

Convenio DU31
Corporación Geoambiental Terrae – World Wildlife Fund
**“Elaborar concepto técnico sobre impactos físicos de la explotación
minera en el Alto Atrato Fase II”**

**En el marco del Proyecto GEF 5 Conservación de la biodiversidad en
paisajes impactados por la minería en la región del Chocó**
Biogeográfico

PRODUCTO 2 Y PRODUCTO 3

**INFORME TÉCNICO DE RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN
OBTENIDA EN CAMPO Y DE REFERENCIA EN LOS COMPONENTES
GEOLÓGICO, GEOMORFOLÓGICO, GEOTÉCNICO, HIDROLÓGICO, CALIDAD
DE AGUA Y BIÓTICO**

Elaborado por

Corporación Geoambiental TERRAE

Profesionales:

Julio Fierro Morales, Geólogo MSc. Geotecnia
Diana Patricia Lozano Zafra, Geóloga MSc Sensores Remotos
Andrés Felipe Castillo Ortegón, Ing. Civil Esp. Recursos Hidráulicos
Ana María Llorente Valbuena, Ing. Ambiental MSc. Geomática
David Alejandro Aponte Rojas, Ing. Civil MSc. Geotecnia
Angélica Maria Batista, Bióloga MSc. Ciencias Biológicas
Erika Cuida López, Geóloga
Daniela Mateus Zabala, Geóloga

Auxiliares:

Lina María Pérez, Geóloga
Natalia Cerón, Geóloga
Pedro Perilla, estudiante de Geología
David Barrios, Biólogo

Junio de 2017

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. Introducción..... | 3 |
| 2. Contexto de los avances en la Fase I | 5 |
| 2.1. Revisión de expedientes y entrevistas con funcionarios de ANM – Medellín y Codechocó | 5 |
| 2.2. Jornada de campo en alrededores de la mina | 5 |
| 3. Análisis de información de campo y de referencia | 6 |
| 3.1. Caracterización geoquímica de materiales..... | 6 |
| 3.1.1. Descripción general del depósito..... | 6 |
| 3.1.2. Geoquímica en roca | 7 |
| 3.1.3. Geoquímica en sedimento activo | 9 |
| 3.2. Geología Estructural y tectónica | 14 |
| 3.2.1. Información de referencia | 14 |
| 3.2.2. Información estructural generada por Terrae..... | 19 |
| 3.3. Geomorfología..... | 22 |
| 3.3.1. Análisis multitemporal de fotografías aéreas..... | 22 |
| 3.4. Geotecnia | 29 |
| 3.4.1. Introducción..... | 29 |
| 3.4.2. Mina El Roble | 32 |
| 3.4.3. Consideraciones generales respecto a factores detonantes de inestabilidad en laderas naturales y en obras de ingeniería | 39 |
| 3.5. Hidrología | 45 |
| 3.5.1. Introducción..... | 45 |
| 3.5.2. Marco conceptual..... | 46 |
| 3.5.3. Metodología y resultados..... | 47 |
| 3.6. Calidad de agua | 53 |
| 3.6.1. Análisis de información de la entidad ambiental y minera | 53 |
| 3.6.2. Análisis de monitoreo in situ | 58 |
| 3.6.3. Análisis de resultados de laboratorio..... | 61 |
| 3.7. Hidrobiota | 65 |
| 3.7.1. Análisis de información de la entidad ambiental y minera | 66 |
| 3.7.2. Análisis de monitoreo in situ | 67 |
| 4. Conclusiones..... | 76 |

1. INTRODUCCIÓN

El Proyecto GEF 5 se estableció para aportar en la Conservación de la Biodiversidad en paisajes impactados por la minería en la Región del Choco Biogeográfico”. El Proyecto GEF 5 “Conservación de la Biodiversidad en paisajes impactados por la minería en la Región del Choco Biogeográfico” es financiado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible con recursos del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (Global Environment Facility, GEF por sus siglas en inglés), implementado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y ejecutado por el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF Colombia), junto con las organizaciones y entidades a nivel regional y local. Este proyecto, se desarrolla en el departamento del Chocó y en la franja occidental de los departamentos de Antioquia, Risaralda, Valle del Cauca y Cauca. Su objetivo principal es proteger la biodiversidad de los impactos directos e indirectos de la explotación minera de oro, plata y platino.

En ese marco, y dada la existencia de actividad minera dentro de dicha región y particularmente en la cuenca del río Atrato, WWF y la Corporación Geoambiental TERRAE establecieron los convenios IE89 en 2016 y DU31 en 2017, los cuales tuvieron por objeto *“Elaborar concepto técnico sobre impactos físicos de la explotación minera en el Alto Atrato”*, donde TERRAE tuvo como meta *“Realizar un estudio de las condiciones geológicas e hidrológicas en la zona de influencia de minería de cobre en el alto río Atrato, para identificación de impactos principales de la minería y proponer ajustes a términos de referencia para los seguimientos de autoridades mineras y ambientales en sus Planes de Trabajos y Obras PTO y Planes de Manejo Ambiental PMA.”*

Para ello en la Fase I (Convenio IE89) se realizó el levantamiento ambiental rápido de aspectos geosféricos, fundamentalmente geología, geomorfología y aspectos de calidad y cantidad de aguas, donde se recogió información primaria independiente por parte del grupo profesional que se desplazó hacia el Carmen de Atrato, municipio donde se ubica la única mina de cobre en explotación en Colombia, denominada El Roble.

En la Fase II (Convenio DU31) dicha información se analizó y confrontó con la información de tres fuentes principales (sin obviar otra información de referencia): la empresa minera, la autoridad ambiental responsable del control y seguimiento que para el caso es Codechocó y la Agencia Nacional de Minería – ANM.

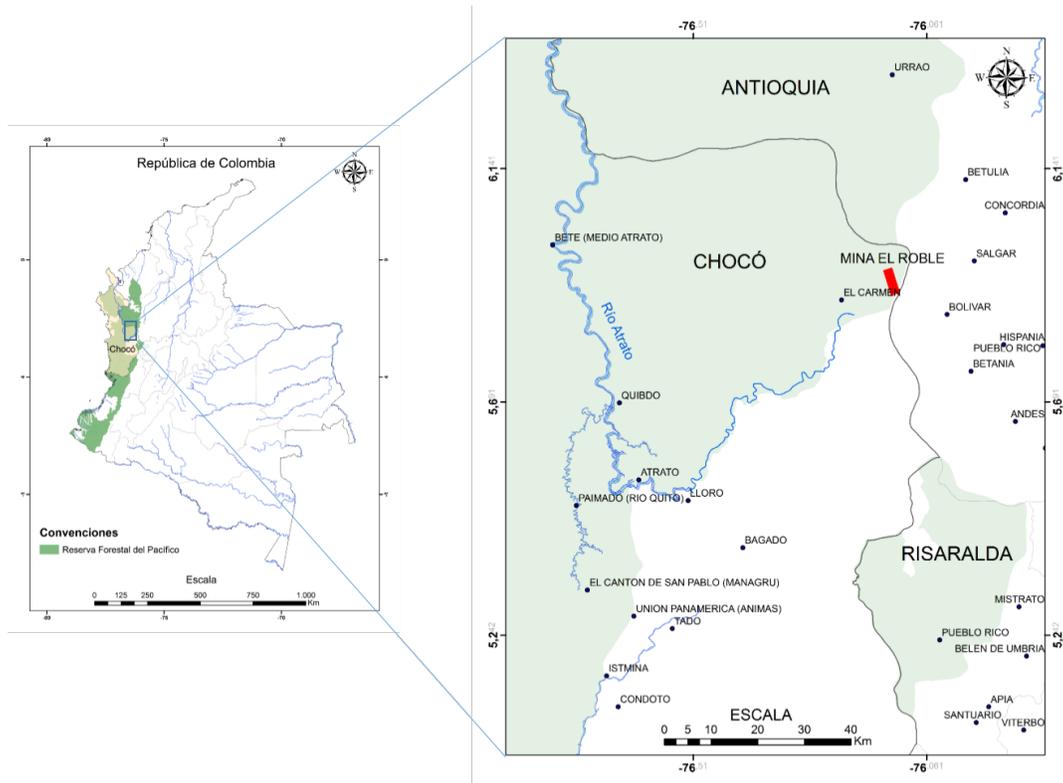


FIGURA 1. LOCALIZACIÓN GENERAL DEL PROYECTO MINERO EL ROBLE. ELABORACIÓN PROPIA

La zona de trabajo se encuentra ubicada en el Departamento del Chocó, municipio de Carmen de Atrato, dentro de la Reserva Forestal del Pacífico (Ley 2ª de 1959) y el título minero tiene código de expedición 9319 (el código del Registro Minero Nacional es FAVD-01) con fecha de inscripción del 20 de marzo de 1990 a nombre de Minera El Roble – Miner S.A. Cabe anotar que es necesario que para llevar a cabo labores mineras es necesaria la sustracción de la reserva, situación que no se había materializado a la fecha de elaboración del presente informe.

Se ubica en la cuenca alta del río Atrato, en zonas muy abruptas, dominadas por secuencias vulcano-sedimentarias relacionadas con la acreción de terrenos geológicos marinos, razón por la cual afloran rocas extrusivas de corteza oceánica intercaladas con rocas sedimentarias de fondo marino que incluyen cherts, areniscas y lodolitas arcillosas. La geomorfología es muy abrupta, con pendientes que pueden superar los 45°, vertientes de rectas a convexas disectadas profundamente por el río Atrato y sus afluentes.

Los tipos de roca, el intenso fracturamiento de los macizos, las pendientes empinadas y largas en un marco de precipitaciones intensas y sismos recurrentes resultan en una zona con alta susceptibilidad a presentar procesos morfodinámicos que incluyen diversas formas de movimientos en masa y erosión, así como precedentes de transporte en masa (avenidas torrenciales).

En ese territorio, se da una explotación minera subterránea de sulfuros masivos vulcanogénicos con presencia de cobre, oro y plata, los cuales son explotados y beneficiados para la exportación de concentrados. Los residuos mineros son los desechos del proceso de beneficio y están constituidos por sólidos de granulometría fina embebidos en una gran cantidad de fase líquida. Estos relaves han sido dispuestos en 4 presas, 3 de

ellas construidas con geometría “aguas arriba”, la cual ha demostrado ser la más inestable.

2. CONTEXTO DE LOS AVANCES EN LA FASE I

En el marco del Convenio IE89 de 2016 y con el fin de iniciar el proceso de elaboración de un concepto técnico sobre impactos físicos de la explotación minera en el Alto Atrato, la Corporación Geoambiental TERRAE realizó las siguientes actividades:

2.1. REVISIÓN DE EXPEDIENTES Y ENTREVISTAS CON FUNCIONARIOS DE ANM – MEDELLÍN Y CODECHOCÓ

Los días 21 y 22 de noviembre de 2016 tres profesionales de TERRAE estuvieron en la sede principal de Codechocó la cual se encuentra en la ciudad de Quibdó. Durante estos días se llevaron a cabo entrevistas con funcionarios de la Corporación (Subdirector de control y seguimiento ambiental y un funcionario de la misma subdirección) y se revisaron el expediente ambiental de Miner S.A – Mina El Roble y las memorias de los muestreos realizados en el río Atrato y disponibles en el laboratorio de aguas de la Corporación. Adicionalmente se visitó el centro de documentación del Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico (IIAP) de Quibdó en busca de información relacionada con la mina.

Los días 23, 24 y 25 del mismo mes se buscó y revisó información relacionada con temas de geología, geomorfología, geotecnia, tectónica, hidrología e hidrobiología en la mina El Roble y sus alrededores en las bibliotecas de la Universidad de Antioquia y la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

El 5 de diciembre de 2016 se solicitó en la oficina de ANM en Bogotá el acceso al expediente correspondiente a la Mina El Roble, sin embargo los funcionarios encargados expresaron la necesidad de contar con una comunicación oficial de WWF para dicha autorización. En ese sentido el 6 de diciembre WWF envió un correo a ANM solicitando la información que era requerida y el 8 de diciembre parte de esta información se recibió a través de correo electrónico.

2.2. JORNADA DE CAMPO EN ALREDEDORES DE LA MINA

Desde el 28 de noviembre hasta el 2 de diciembre de 2016 seis profesionales y cuatro estudiantes de geología llevaron a cabo actividades de campo con el fin de obtener datos independientes de aspectos geosféricos, hidrológicos y de calidad de agua, que más adelante podrían ser contrastados con la información minera y ambiental de referencia para el proyecto minero de extracción de cobre El Roble.

Se realizaron recorridos desde el sector conocido como el Puente de la Dicha (parte alta de la cuenca) hasta la población denominada El Siete (confluencia del río Atrato – El Carmen y el curso principal del río Atrato), en algunas ocasiones acompañados de funcionarios de Codechocó y de la minera Atico Mining. Se obtuvo información en los componentes geológico, geomorfológico, geotécnico, hidrológico y de calidad de agua e hidrobiota distribuidos en 188 estaciones a lo largo del segmento ya descrito. Adicionalmente se realizó muestreo de roca, sedimento activo, agua e hidrobiota para

luego ser enviados al laboratorio de SGS Colombia en la ciudad de Medellín y al laboratorio de la Universidad de Cartagena.

