la Plancha 109 Rionegro. Escala 1:100.000. INGEOMINAS.

Wichlacz, P. L. y Unz, R. F. (1981). Acidophilic, heterotrophic bacteria of acid mine drainage waters. *Appl. Environ. Microbiol.* 41: 1254-1261.

Winter, T. C., Harvey, J. W., Franke, O. L., Alley, W. M., & Survey, U. S. G. (1998). *Ground water and surface water: A single resource*. In Circular. <https://doi.org/10.3133/cir1139>

Wolkersdorfer, C. (2008). *Water management at abandoned flooded underground mines: fundamentals, tracer tests, modelling, water treatment*. Springer Science & Business Media.

Yihdego, Y., & Drury, L. (2016). Mine dewatering and impact assessment in an arid area: Case of Gulf region. *Environmental monitoring and assessment*, 188, 1-13.