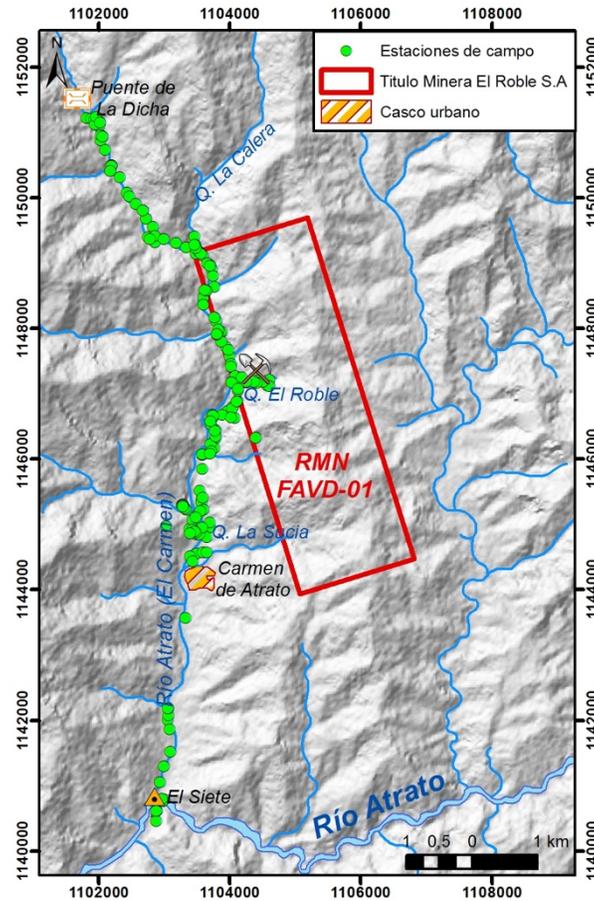


FIGURA 2. ESTACIONES DE CAMPO HECHAS EN LA FASE I. ELABORACIÓN PROPIA

3. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DE CAMPO Y DE REFERENCIA

A continuación para cada componente se hará el análisis de la información de referencia consultada y la suministrada por la entidad ambiental y minera, junto con la información recolectada en campo y en los análisis de laboratorio.

3.1. CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE MATERIALES

3.1.1. Descripción general del depósito

En términos generales, el proyecto El Roble involucra una mina subterránea y objetivos de exploración sobre concesiones que rodean las operaciones subterráneas que se desarrollan para la extracción de un depósito tipo VMS (depósitos formados a partir de la liberación de fluidos hidrotermales en zonas de vulcanismo principalmente submarino) a partir del cual se producen concentrados de sulfuros que contienen cobre (Atico Mining,

2016¹) y algo de oro y plata (Calle y Salinas, 1986²). A su vez, a partir de perforaciones recientes entre los niveles a 2000 m y 1980 m se han identificado mineralizaciones en enjambres de vetillas mineralizadas (tipo *stockwork*) que por lo general subyacen los depósitos exhalativos.

En detalle, la mena en la mina El Roble se presenta de forma masiva, semi-masiva, brechada y diseminada (González & Hernández, 1996³), donde los minerales dominantes son pirita (FeS_2) como el más abundante -35%- aproximadamente (Álvarez *et al.*, 1987⁴) y calcopirita (CuFeS_2) -15%- aproximadamente (Ortiz, 1990⁵; Atico Mining, 2016; Álvarez *et al.*, 1987) dentro de una masa silícea que corresponde al 50% restante (Álvarez *et al.*, 1987).

En la mineralización también se presentan minerales metalíferos en menores cantidades como pirrotina (Fe_{1-x}S), esfalerita ($(\text{Zn},\text{Fe})\text{S}$) y rara vez marcasita (FeS_2) (Ortiz, 1990). También han sido reportados magnetita (Fe_3O_4), tetraedrita ($\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$), hematita (Fe_2O_3) y electrum (Au, Ag) asociados al depósito (González & Hernández, 1996) y como minerales de ganga la hematita y magnetita al igual que el cuarzo, la clorita, la dolomita, la ankerita, la sericita y el grafito (González & Hernández, 1996; Atico Mining, 2016) y la covelina, malaquita, azurita, calcantita (minerales de Cu) y limolita como minerales secundarios (Álvarez *et al.*, 1987).

Adicional a la roca mineralizada, en cercanías a la mina se reportan acumulaciones de suelo residual con importantes contenidos de hierro y sulfuros formando capas rojizas conocidas como gossan (Salazar *et al.*, 2005⁶).

3.1.2. Geoquímica en roca

Antecedentes y resultados de laboratorio en roca

Con el objetivo de identificar cuáles especies químicas y en qué abundancia se presentan en las rocas de la zona próxima al proyecto minero El Roble, se realizó una comparación entre los resultados químicos elementales obtenidos utilizando técnicas de cuantificación de elementos traza como la espectrometría de masas (ICP-MS), espectrometría de emisión óptica (ICP-OES) y el arrastre de vapor frío para la detección de mercurio en cuatro muestras de roca recolectadas durante la Fase I del proyecto (Figura 3) y

¹ Atico Mining Corporation (2016). Amended Updated Mineral Resource Estimate, El Roble Copper-Gold Project, Chocó Department, Colombia.

² Calle Z, B; Salinas E, R (1986). Geología y geoquímica de la plancha 165 Carmen de Atrato. Memoria explicativa. Escala 1:100.000. Medellín junio de 1986.

³ González T, J; Hernández M, L (1996). Procesamiento de colas de flotación aurocupríferas-Mina El Roble, Choco. Facultad de Minas - Universidad Nacional de Colombia. Medellín 1996.

⁴ Álvarez G, E; Feldhaus, L; Salazar S, G; Schmidt-Thomé, M (1987). Proyecto Mande - Prospección regional de metales básicos y preciosos en la Cordillera Occidental, Departamento de Antioquia y Chocó. Convenio Colombo-Alemania. Medellín, 1987.

⁵ Ortíz B, F (1990). El Roble, un yacimiento de sulfuros masivos volcanogénico. Boletín de Ciencias de la Tierra No. 9. Facultad de Ciencias de la Tierra Universidad Nacional de Colombia Seccional Medellín.

⁶ Salazar, G; González, L; Muñoz, R; Güiza, S; Moreno, J (2005). Caracterización de unidades litogeoquímicas de la Cordillera Occidental-Fase I. Plancha 165. Bogotá, marzo de 2005.

localizadas según las descripciones de campo y siguiendo la cartografía presentada en INGEOMINAS, 1984⁷ sobre las unidades geológicas denominadas Miembro Urrao y una de ellas (muestra EC-25) sobre la Formación Barroso.

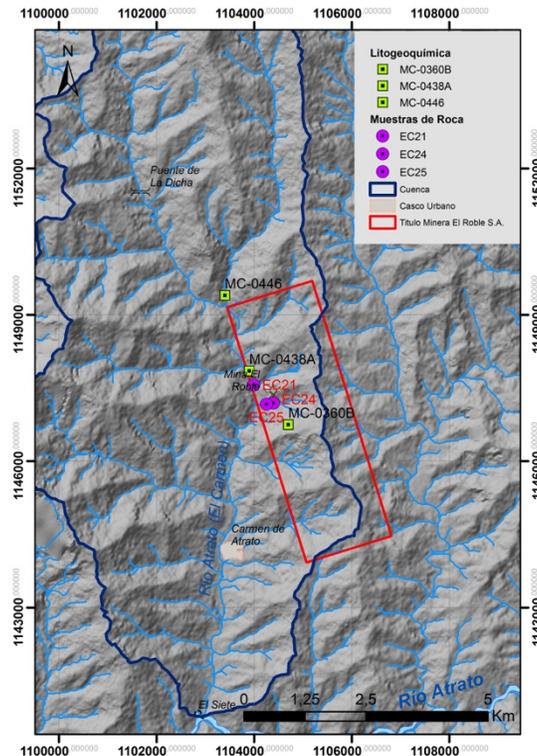


FIGURA 3. LOCALIZACIÓN DE MUESTRAS RECOLECTADAS EN CAMPO DURANTE EL DESARROLLO DE LA FASE I (CÍRCULOS EN MORADO) Y LAS MUESTRAS REFERENCIADAS DEL TRABAJO DE SALAZAR *ET AL.*, 2005 COLECTADAS PARA ANÁLISIS LITOGEOQUÍMICO (CUADROS DE COLOR VERDE). ELABORACIÓN PROPIA

En términos generales, en la zona afloran rocas pertenecientes al Grupo Cañasgordas definido por Álvarez en 1971 y subdividido en las formaciones Penderisco y Barroso. De la Formación Penderisco se reconocen los miembros Urrao y Nutibara, siendo el Miembro Urrao, compuesto por conglomerados, areniscas, shale y chert, con abundantes clastos de vulcanitas básicas y liditas (INGEOMINAS, 2005⁸), el que constituye casi la totalidad de la cuenca del río Atrato.

Por otra parte, la Formación Barroso, localizada entre las rocas sedimentarias que constituyen el Miembro Urrao, se encuentra constituida principalmente por basaltos, diabasas, tobas, aglomerados y sedimentitas clásticas areno-arcillosas (INGEOMINAS, 2005).

Respecto a los resultados químicos en roca, en el Anexo 1 se presentan las concentraciones detectadas a partir del análisis para cincuenta y dos (52) elementos en las cuatro muestras propias junto con las abundancias de elementos traza en las mismas y las obtenidas de tres muestras de roca referenciadas del trabajo de Salazar *et al.*, 2005 en la zona de estudio, puntualmente sobre rocas de la Formación Barroso (Figura 3).

⁷ Calle Z, B; Salinas E, R (1984). Geología de la Plancha 165 Carmen de Atrato. Escala 1:100.000. Versión Digital 2010.

⁸ INGEOMINAS (2005). Geología de la Plancha 165 Carmen de Atrato. Escala 1:100.000.

Estos datos, una vez se tengan los resultados del muestreo en sedimento activo de las muestras colectadas en la Fase I, servirán para identificar las relaciones que puedan existir entre la composición química de los materiales geológicos y la del sedimento fino.

Con relación al análisis de los datos detectados en los ensayos químicos, luego del reconocimiento de los valores base que caracterizan los materiales de la zona, según el análisis de las muestras propias así como los de las muestras de Salazar *et al.*, 2005, y la lectura de los resultados químicos obtenidos y presentados en el Anexo 1, es posible identificar diferencias entre las tres muestras colectadas en las estaciones de campo EC-21, EC-24 y EC-25 y la muestra de la estación EC-37 tomada en el socavón del nivel 1800, justo en una zona mineralizada. Los principales contrastes se presentan en elementos como Cu, donde las concentraciones pasan del rango de 73 – 116 ppm en las estaciones EC-21, EC-24 y EC-25 a valores superiores a las 10.000 ppm (EC-25) que corresponde al límite superior de detección. Igualmente, para el Fe la abundancia en la muestra EC-37 supera el límite superior de detección de 15%, es decir las 150.000 ppm y para Ag y S cuyo límite máximo de detección es de 10 ppm y 5% respectivamente.

También se presenta un aumento considerable en la concentración de otros elementos no metálicos, metálicos y metaloides. Por ejemplo, la concentración de Hg pasa de menos de 0,1 ppm hasta 15,38 ppm, el As aumenta en la muestra EC-37 en hasta 69 veces respecto a la concentración más baja, lo mismo ocurre para el Sb. El Cd aumenta hasta 45 veces respecto a la menor concentración, el Mo aumenta hasta en 33 veces con relación al valor reportado en las muestras de roca sedimentaria cerca al proyecto minero y el Zn aumenta hasta 28 veces respecto al valor promedio de la roca en proximidades a la mineralización, es decir pasa de 74 ppm a un máximo de 3282 ppm.

Igualmente, para otros elementos como Co, U, Pb y Mn se presenta un aumento de concentración en la muestra EC-37 pero en menor proporción.

3.1.3. Geoquímica en sedimento activo

Generalidades

El muestreo geoquímico de sedimento activo es una de las actividades que usualmente se desarrollan durante la etapa de prospección o exploración de depósitos minerales metálicos. Bajo ese término se conoce al material clástico depositado a lo largo del cauce o lecho aluvial de corrientes activas (ríos y quebradas) y que es generado por la meteorización y posterior erosión de las rocas o materiales de la zona drenada.

A partir de este tipo de muestreo es posible conocer la distribución (dispersión) espacial de los elementos químicos de interés (asociados a la mineralización prospectada) además de identificar, a partir de cálculos estadísticos, zonas donde las concentraciones elementales son superiores a las concentraciones promedio de la cuenca, de modo que es posible delimitar áreas factibles para la búsqueda de la mineralización.

Desde otro punto de vista, los resultados del muestreo geoquímico de sedimento dan idea de la disponibilidad elemental en las partículas que han sido removidas de la roca, transportadas y que quedan expuestas a condiciones de oxidación facilitando la liberación de especies químicas tóxicas que pueden ser incorporadas en el agua afectando su calidad.

En todo caso, los resultados del muestreo dependerán entre otros del potencial redox (Eh) y del pH del agua ya que estos afectan la movilidad de los elementos y condicionan si los elementos se encuentran en el fondo aluvial o en disolución al momento de la toma de la muestra.

Antecedentes

En inmediaciones al título minero de El Roble se han realizados algunos trabajos de exploración geoquímica adelantados principalmente por el INGEOMINAS, actual Servicio Geológico Colombiano (SGC), y las compañías mineras que han participado en etapas exploratorias como Nittetsu Mining y Kennecott Minerals, sin embargo, estos últimos corresponden a informes internos de acceso limitado.

Teniendo ello en cuenta, se presentan algunas consideraciones respecto a los trabajos disponibles y más referenciados de prospección geoquímica regional en sedimento fino y concentrados de batea dentro de la zona de estudio realizados por Calle y Salinas en 1986 y Álvarez *et al.*, en 1987, con el objetivo de tener una base que permita la comparación de los resultados obtenidos en trabajos previos con aquellos obtenidos del análisis de seis muestras de sedimento activo colectadas durante la fase de campo (Fase I) en la cuenca del río Atrato, sin embargo, para ello debe considerarse que la toma de muestras en los trabajos revisados se realizó años atrás de modo que a la actualidad, las concentraciones pueden haber variado. Aun así, los datos dan idea general del comportamiento geoquímico en sedimento para la cuenca.

En el trabajo de Calle y Salinas, 1986, se realiza un muestreo geoquímico de sedimento activo (706 muestras) en ríos y quebradas mayores a lo largo del área que cubre la plancha 165. Así, del análisis espectrográfico para treinta y tres (33) elementos en 584 muestras del costado oriental de la carta geológica y su posterior procesamiento estadístico se pudieron establecer los valores normal y umbral en distribuciones lognormales para los elementos de interés que en este caso correspondieron a Ag, Cd, Co, Cu, Mn, Mo, V, Zn, Ba, As, Au, Zr, W y Sr, cabe destacar que según los autores para el periodo en el que se realizó el trabajo, la mina se encontraba cerrada por problemas laborales.

Por otra parte, en el trabajo de Álvarez *et al.*, 1987 fueron recolectadas 2731 muestras de sedimentos finos sobre canales activos y 127 de concentrados de batea. De estas en total se analizaron 2854 por el método de absorción atómica para Cu, Zn, Pb, Co y Ni y algunas para Ag y Mo.

A partir de los resultados de ambos trabajos, principalmente el realizado por Calle y Salinas, 1986, es posible destacar la presencia de algunos elementos químicos en cercanías al proyecto minero como:

- Cadmio (Cd): aunque no fue detectado en la mayoría de las muestras tomadas en el área de la plancha 195, si se reporta una muestra con una concentración de 20 ppm que según los autores estaría contaminada con las colas de la mina El Roble.
- Cobalto (Co): el valor umbral (valor por encima del cual el dato se considera anómalo debido a la alta concentración) corresponde a 64 ppm, sin embargo, a partir del gráfico de distribución de Co según los autores:

identifican valores “anómalos” o superiores al rango normal-umbral, sin embargo, en la zona de desarrollo del proyecto minero, se concentra una mayor cantidad de valores de entre 500-2100 ppm respecto a la parte alta de la cuenca donde predominan aquellos <500 ppm.

- Bario (Ba): El valor umbral se ubica por encima de las 1.700 ppm. Si bien a lo largo de la cuenca del río Atrato los valores se presentan entre <300 ppm y 2000 ppm, los valores entre 300 y 2000 ppm se ubican en cercanías al título minero y la presa número 4 sobre el Miembro Urrao.

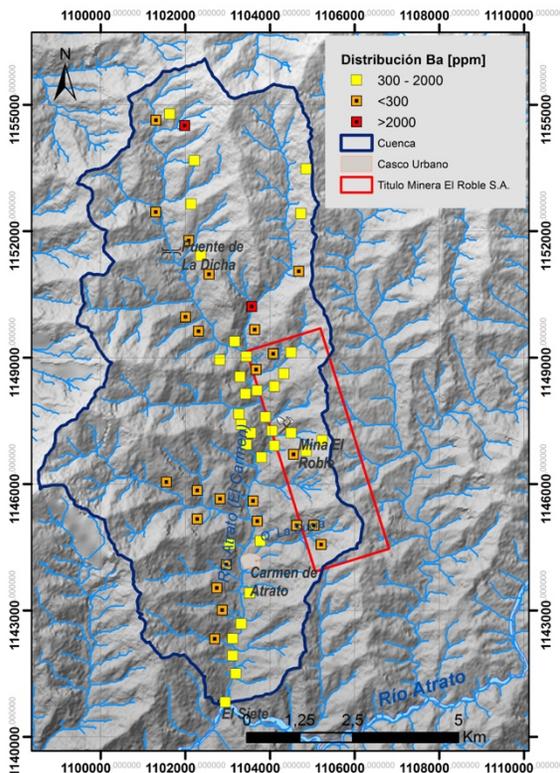


FIGURA 6. CONCENTRACIONES DE BA EN LA CUENCA DEL RÍO ÁTRATO A PARTIR DEL ANÁLISIS QUÍMICO ELEMENTAL DE SEDIMENTO ACTIVO FINO EN LAS MUESTRAS REFERENCIADAS EN CALLE Y SALINAS, 1986.

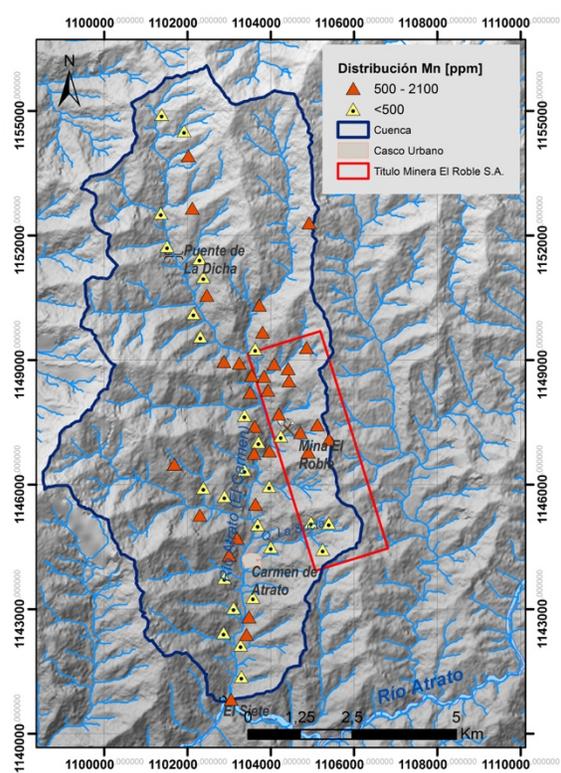


FIGURA 7. CONCENTRACIONES DE MN EN LA CUENCA DEL RÍO ÁTRATO A PARTIR DEL ANÁLISIS QUÍMICO ELEMENTAL DE SEDIMENTO ACTIVO FINO EN LAS MUESTRAS REFERENCIADAS EN CALLE Y SALINAS, 1986.

- Zinc (Zn): En general a lo largo de la cuenca se presentan valores por debajo del límite de detección (200 ppm), sin embargo, algunos valores puntuales entre las 200 y 300 ppm así como por encima de las 300 ppm se presentan en inmediaciones al título minero. Respecto al trabajo de Álvarez *et al.*, 1987, se identifican valores superiores al umbral exactamente de 200 y 225 ppm en las mismas muestras donde se presentan altas concentraciones de cobre a la altura del casco urbano y otra de 210 ppm en la parte alta de la cuenca (Figura 9).

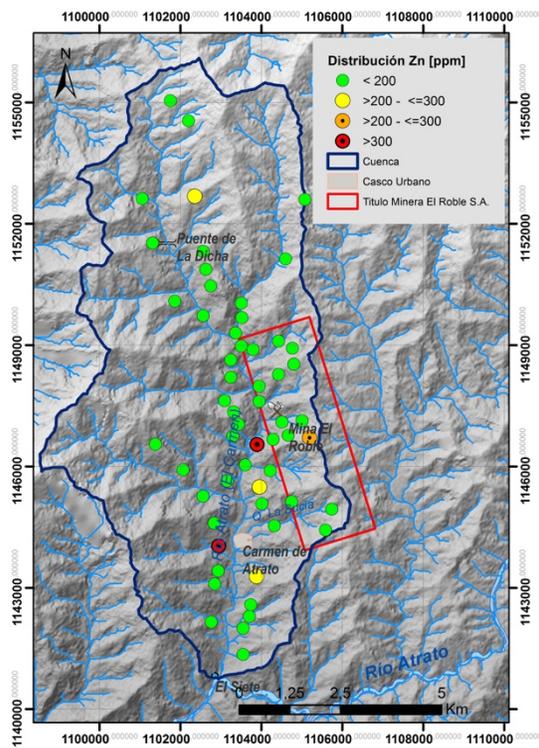


FIGURA 8. CONCENTRACIONES DE ZN EN LA CUENCA DEL RÍO ATRATO A PARTIR DEL ANÁLISIS QUÍMICO ELEMENTAL DE SEDIMENTO ACTIVO FINO EN LAS MUESTRAS REFERENCIADAS EN CALLE Y SALINAS, 1986.

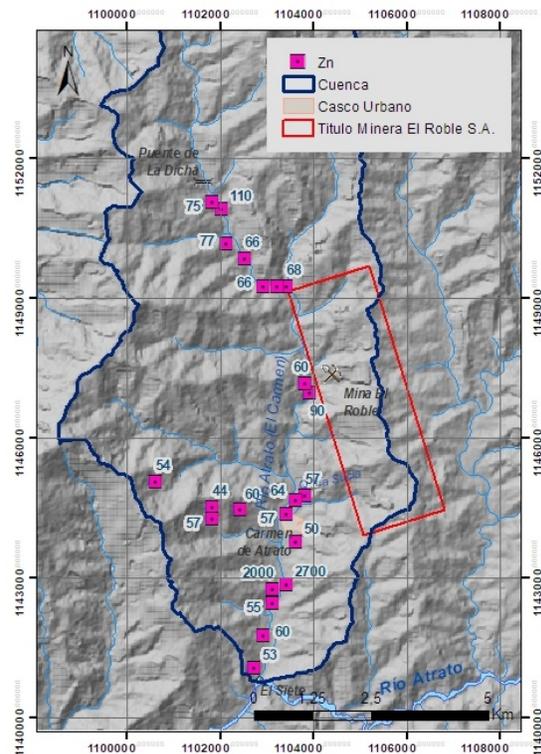


FIGURA 9. CONCENTRACIONES DE ZN EN LA CUENCA DEL RÍO ATRATO A PARTIR DEL ANÁLISIS QUÍMICO ELEMENTAL DE SEDIMENTO ACTIVO FINO EN LAS MUESTRAS REFERENCIADAS EN ÁLVAREZ ET AL., 1987.

Finalmente, de los resultados obtenidos, los autores identifican dos tipos de anomalías en la cuenca del río Atrato además de la alta concentración de elementos como Cu, Zn y Pb y Ni directamente en la zona minera. La primera anomalía relacionada con una concentración puntual de zinc y la segunda identificada por la concentración superior al promedio de dos elementos químicos en cercanías al casco urbano y cuya presencia la asocian con contaminación producto de las actividades mineras:

“Los valores anómalos de Cu y Zn en el río Atrato cerca de Carmen de Atrato representan la contaminación causada por los escombros de la planta de concentración de la mina El Roble.” Álvarez et al., 1987.

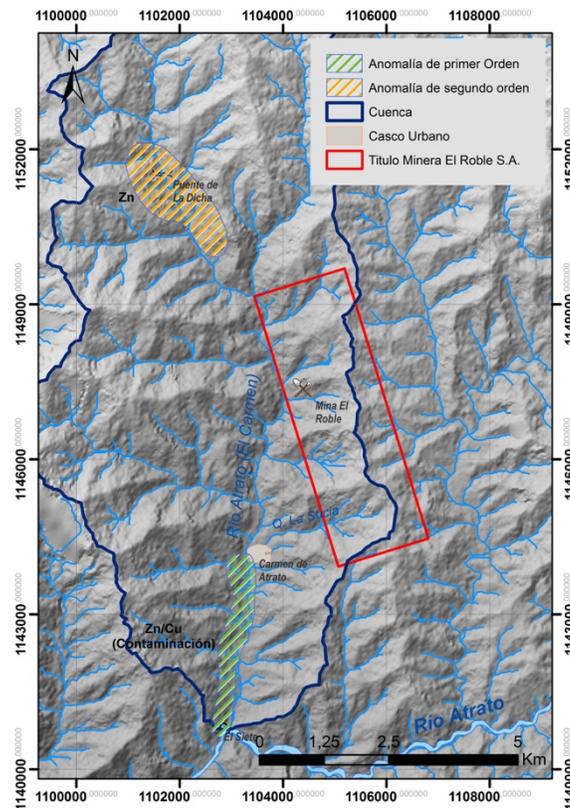


FIGURA 10. UBICACIÓN DE ANOMALÍAS IDENTIFICADAS EN EL TRABAJO DE CALLE Y SALINAS, 1986.

3.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL Y TECTÓNICA

3.2.1. Información de referencia

La disposición estructural de las secuencias rocosas y la huella que deja la deformación tectónica reflejada en fracturas y plegamientos es fundamental en la minería, tanto para poder determinar su influencia en el emplazamiento de los yacimientos, como para generar insumos para los estudios de estabilidad de excavaciones y taludes (las galerías, pozos y sus portales) y para los estudios del comportamiento de aguas subterráneas que también inciden en la estabilidad (como se ha reportado en el caso de la problemática de la galería de explotación en el cuerpo Maximus), en la evaluación de impactos ambientales por abatimientos y/o redireccionamientos de los flujos de aguas subterráneas y en aspectos de sismogeneración (actividad sísmica de las fallas).

No obstante lo anterior, la revisión de la información contenida en el expediente no permite afirmar que se hayan elaborado los estudios necesarios para una comprensión de nivel básico de la deformación tectónica en la zona.

El primer estudio local que muestra estructuras tectónicas es el de Gaviria (1976⁹) donde se muestran diques andesíticos y fallas geológicas (no caracterizadas) con dirección entre

⁹ Gaviria C, A. Estudio geológico de la mineralización cuprífera de “El Roble” (Carmen de Atrato - Chocó). Medellín: 1976. 85 p.

N10W y N40W) que afectan las diferentes secuencias rocosas y en particular a las ubicadas en la mina El Roble (Figura 11).

FIGURA 11. MAPA DE AFLORAMIENTOS QUE INCLUYE ALGUNAS FALLAS GEOLÓGICAS Y DIQUES ANDESÍTICOS, LOS CUALES PERMITEN INFERIR DIRECCIONES DE FRACTURAS PRE-EXISTENTES.

Posteriormente Cuesta & Gómez (2001¹⁰) aluden a los estudios de Calle (1999¹¹) y Nittetsu Mining (1986) para definir que las tendencias de deformación tienen familias dominantes con dirección N-S y NE-SW. También precisan que el rumbo de los cuerpos minerales es de N30°W y una inclinación de 60 a 70° NE. Es interesante notar que en estos estudios se establece que “*existen fallas grandes, pequeñas y zonas cizalladas alrededor y dentro de los cuerpos mineralizados*”. Las fallas son clasificadas en dos grupos. Uno es del tipo N-S: Un ejemplo de este tipo es la que controla el límite este de los cuerpos mineralizados. El otro es del tipo N30°-45°E: Estas se formaron después de las mencionadas previamente por lo tanto cortan las fallas tipo N-S (Nittetsu Mining Co., 1986¹²).

¹⁰ Cuesta A, R., Gómez G, A. Propuesta de método de explotación de los nuevos cuerpos minerales en la mina El Roble. Medellín: 2001. 98 p.

¹¹ Calle, A., Plan de manejo ambiental Mina “El Roble”. Medellín: MINER, 1999. 54 p.

¹² Nittetsu Mining Co LTDA. Exploration report “El Roble” Mine Project. Colombia: 1986. 456 p.

No obstante, los estudios de Calle y Nittetsu no hacen parte de los expedientes o al menos no de los que se encuentran disponibles a la fecha de elaboración del presente informe.

En febrero de 2013, el Consorcio HGC¹³ realiza una visita de campo en el marco de fiscalización minera donde se anota que *“el cuerpo mineralizado lo conforman una serie de lentes, contenidos entre dos fallas, que presentan una dirección de norte 10° al oeste (N10°W) con buzamiento de norte 80° al este (N80°E).”*

En términos del fracturamiento de los macizos no se encuentra en el expediente ningún estudio de caracterización y es necesario también aludir a datos sueltos como el que se encuentra en el informe de fiscalización de HGC (2014¹⁴): *“Se evidencian graves problemas de sostenimiento en las áreas de explotación del mineral (nivel 1880), debido a que los pilares de protección entre niveles presentan problemas de estabilidad los cuales evidencian un alto grado de fracturación, como consecuencia de las altas presiones de los niveles superiores sobre los inferiores, colocando en riesgo la integridad del personal que labora en estos”* (subrayado fuera de texto). Sin embargo, quedan dudas acerca de si el intenso fracturamiento sigue los patrones tectónicos o no.

La información de mejor calidad es la que reposa en los reportes técnicos de la empresa Atico Mining, con fecha de publicación de 2012¹⁵ y 2016¹⁶.

El reporte de 2012 presenta un mapa geológico de detalle en términos de litologías, aunque no en términos de estructuras de deformación tectónica. Sin embargo, la cartografía de diques andesíticos permite inferir la existencia previa de discontinuidades abiertas que permitieron el emplazamiento de magmas que solidificaron dando lugar a los diques (Figura 12)

¹³ Consorcio HGC. Fiscalización integral de títulos mineros. Informe de inspección técnica de seguimiento y control realizada al área del tipo del título minero. Inspección No. 1 del 15 de febrero de 2013. Incluido en el Cuaderno 9 del expediente ANM de la Mina El Roble, página 212 del documento pdf.

¹⁴ Consorcio HGC. Fiscalización integral de títulos mineros. Informe de inspección técnica de seguimiento y control realizada al área del tipo del título minero. Inspección No. 5 del 6 de agosto de 2014. Incluido en el Cuaderno 12 del expediente ANM de la Mina El Roble, página 149 del documento pdf.

¹⁵ Atico Mining (2012). Technical report on the El Roble Project, Chocó Department, Colombia. Prepared by: Greg Smith, B.Sc., P. Geo. & Demetrius Pohl, Ph.D. AIPG Certified Geologist

¹⁶ Atico Mining (2012). Amended Updated Mineral Resource Estimate, El Roble Copper-Gold Project, Chocó Department, Colombia. Prepared by: Michael J. Lechner, P. Geo. Resource Modeling Incorporated & Donald F. Earnest, P. Geo. Resource Evaluation Incorporated

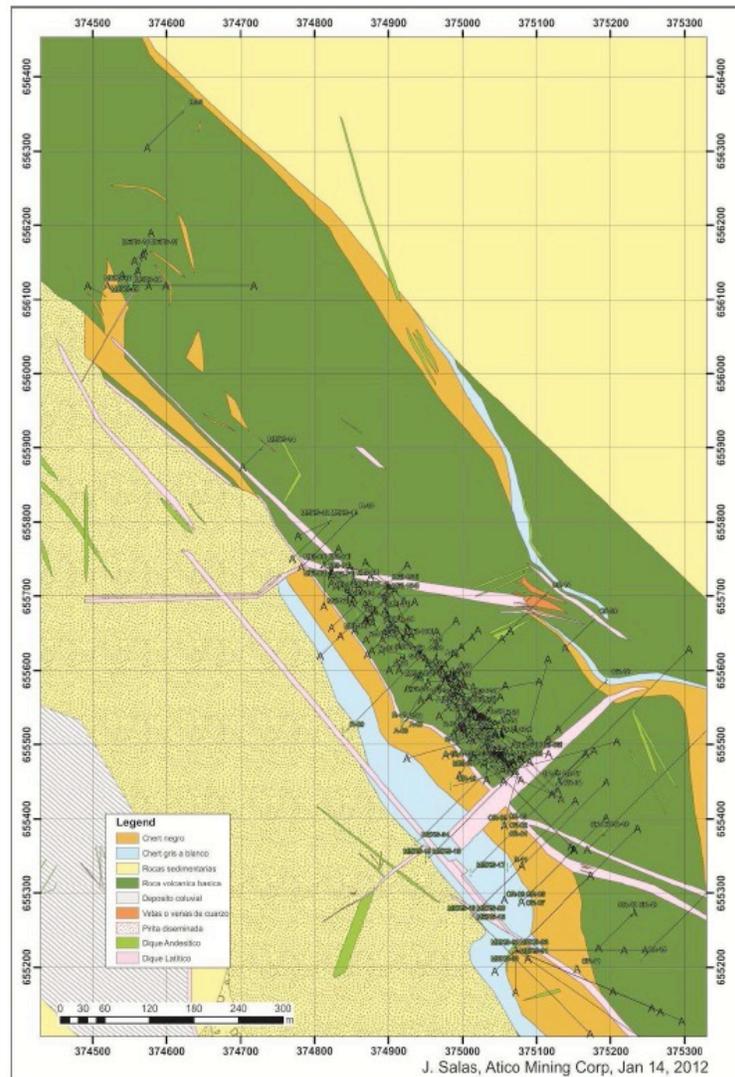


FIGURA 12. MAPA LITOLÓGICO (ATICO MINING, 2012). LA PRESENCIA DE DIQUES PERMITE ACERCARSE A INFERIR UNA TECTÓNICA QUE SE EXPRESA COMO DEFORMACIÓN POR CIZALLA, CON FALLAS Y FRACTURAS PRINCIPALES NW-SE CONJUGADAS CON OTRAS NE-SW.

Además, la dirección de dichos diques permite inferir una posible deformación por cizalla que es soportada también con información geofísica tipo magnetometría, donde las principales anomalías se ubican con dirección de tendencia N45W asociada con otras cercanas a N50E (Figura 13).

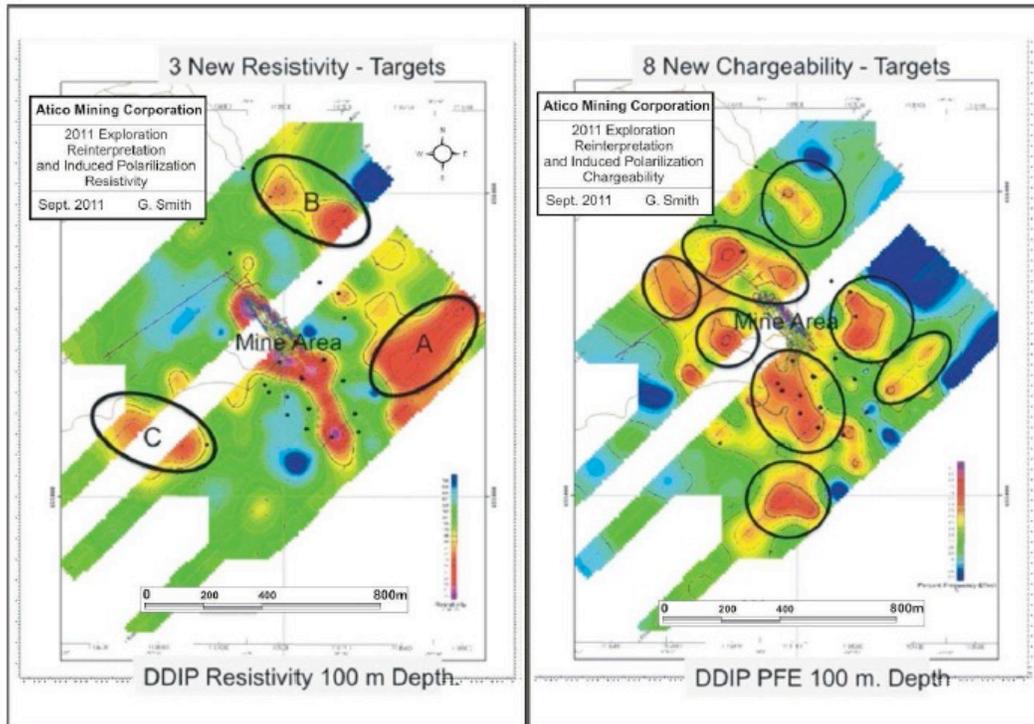


Figure 25: Reinterpreted resistivity and chargeability data showing preliminary target areas around the El Roble mine.

FIGURA 13. MAPA DE RESISTIVIDADES (ATICO MINING, 2012). DE ESTOS DATOS TAMBIÉN ES POSIBLE INTERPRETAR DEFORMACIÓN POR CIZALLA, CON FALLAS Y FRACTURAS PRINCIPALES NW-SE CONJUGADAS CON OTRAS NE-SW.

En el reporte de Atico Mining (2016) también se detecta que los problemas de estabilidad en el cuerpo mineralizado denominado Maximus, la inestabilidad geotécnica se relacionó con estructuras principales y poca calidad de la roca.

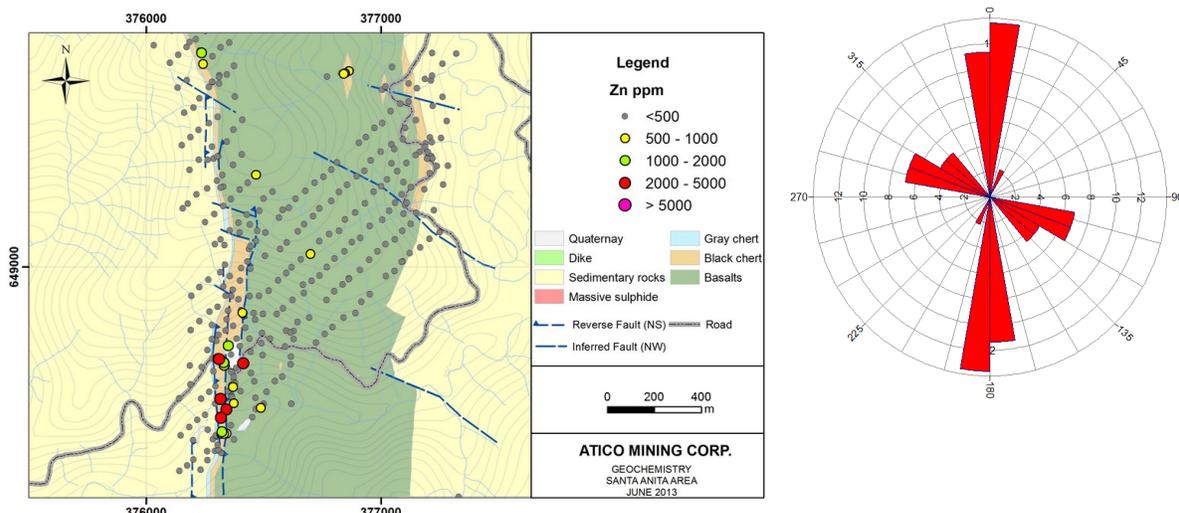


FIGURA 14. MAPA DE GEOQUÍMICA (ATICO MINING, 2013) QUE INCLUYE FALLAS INFERIDAS Y FALLAS INVERSAS (N-S). A LA DERECHA, EL DIAGRAMA ROSA DE FRECUENCIA DE DIRECCIONES.

3.2.2. Información estructural generada por Terrae

Con el fin de generar aportes en el marco tectónico de la zona de estudio, se llevaron a cabo actividades de interpretación de fotografías aéreas, modelos digitales de elevación y medición de fracturas en campo.

El objeto de la fotointerpretación tuvo como enfoque principal las estructuras tectónicas (fallas y lineamientos) y rasgos morfotectónicos como la disposición estructural, la presencia de lineamientos y fallas, ganchos de presión, lomos alineados, etc., que pueden ayudar a identificar las fallas geológicas regionales. Este procedimiento permite articular la información, enlazar los elementos particulares medidos directamente y determinar grandes rasgos del estilo estructural que opera en la zona de estudio y que ha sido responsable de la geomorfología actual junto con los procesos erosivos y denudativos.

Se analizaron diferentes escalas de trabajo, usando el mapa de sombras del modelo digital de elevación en escala 1:100.000 y fotografías aéreas en escalas cercanas a 1:20.000. Se elaboró un análisis de lineamientos sobre el modelo digital de elevación (30 metros), con el cual se tuvo un cubrimiento regional de la cuenca alta del río Atrato. Las fotografías aéreas se circunscribían a las cuencas y zonas adyacentes.

Modelo digital de elevación

Los lineamientos incluyen la coincidencia en el rumbo de formas tales como valles, cuchillas, diaclasas maestras, etc. y permiten inferir que dichas formas están controladas por los sistemas de fracturas y fallas que gobiernan los macizos rocosos, en particular los verticales o subverticales. Dentro de los análisis llevados a cabo se pueden marcar estructuras principales que tienen elementos morfotectónicos tales como cambio de rumbo en las estructuras, lomos de presión, cambios de cauce de ríos principales, entre otros, que permiten inferir sentido de desplazamiento y levantamiento de bloques tectónicos.

Fotografías aéreas

Dentro de los trabajos de fotointerpretación, se llevó a cabo la definición de elementos morfoestructurales que incluyeron lineamientos, trazados de cursos de agua, lomos de presión, disposición estructural y en general, elementos que puedan servir para inferir deformación. Cuando dichas estructuras causan giros o geometrías anómalas en ríos o cuchillas, es posible inferir una dirección de dichas estructuras, de manera que se tengan más elementos para proponer los lineamientos como fallas geológicas.

Toma de datos en campo

Para la caracterización de los aspectos estructurales se tomaron datos de buzamiento y dirección de buzamiento con brújulas tipo Clar, sobre fracturas, planos estriados, planos pulidos y estratificación, entre otros. Además, se han medido elementos estructurales como sistemas conjugados de fracturas tipo Riedel, estrías de fricción, etc. con el fin de suministrar una base para la interpretación preliminar de la configuración de esfuerzos tectónicos en la zona de estudio.

3.2.2.1. Análisis morfotectónicos

Modelos digitales de elevación

Del análisis de lineamientos del modelo digital de elevación se obtuvo que la mayor parte de los lineamientos se encuentran en el rango N60°E a N70°E y que existe un sistema

conjugado N50°W a N60°W. También se observa un sistema de fracturas cortas en dirección aproximada E-W. Es claro el predominio de la deformación transversal típica de la cizalla en la zona de estudio. La observación regional llevaría a plantear un esfuerzo principal mayor cercano a Este-Oeste.

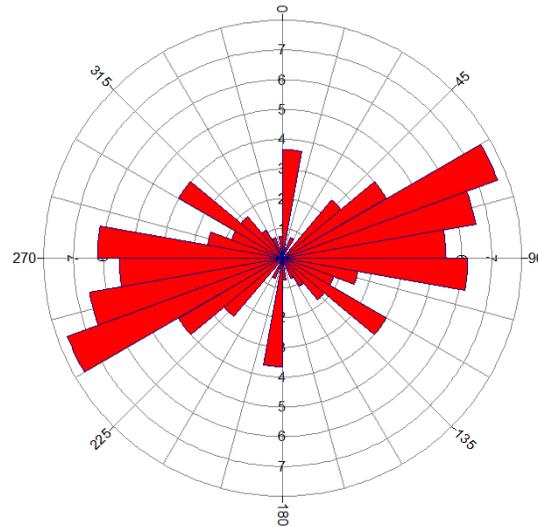


FIGURA 15. DIAGRAMA DE FRECUENCIA DE DIRECCIONES DE LINEAMIENTOS A PARTIR DEL ANÁLISIS DEL MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL PARA LA CUENCA ALTA DEL RÍO ATRATO. NÓTESE EL PATRÓN COINCIDENTE DE FRACTURAS EN DIRECCIÓN NE-SW, CON MAYOR FRECUENCIA EN N60°E, CON UN SISTEMA CONJUGADO N60°W. ELABORACIÓN PROPIA

Interpretación de fotografías aéreas

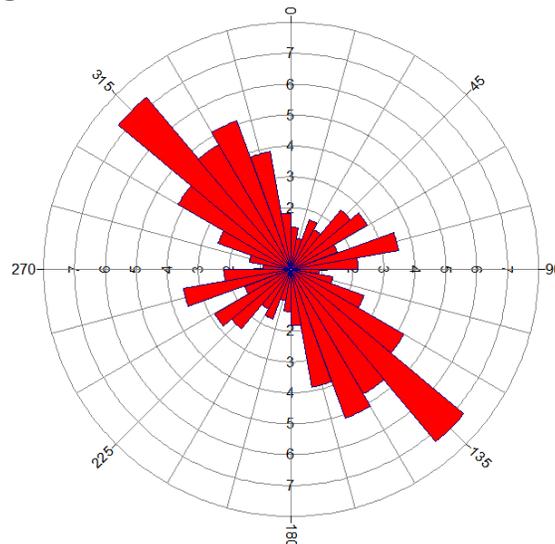


FIGURA 16. DIAGRAMA DE FRECUENCIA DE DIRECCIONES DE LINEAMIENTOS Y DE FALLAS INFERIDAS DE LA FOTOINTERPRETACIÓN PARA LA ZONA DE CARMEN DEL ATRATO. NÓTESE EL PATRÓN MUY PREDOMINANTE DE RASGOS EN DIRECCIÓN NW-SE, CON MAYOR FRECUENCIA EN N45W, CON UN SISTEMA CONJUGADO N70E. NÓTESE QUE A ESTA ESCALA, APARECEN RASGOS CERCANOS A LA N-S QUE DE ACUERDO CON LOS ESTUDIOS DE ATICO MINING (2013) CORRESPONDERÍAN A FALLAS INVERSAS. ELABORACIÓN PROPIA

3.2.2.2. Análisis de información tomada en campo

De acuerdo con las observaciones de disposición estructural de la estratificación en conjunto con las fracturas medidas existentes, así como de la medición directa de diaclasas y de fallas geológicas métricas y centimétricas (fallas mesoscópicas), se obtuvieron diagramas de frecuencias (Figura 17), así como soluciones teóricas de paleoesfuerzos (Figura 18), los cuales permiten calibrar la interpretación de imágenes y proponer de manera más robusta la existencia de fallas geológicas, así como el campo de esfuerzos y su consiguiente modo típico de deformación.

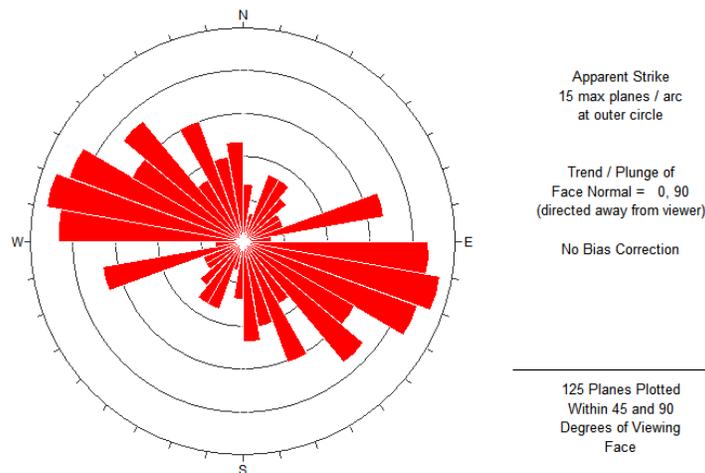


FIGURA 17. DIAGRAMA DE FRECUENCIA DE DIRECCIONES DE PLANOS DE FRACTURA MEDIDOS EN LA ZONA DE LA MINA EL ROBLE. EXISTE UNA MARCADA SIMILITUD CON LA INTERPRETACIÓN DE MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN. ELABORACIÓN PROPIA

Se observó bastante coherencia entre las fallas inferidas del DEM y los datos de medición de fracturas y fallas mesoscópicas con brújula, el cual permite generar una propuesta preliminar de esquema de esfuerzos tectónicos para la zona.

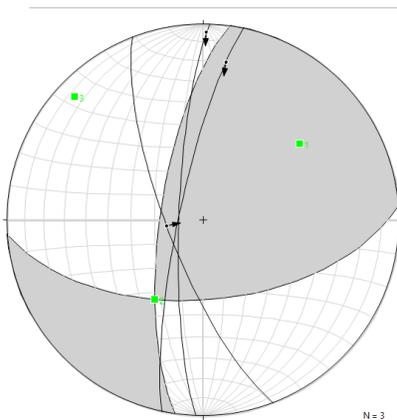


FIGURA 18. GRÁFICA DEL TOTAL DE FALLAS MEDIDAS (3) EN LA ZONA DE EL ROBLE Y EL ESQUEMA DE ESFUERZOS OBTENIDOS. ELABORACIÓN PROPIA

3.3. GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología es una disciplina que tiene por objeto la descripción de las formas del terreno, la explicación de su génesis, o sea de su origen y evolución a través del tiempo geológico, la definición de la naturaleza de los materiales que constituyen las geoformas, la clasificación de los paisajes, principalmente con base en su morfología, origen, edad y composición, y la explicación y descripción de los agentes y procesos geomorfológicos modeladores. (Villota, 1991).¹⁷ Esto último corresponde a la morfodinámica del terreno.

Para el municipio de Carmen de Atrato, los principales procesos son inundación, deslizamientos y represamientos según lo reportado en el EOT del año 1999 -2000¹⁸, en donde se indica que dichos procesos...

“Eventos que se han presentado principalmente en la zona por donde corre el río Atrato, cerca de la cabecera municipal y en afluentes como la Quebrada la Sucia y El Roble, como el sucedido el 15 de noviembre de 1999, el cual se clasifica como un represamiento y avalancha del Río Atrato, que al parecer se originó principalmente por la alta precipitación en la parte superior de la Cuenca”.

Con el fin de diagnosticar los impactos geomorfológicos de la mina El Roble en la quebrada El Roble y poder dar directrices para un adecuado control y seguimiento, se llevó a cabo un análisis multitemporal de fotografías aéreas. En este se identificaron movimientos en masa (antiguos y recientes) y geoformas asociadas a torrencialidad como abanicos y terrazas.

Con los resultados obtenidos se espera, identificar cambios ocurridos en las distintas geoformas (principalmente aquellas de origen aluvial), a través del tiempo, así como zonas inestables y zonas con posible afectación por inundaciones o avenidas torrenciales, que puedan afectar la zona minera.

El presente documento contiene únicamente los resultados de la interpretación de fotografías aéreas. Los análisis cuantitativos de los cambios observados, complementados con el uso del modelo digital de elevación, datos recopilados en campo y bibliografía se llevarán a cabo en el siguiente producto.

3.3.1. Análisis multitemporal de fotografías aéreas

La información obtenida a partir de las fotografías aéreas es un registro verídico de los objetos y fenómenos que se presentan sobre la superficie en el momento de la toma. El uso de ellas facilita el estudio de grandes áreas en poco tiempo, a la vez permite el análisis del mismo fenómeno a escalas diferentes. La resolución temporal obtenida por las fotografías permite estudiar con más precisión la evolución de fenómenos dinámicos desarrollados sobre la superficie terrestre como: vulcanismo, glaciación, erosión de costas, procesos fluviales, movimientos en masa y cambios en áreas urbanas.

Por tal razón el uso de las fotografías aéreas es fundamental para la ejecución del contrato, estas fotografías aéreas fueron seleccionadas según correspondían con las cuencas de la quebrada El Roble y la zona visitada durante la jornada de campo.

¹⁷ Villota, H. (1991). Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de las tierras. Bogotá D.C.: Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC.

¹⁸ Alcaldía municipal. (1999 – 2000). Esquema de Ordenamiento Territorial. Documento resumen.

Las fotografías aéreas interpretadas contemplan dos vuelos en escalas de 1:16.000 a 1:28.000 para la década de los 80 (años 1982 y 1987) y un vuelo para la década de los 2000 (año 2004), como se observa en la siguiente tabla.

TABLA 1. FOTOGRAFÍAS AÉREAS QUE ABARCAN ÁREA DE INFLUENCIA DE MINA EL ROBLE

| VUELO | SOBRE | FECHA | FOTOS | ESCALA |
|--------|--------|------------|---------|----------|
| R-884 | S5858 | 01/08/1982 | 003-006 | 1:22.970 |
| C-2302 | S34187 | 14/08/1987 | 157-159 | 1:27.700 |
| C-2735 | S39673 | 27/06/2004 | 062-066 | 1:16.380 |

De dicha interpretación, con un enfoque geomorfológico - morfodinámico, se lograron identificar movimientos en masa antiguos (línea punteada de color verde) y recientes (líneas punteadas de color rojo), microcuencas que por su alta presencia de movimientos en masa son origen de avenidas torrenciales y geoformas asociadas a depósitos torrenciales como son las terrazas del río Atrato (línea punteada de color azul) y conos o abanicos (líneas punteadas de color negro).

Año 1982

En esta imagen no se detecta intervención debido a la actividad minera. La cobertura de las fotos permite hacer un análisis hasta el punto conocido como Puente de La Dicha. Se identifican movimientos en masa recientes principalmente en la margen izquierda del río Atrato, sobre todo en las microcuencas de las quebradas El Roble y La Sucia. En algunos sectores, el río Atrato presenta llanuras de inundación amplias, pero en su mayoría está constreñido por la presencia de terrazas aluviales de origen torrencial. Se identifican dos niveles de terrazas.

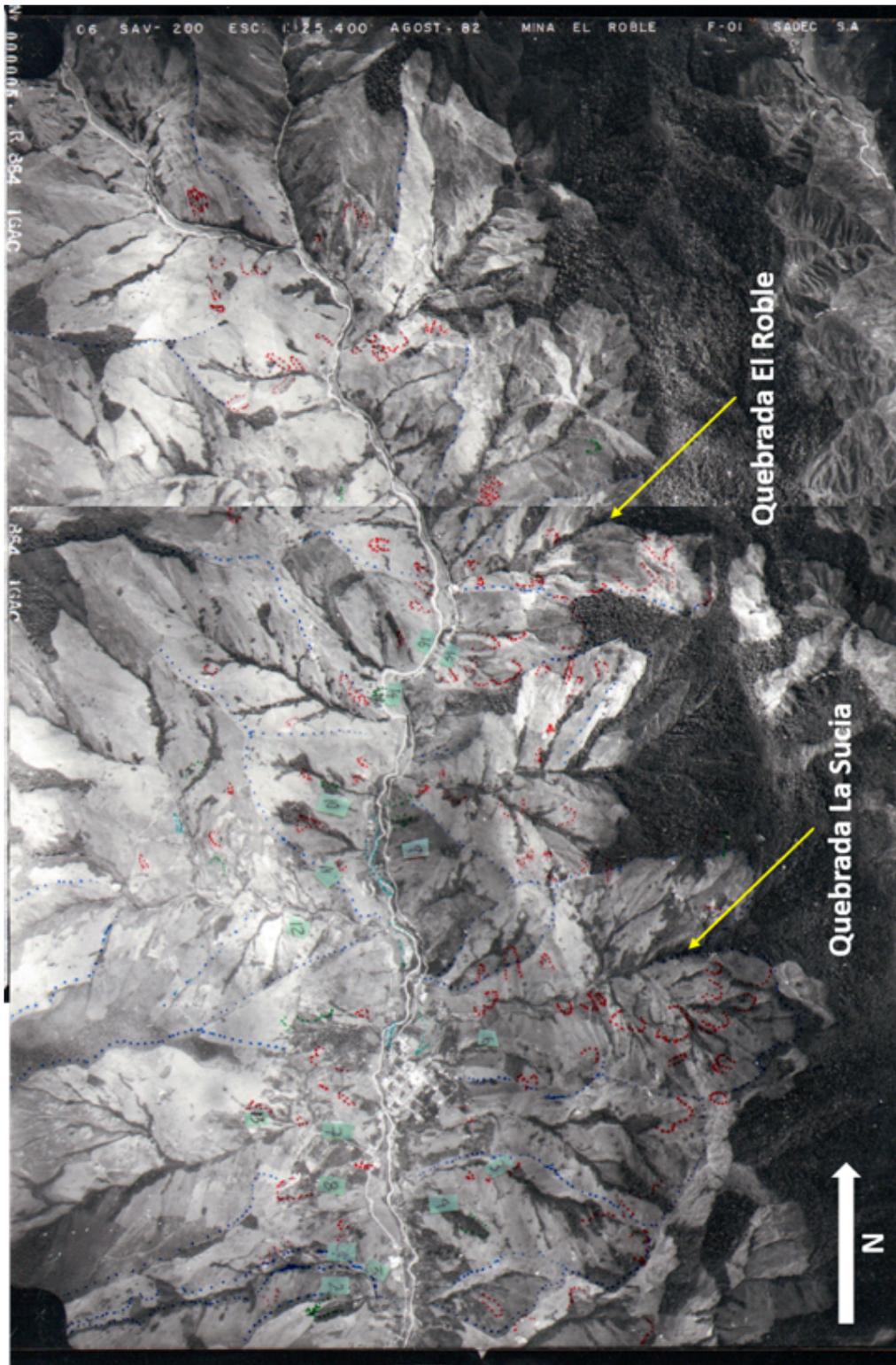


FIGURA 19. FOTOGRAFÍAS AÉREAS 04 Y 05 DEL VUELO R884 DE 1982.

Año 1987

Para este año aún no se observa intervención de la actividad minera en el río ni en la quebrada El Roble representada por la construcción de las presas de relaves. Al igual que para 1982, la única infraestructura minera observada son unas oficinas construidas en la margen izquierda de la quebrada el Roble, justo donde esta desemboca en el Río Atrato.

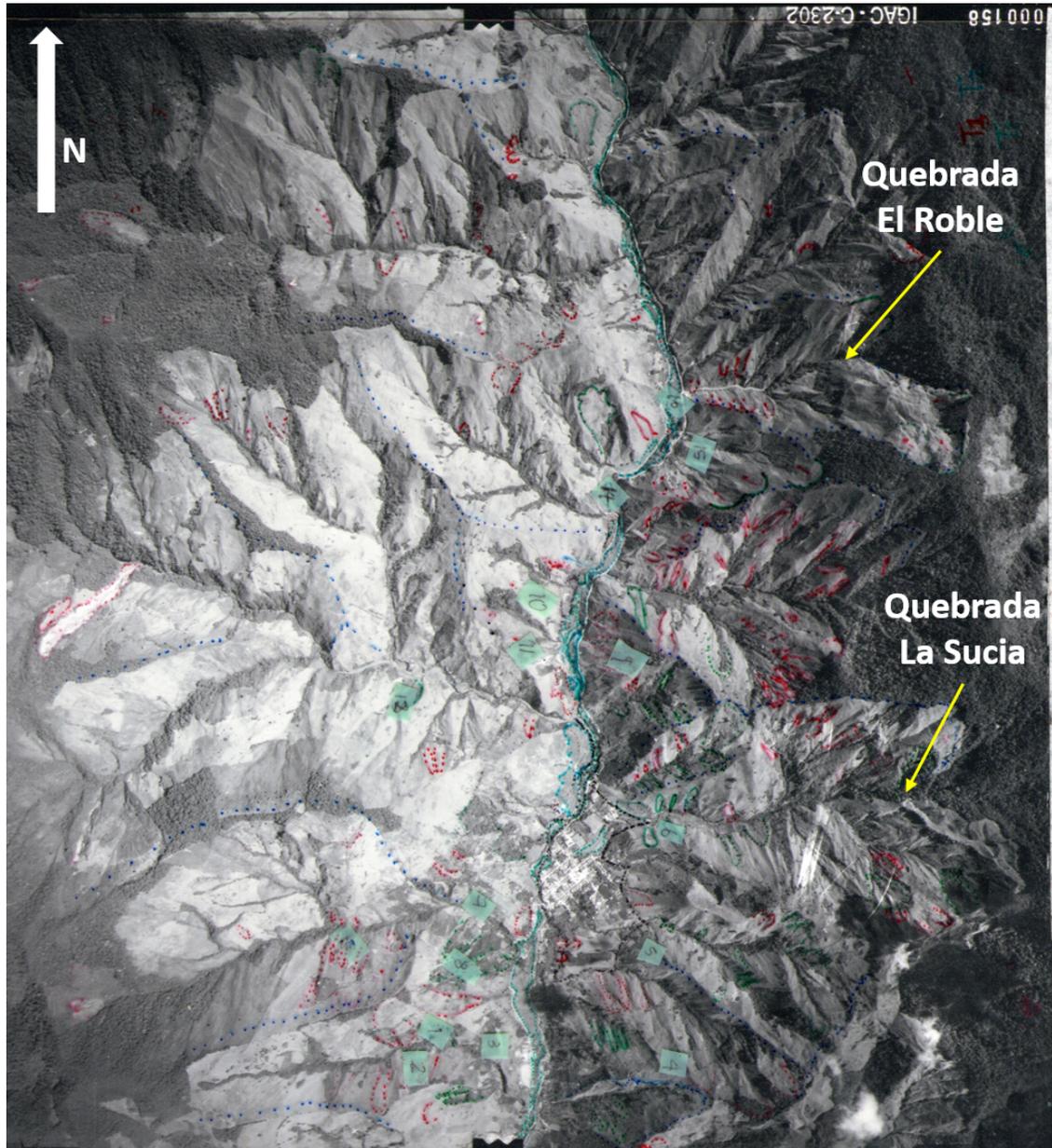


FIGURA 20. FOTOGRAFÍA AÉREA 158 DEL VUELO C-2302 DE 1987.

Año 2004

Para este año ya se observa la presencia de las presas de relaves No.1 – PR 1 (ubicada en la margen izquierda y derecha de la quebrada El Roble en su desembocadura sobre el río Atrato), la presa de relaves No.2 – PR 2, sobre la llanura de inundación del río Atrato en la curva interna de un meandro en su margen izquierda y la presa de relaves No.3 – PR 3 ubicada a media ladera sobre la margen izquierda del río Atrato, entre la presa 1 y 2.

La presa de relaves No.3, se ubica en una zona que para el año 1982 presentaba deslizamientos activos, para el año 1987 estaban inactivos y para el año 2004 se volvieron a activar.

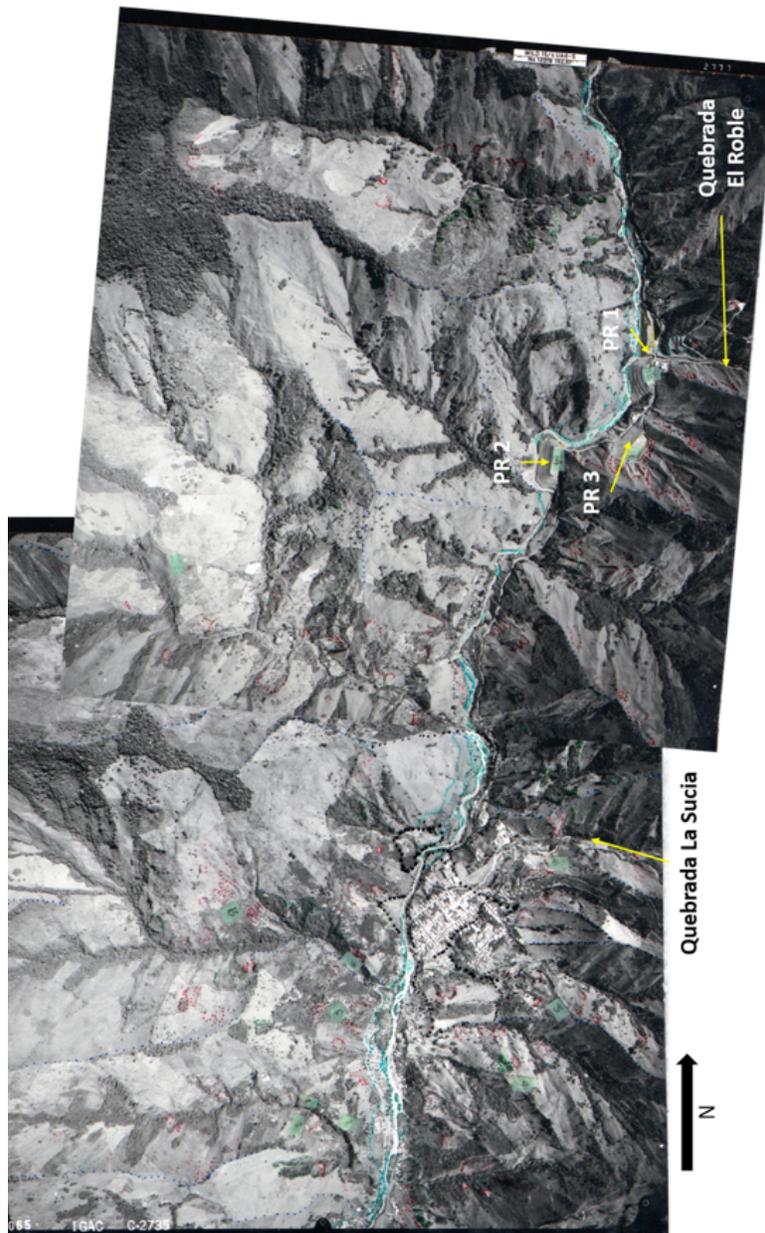


FIGURA 21. FOTOGRAFÍAS AÉREAS 63 Y 65 DEL VUELO C-2735 DE 2004

Año 2014

Para este año no se contó con fotografías aéreas, sin embargo, por medio de Google Earth fue posible tener buena resolución de imágenes satelitales en la zona del casco urbano de Carmen de Atrato y de la presa de relaves No.4 – PR 4, la cual fue construida sobre un depósito coluvial que está cubierto a su base por una antigua terraza aluvial de origen torrencial.



FIGURA 22. IMAGEN SATELITAL DE GOOGLE EARTH DEL 2014

Análisis

A partir del análisis, fue posible identificar 13 puntos en donde se observaron cambios en la cobertura vegetal y en la actividad de los deslizamientos y 3 puntos en donde hubo cambios en las geformas aluviales debido a la construcción de las presas de relaves. Todos los puntos se indican con cuadrados con fondo de color verde. Los cambios observados en cada uno de ellos se describen a continuación:

TABLA 2. DESCRIPCIÓN DE PUNTOS DONDE SE OBSERVARON CAMBIOS EN ACTIVIDAD DE DESLIZAMIENTOS, COBERTURA VEGETAL Y ACTIVIDAD MINERA

| No | CAMBIO OCURRIDO |
|----|---|
| 1 | Aumento en la vegetación sobre un deslizamiento inicialmente activo |
| 2 | Los deslizamientos observados en las fotografías de 1987 pierden definición para 2004 |

| No | CAMBIO OCURRIDO |
|----|--|
| 3 | Pérdida de la cobertura vegetal en un deslizamiento |
| 4 | Los deslizamientos presentan una tonalidad más clara. Hay un mayor desarrollo de vegetación en la cuenca |
| 5 | Pérdida de cobertura vegetal y desarrollo de deslizamientos |
| 6 | Hay un mayor desarrollo de los deslizamientos |
| 7 | Ensanchamiento de la cuenca, aumento de la cobertura vegetal y generación de deslizamientos |
| 8 | Para 1987 se diferencian deslizamientos cubiertos por vegetación, para 2004 ya no se pueden distinguir |
| 9 | Los deslizamientos observados para 1987 ya no se encuentran activos para 2004 |
| 10 | Aumento en el desarrollo de los deslizamientos, pérdida de cobertura vegetal |
| 11 | Aumento en el desarrollo de los deslizamientos, pérdida de cobertura vegetal |
| 12 | Se observa un mayor desarrollo del deslizamiento |
| 13 | Hay un mayor desarrollo de los deslizamientos |
| 14 | Desarrollo de presa de relave sobre llanura de inundación del río Atrato |
| 15 | Desarrollo de presa de relave sobre la ladera, se observa alta presencia de movimientos en masa |
| 16 | Desarrollo de presa de relave sobre una terraza |
| 17 | Desarrollo de presa de relave sobre una terraza |

Los cambios observados muestran en su mayoría un aumento en la actividad de deslizamientos por pérdida de la cobertura vegetal, ensanchamiento de algunas cuencas y la aparición de presas de relave sobre la llanura de inundación del río Atrato al norte del casco urbano de Carmen de Atrato, Chocó.

Hacia el occidente del casco urbano de Carmen de Atrato, el paisaje es más suavizado que al oriente por lo que se presentan menores movimientos en masa.

A partir del análisis multitemporal de fotografías aéreas e imagen satelital de Google Earth, se tiene que la cuenca del río Atrato así como la microcuenca de la Quebrada El Roble son altamente susceptibles a presentar movimientos en masa y avenidas torrenciales o avalanchas.

Como evidencia de lo anterior no solo se tienen las huellas de los movimientos en masa (antiguos y recientes), sino la presencia de terrazas aluviales de hasta 10 metros de altura como lo es la que estaba en la zona de construcción de la presa de relaves No.4.

El impacto geomorfológico generado por la actividad de la Mina El Roble es la disminución del área inundable del río Atrato, debido a la construcción de presas de relaves en dicha zona, por lo que los niveles de inundación en caso de crecidas serán más altos, que los presentados históricamente antes de la construcción de dichas presas.

De igual forma, la ubicación de las presas de relaves sobre la llanura de inundación del río Atrato, y en la desembocadura de la quebrada El Roble, hace que dichas presas puedan ser consideradas como una nueva fuente de amenaza. En caso de que se presenten nuevas avenidas torrenciales, las presas de relaves serán sometidas a fuerzas debidas al choque de fragmentos de roca de diversos tamaños (incluso de metros) y agua, que podrían ocasionar su colapso y por ende una emergencia aguas abajo de las mismas.

Finalmente, la presa de relaves No.3 fue construida en una zona de alta amenaza por movimientos en masa. Esto no fue desconocido por la entidad minera que en el informe

técnico de comisión llevada a cabo en abril del 2003¹⁹, indica que el inicio de la construcción de la presa de relaves se detuvo por el fuerte invierno y la presencia de derrumbes:

“Igualmente se realiza la construcción de una tercera presa de colas, la cual tiene la respectiva resolución de ampliación del Plan de manejo ambiental de la Mina por parte de CODECHOCO (# 0850 del 19 de junio de 2002), actualmente las labores de arranque en el terreno dispuesto para su construcción están suspendidas principalmente por el invierno y los derrumbes ocasionados.”

3.4. GEOTECNIA

3.4.1. Introducción

La mina El Roble, producto de su actividad extractiva, produce materiales de desecho, principalmente relaves, que se generan al momento de la producción del enriquecido metálico que se exporta. Los mismos corresponden a una mezcla acuosa compuesta principalmente por silicatos pero que pueden contener sulfatos y metales pesados; éstos son conducidos por medio de una tubería hasta su lugar de disposición final. Las presas de relave son el lugar donde se depositan dichos residuos.

Las presas de relave son estructuras, comúnmente construidas con suelo y enrocado, que hacen las veces de contenedor de los materiales residuales producto de la producción minera. Al igual que las presas comunes, las presas de relave contienen los materiales que se disponen dentro o al trasdós de éstas y como tal deben estar diseñadas con las más altas especificaciones, de forma que se brinde seguridad respecto al comportamiento frente a eventos sísmicos o fuertes lluvias.

Adicionalmente y teniendo claro que este tipo de estructuras, al disponerse en laderas empinadas y cerca de cursos de agua, deben contar con un sistema de monitoreo constante y un sistema de alerta temprana que dada la eventualidad de una falla, permita a las comunidades que podrían verse afectadas reaccionar de forma apropiada. Es decir, se deben tener planes de contingencia y rutas de evacuación demarcadas y delimitadas frente a la eventualidad de una falla de las presas de relave.

Las fallas en presas de relave, normalmente, no están asociadas a un evento crítico en particular; es más común que las fallas se deban a una serie de eventos complejos. Errores en los diseños, errores constructivos y errores humanos, son los más comunes; por lo cual, los planes de monitoreo, los sistemas de alarma y los planes de evacuación son los que permiten tener seguridad respecto al nivel de riesgo asociado a una eventual falla (Miedema, 2000²⁰; Fell et al.; 1998)²¹.

En países europeos, las presas inactivas tienen un mantenimiento recurrente y una supervisión constante de las condiciones de estabilidad. Sin embargo, en países con legislación ambiental deficiente, la mayoría de las presas de relave están en estado de abandono total. Según las estadísticas la mayoría de fallas se presentan en presas

¹⁹ Minercol. 2003. Informe técnico de comisión al municipio de Carmen de Atrato, Departamento Del Chocó. Página 48 del cuadernillo 7 del Expediente 9319.

²⁰ Fell, Foster, et al.; 1998; Analysis of embankment dam incidents

²¹ David Miedema; 2000; Selected case histories of dam failures and accidents caused by internal erosion.

activas (83% de los casos), 15% de los casos se presentan en preses inactivas y el 2% restante en presas abandonadas.

Para las presas activas, las causas más comunes están relacionadas con amenazas naturales (sismos y fuertes lluvias), seguido de problemas en el mantenimiento durante la operación y fallas estructurales. En Europa, el 90% de los incidentes han ocurrido en presas activas y el 10% en presas abandonadas (Benito, 2007)²².

Ahora bien, hay dos tipos básicos de estructuras usadas para la retención de relaves en presas, el primero es el relacionado con presas de altura final o presas de retención, el segundo tipo corresponde a las presas por etapas. Las presas de altura final se construyen con su altura máxima desde antes de la disposición de los relaves; debido a esto, su comportamiento es muy similar a las presas construidas para la retención de agua y por tal motivo, las consideraciones relacionadas con el manejo de agua subsuperficial y controles de estabilidad también son similares. Las presas por etapas son construidas a medida que se generan y disponen los materiales de relave; debido a que éstas son las más comunes, sus características serán mencionadas a continuación.

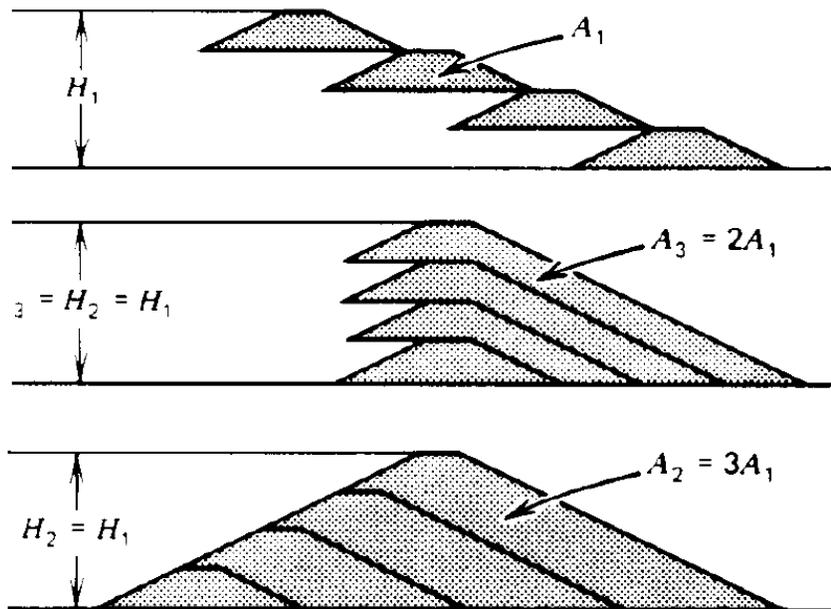


FIGURA 23: TIPOS DE PRESA DE RELAVE. A: SISTEMA DE CONSTRUCCIÓN AGUAS ARRIBA (AAR). B: SISTEMA DE CONSTRUCCIÓN CON LÍNEA CENTRAL (LC). C: SISTEMA DE CONSTRUCCIÓN AGUAS ABAJO (AAB)

Las presas por etapas pueden ser construidas hacia aguas arriba (AAR), hacia aguas abajo (AAb) o pueden construirse siguiendo una línea central (LC). En cada caso, la estructura es construida por etapas, incrementando su volumen y capacidad de almacenamiento a medida que avanzan las etapas. Es claro que los nombres que reciben están en función de la forma como la estructura aumenta su volumen, así pues: las presas AAr crecen hacia aguas arriba a medida que los relaves se secan y dejan cimentar, sobre

²² M. Rico, G. Benito. 2007. Reported tailing dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context.

éstos, una nueva estructura de presa. Las presas de línea central, mantiene una línea central fija y aumenta su volumen, predominantemente, hacia la parte baja de la ladera. Las presas AAb crecen en la dirección de la pendiente, aumentando su volumen a medida que aumentan la base de la estructura de retención (Vick, 1990)²³.

S.G. Vick recoge, respecto de los tipos de presa, las dos consideraciones siguientes:

- Las presas AAr y LC, mientras que permite un bajo costo en la construcción, también implica un riesgo frente a la estabilidad de la presa. Este riesgo requiere de unos límites de comportamiento definidos en los diseños y un monitoreo continuo y control durante la construcción, operación y cierre de la estructura.
- El tipo de presa aguas abajo AAb es un tipo de presa que otorga mayores especificaciones en cuanto a la estabilidad de la presa; no obstante, sus mayores costos.

Respecto a las fallas, el método que reporta mayor cantidad de incidentes de corresponde al método Aguas Arriba, representando el 76% de los casos en el mundo y el 47% de las fallas registradas en Europa. El método Aguas abajo (downstream) y el de Línea central representan el 15% y el 5% de los casos totales, respectivamente. Estas estadísticas dejan ver que en términos de susceptibilidad, las presas con sistemas constructivos de Aguas Arriba tienen una susceptibilidad mayor a presentar problemas de estabilidad frente a los otros métodos mencionados.

Teniendo en cuenta los factores detonantes asociados a la falla, como se mencionó anteriormente, es común que los casos de falla en presas no estén asociados a un incidente en particular, pero se han identificados factores detonantes o neurálgicos para que la falla ocurra. De estos factores, los meteorológicos y sísmicos corresponden a los más críticos y es producto de éstos que se han generado los mayores problemas de estabilidad en presas de relave. El segundo factor más influyente está asociado con el pobre mantenimiento y las actividades humadas inadecuadas sobre los sitios de presa.

²³ Vick, S.G.; 1990; Planning design and analysis of tailing dams

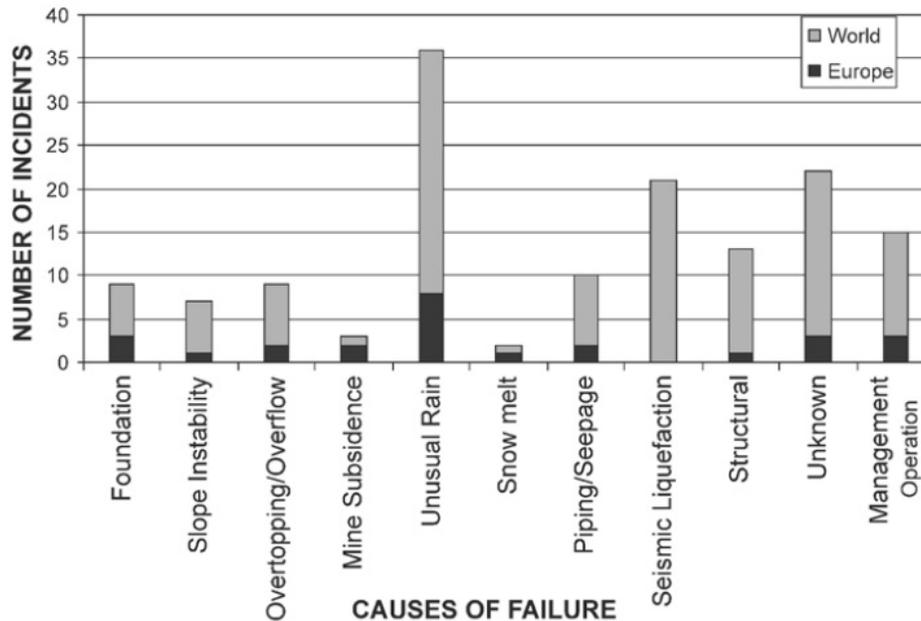


FIGURA 24: CASOS DE FALLA FRENTE A NÚMERO DE INCIDENTE -TOMADO DE (BENITO. 2007)

La tercera causa más frecuente corresponde a fallas en la cimentación de la presa, en la mayoría de los casos debido a la mala elección de la zona de cimentación. Otros casos están relacionados con mal manejo del agua dentro de la estructura de presa, problemas de tubificación y temas relacionados; otros casos de falla en presas de relave son debidos a sobrepaso del material represado y asentamientos debido a la actividad minera o a las cargas generadas por la estructura de presa.

3.4.2. Mina El Roble

La mina El Roble cuenta con cuatro presas de relave, tres de las cuales se encuentran cimentadas muy cerca al cauce del río Atrato. La presa No.3 la cual se encuentra a media ladera, aguas abajo de los socavones de la mina, no se encuentra influenciada de forma directa por el río Atrato. No obstante lo anterior, las cuatro presas en conjunto si pueden llegar a afectar el río Atrato, una falla de los taludes que conforman las estructuras de presa, podrían represar el cauce del río y ser el detonante de procesos de torrencialidad.

En el producto 3 del *Informe de campo de las actividades llevadas a cabo en la zona de minería de cobre de Carmen de Atrato*, numeral 4.3 (Geotecnia) se presentan las consideraciones particulares respecto del estado de éstas estructuras y se presentan los problemas asociados a estabilidad de los taludes y posibles afectaciones futuras. En este documento también se hace mención a la susceptibilidad de estructuras frente a posibles eventos torrenciales en la cuenca alta del río.

En el presente numeral se ampliará dicha información, específicamente el caso de la presa de relave No. 1 que presentó una falla en el año 2009, el caso de la presa No. 3 que ha evidenciado problemas de estabilidad superficial en sus taludes y movimientos en masa en las laderas de la parte alta y se analizará el caso de la tubería de conducción de los relaves hacia la presa No. 4 y el posible riesgo asociado a una falla en esta estructura.

Presa de relave No. 1

Desde la boca de mina, la presa de relave No.1 es la primera que se encuentra. Está compuesta por dos cuerpos gemelos que fueron construidos como presas de relave Aguas Arriba (AAR). Este proceso constructivo implica la construcción de sucesivos niveles a medida que la capacidad de la presa es superada por los relaves dispuestos en ella. El cuerpo Norte fue el primero en consolidarse, posteriormente se puso en operación el cuerpo Sur.

La presa se encuentra en la margen izquierda del cauce del río Atrato, la misma fue construida sobre una terraza del río a unos pocos metros del cauce original. La presencia de la presa resta espacio a las zonas inundables del río; lo anterior se traduce que el río tiene una influencia directa sobre la base de la presa. En la siguiente figuran se pueden ver los aspectos ya mencionados. Adicionalmente se puede observar que la base de la presa presenta procesos erosivos producto de la socavación natural del río Atrato; como se puede ver, la forma sinuosa del río intenta reconfigurarse y en ésta dinámica, la presa de relave se encuentra obstruyéndolo lo cual hace de la base de la presa susceptible a éstos procesos erosivos.

FIGURA 25: LOCALIZACIÓN DE LA PRESA DE RELAVE NO.1-VUELO C-2302 Y C-2735

En el 2009 se presentó un evento en la presa de relave No. 1. El cuerpo Sur falló ocasionando que parte de los taludes que la formaban cedieran y el material se depositara sobre el río Atrato.



FIGURA 26: FOTOGRAFÍAS ASOCIADAS A LOS PROCESOS DE INESTABILIDAD QUE AFECTARON LA PRESA DE RELAVE EN EL AÑO 2009 Y CONSECUENTE REPARACIÓN (FOTOGRAFÍAS DEL 2009 Y 2010 RESPECTIVAMENTE)²⁴

El represamiento del río ocasionó la formación de pequeñas lagunas aguas arriba de la zona de falla. Los valles estrechos y laderas muy empinadas, hacen que la formación de éste tipo de presas producto de deslizamientos se formen. En la anterior figura se puede observar los taludes fallados y las reparaciones posteriores.

Teniendo en cuenta la reconfiguración de los taludes, las mismas fotografías dejan ver rasgos de procesos superficiales sobre los taludes de la presa: procesos erosivos sobre los taludes, pequeñas fallas locales y pérdida de vegetación son una clara evidencia de problemas en el control y manejo del agua de escorrentía; adicionalmente, no se observan las obras de protección necesarias en la pata de los taludes.

Presa de relave No. 3

Siguiendo hacia el sur (aguas abajo) de la mina El Roble, a media ladera, se encuentra la presa de relave No. 3. A diferencia de la Presa No.1, ésta se construyó a media ladera y no está cimentada sobre el cauce del río Atrato.

En los análisis de las fotografías aéreas, se pudo observar que para la construcción de la presa se requirió de una excavación sobre la ladera. Los cortes se realizaron sobre antiguos flujos y movimientos en masa de menor tamaño. En la siguiente fotografía se pueden ver los aspectos antes mencionados. Las fotografías aéreas permiten observar

²⁴ G. Smith y D. Pohl. 2012. Technical report on the El Roble Project, Chocó Department, Colombia.

adicionalmente la presencia de zonas de drenaje que debieron ser tratadas previo a la construcción de la presa.

FIGURA 27: LOCALIZACIÓN DE LA PRESA DE RELAVE NO.3-VUELO C-2302 Y C-2735

En la actualidad se observan movimientos en masa que afectan la parte alta de la ladera. Dichos procesos han afectado de forma reiterada la parte alta de la presa. El manejo de éstos procesos es de vital importancia ya que de no ser controlados podrían desestabilizar los taludes de la presa.

FIGURA 28: VISTA DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA EN LA PARTE ALTA DE LA LADERA QUE AFECTAN LA PRESA DE RELAVE NO. 3²⁵

Presa de Relave No. 4

²⁵ G. Smith y D. Pohl. 2012. Technical report on the El Roble Project, Chocó Department, Colombia.

La Presa No. 4 es la más grande que se encuentra en funcionamiento y en proceso continuo de construcción. La misma consta de dos cuerpos de depositación de residuos; el cuerpo Norte ya está en fase de realce y el cuerpo Sur se encuentra en las fases iniciales de llenado.

La presa se construyó sobre un antiguo depósito coluvial que en la parte más baja cubre las terrazas aluviales formadas por el río Atrato. En la parte alta se alcanzan a ver dos lóbulos centrales, dos abultamientos del terreno que definen una zona de acumulación que se generó justo arriba de la zona de presa. En el capítulo de geología hay una estación específica que escribe a la unidad de depósitos coluviales encontrados.

En las márgenes, parte alta de las presas, se observa un aumento de vegetación. Principalmente en la zona norte se genera una depresión donde acumula el agua. El agua superficial que se genera es captada por unas cunetas de coronación descritas en el capítulo de hidráulica. Sin embargo, no hay presencia de drenes horizontales para la captación y control del agua subsuperficial, aunque el flujo de agua bajo el depósito coluvial podría generar problemas graves de estabilidad en la parte alta de la ladera y sobre todo cuando se han generado cortes sobre los depósitos coluviales. Ver la siguiente figura.



FIGURA 29. VISTA GENERAL DE LA PRESA NO. 4

La zona donde se encuentra la presa, en la parte norte, es la confluencia de una quebrada y del río Atrato. De forma similar a lo que sucede con la quebrada el Roble, en la cuenca alta de esta quebrada hay muchos movimientos en masa que alimentan al río Atrato con sedimentos.

El sitio de presa corresponde a un cambio abrupto de dirección del río. El Atrato se encuentra recostado sobre su margen izquierda. Es decir, que tras tener un alineamiento casi recto, al llegar a la zona de presa se genera un cambio de dirección de casi 90°. Lo anterior hace que el límite norte de la presa sea muy susceptible a procesos de erosión por el río así como a erosión intensa por avalanchas de lodos y de detritos.

Actualmente se han observado tres procesos predominantes que pueden llevar a ser los detonantes de procesos masivos que comprometan la estabilidad de los taludes de la presa de relave. El primero de ellos, y el más crítico, es el relacionado con el flujo que se encuentra sobre el segundo nivel de terrazas en la zona intermedia entre el cuerpo Norte y el Sur. Hay una zona de aproximadamente 50 metros donde la capa vegetal del talud de arranque se perdió por completo. La siguiente figura muestra la zona media del cuerpo de presa Norte y Sur y como un flujo aflora a media ladera, que se distingue por ser de un color mucho más claro que los materiales que conforman en resto de taludes.



FIGURA 30 PRESA No.4- MOVIMIENTOS EN MASA SUPERFICIALES (REPTACIÓN Y DESLIZAMIENTOS SOMEROS) Y EROSIVOS SOBRE LA CARA DE LOS TALUDES Y FLUJO INTERNO QUE SE DEPOSITA EN LA PARTE BAJA.

El flujo que aflora en la sección media de los taludes es una clara evidencia de flujo interno. El haber desplazado material interno de la presa muestra un claro proceso de erosión interna que debería ser evaluado y controlado. Al consultar a los funcionarios de MINER en la visita de campo, dijeron que estaba trabajando para el control de éstos flujos internos, no obstante no se observan obras estructurales que permitan inferir que están realizado procesos de identificación del flujo, cuál es su origen y si este es producto de infiltraciones del cuerpo de la presa o debido a escorrentía que se infiltra. Ver las siguientes fotografías.



FIGURA 31 PRESA NO. 4- DETALLES DEL FLUJO INTERNO QUE AFLORA SOBRE LOS TALUDES. VISTA DESDE LA PARTE BAJA Y DESDE LA PARTE ALTA RESPECTIVAMENTE

Estructura para la conducción de relaves hacia la Presa No. 4

Los relaves generados como subproducto de la producción minera se conducen hacia las presas de relave como una solución acuosa. La Presa de relave No.4, al encontrarse en la margen derecha del Atrato, en el costado opuesto a la mina, requiere de una estructura que permita el paso de los relaves sobre el río. En la actualidad se encuentra una estructura que cumple dicha función. Frente de la presa No. 4 se encuentra una estructura metálica que hace las veces de puente y soporte para la tubería de transporte. La cimentación de ésta está localizado en zonas de inundables y de posible afectación directa del río Atrato. Esta zona tiene una amenaza alta frente a avalanchas de lodos y de detritos y la estructura, no solo se encuentra en esta zona, sino que no cuenta con estructura alguna de protección frente a éstas. La anterior fotografía muestra la estructura para el paso de la margen izquierda a la derecha del río Atrato.



FIGURA 32. ZONA DE CRUCE DE LA TUBERÍA QUE LLEVA EL MATERIAL A LA PRESA DE RELAVE NO. 4

3.4.3. Consideraciones generales respecto a factores detonantes de inestabilidad en laderas naturales y en obras de ingeniería

Sismos

Los sismos como fuerzas dinámicas que afectan laderas naturales y obras civiles son considerados uno de los principales detonantes de fallas en laderas y en estructuras. El estudio de éstos es de gran importancia para asegurar el correcto funcionamiento de obras civiles. Debido a la cercanía de Carmen de Atrato con la zona de subducción del Pacífico, la actividad sísmica que se presenta en la zona es intensa.

FIGURA 33: SISMOS REGISTRADOS CERCA DE CARMEN DE ATRATO- DATOS TOMADOS PARA UN RADIO DE 50 KM CON CENTRO EN EL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO (DATOS TOMADOS DEL SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO)

En la anterior figura se puede observar con cierta recurrencia se generan eventos sísmicos con magnitudes superiores a 4,0, los cuales, como se comentará más adelante pueden ser detonantes de procesos de inestabilidad.

Adicionalmente, los estudios de amenaza por movimientos en masa cuyo detonante son sismos, han mostrado que para el Carmen de Atrato se presentan los mayores niveles de amenaza. La zonificación de amenaza relativa por movimientos de remoción en masa cuyo detonante es los sismos, plancha 165 El Carmen a escala 1:100.000, cruza la susceptibilidad del terreno frente a movimientos en masa y los niveles de amenaza sísmica para la zona de estudio. La planta deja ver la importancia de estudios de detalle frente a estos eventos y la eventualidad de que producto de deslizamientos se puedan generar procesos más complejos como las avalanchas.

En el estudio de 40 eventos sísmicos, Keefer logró establecer una relación entre la magnitud del evento sísmico y su relación como factor detonante de procesos de inestabilidad en laderas. El área afectada por movimientos en masa está directamente relacionada con la magnitud del evento. La siguiente figura, presentada en el documento ya mencionado, muestra que no se registraron deslizamientos para sismos con magnitudes menores a 4,5 y que la relación de área como una función de la magnitud aumenta de forma aproximadamente lineal.

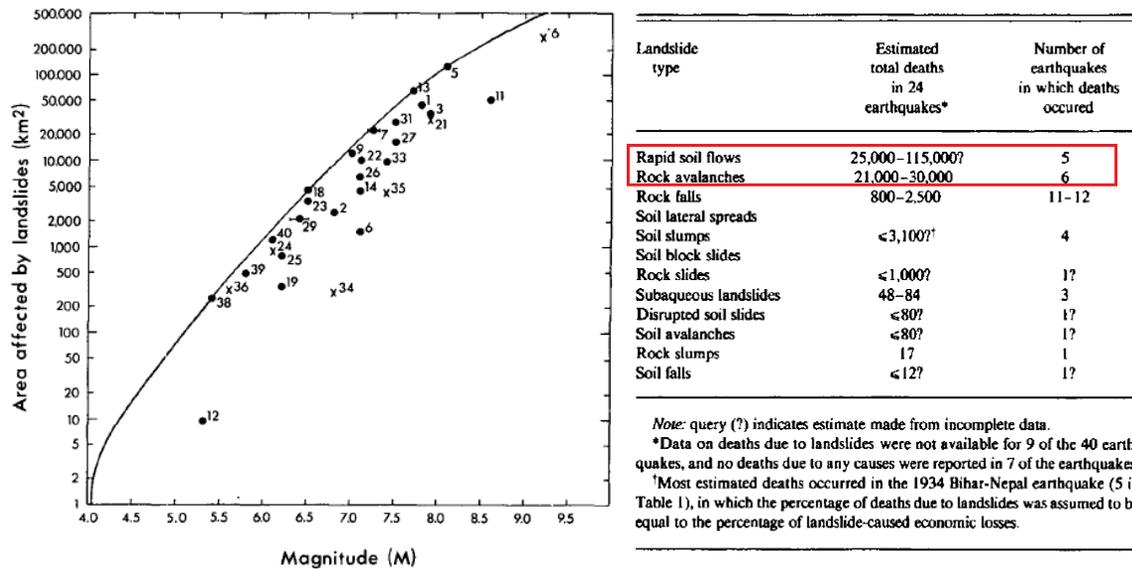


FIGURA 34: ÁREA AFECTADA POR MOVIMIENTOS EN MASA EN FUNCIÓN DE LA MAGNITUD DEL EVENTO SÍSMICO Y NÚMERO DE MUERTES ASOCIADAS AL TIPO DE PROCESO DE REMOCIÓN EN MASA (KEEFER; 1984)²⁶

Ahora bien, en eventos sísmicos, procesos como caídas de rocas, deslizamientos de roca, caídas de suelo y deslizamientos en suelos movilizados pueden ser generados por eventos de menores magnitudes. En particular, eventos relacionados con laderas muy empinadas están muy sujetos a ser detonados por eventos sísmicos de corta duración y frecuencias altas, comportamiento común en sismos de magnitudes menores. Adicionalmente, este estudio identificó que los materiales más susceptibles a la formación de avalanchas o flujos de detritos están relacionados con sismos de menores magnitudes que afectan materiales poco cementados, meteorizados o macizos rocosos muy fracturados.

En 1989 el evento sísmico que se produjo en Loma Prieta, California, tuvo una magnitud de 6,9 y generó deslizamientos alrededor de un área de 15.000 km². No obstante la concentración de los procesos identificados no era espacialmente homogénea; la mayor parte de éstos se concentraron en un área de 2.000 km² en las zonas montañosas cercanas al epicentro. El análisis realizado por Keefer (2000) mostró que la energía sísmica liberada que generaron los deslizamientos está muy concentrada cerca del epicentro, no obstante su distribución espacial se alinea con las estructuras de falla identificadas y no con densidades que disminuyen en función directa de la distancia del epicentro.

²⁶ Keefer; 1984; Landslides caused by earthquakes

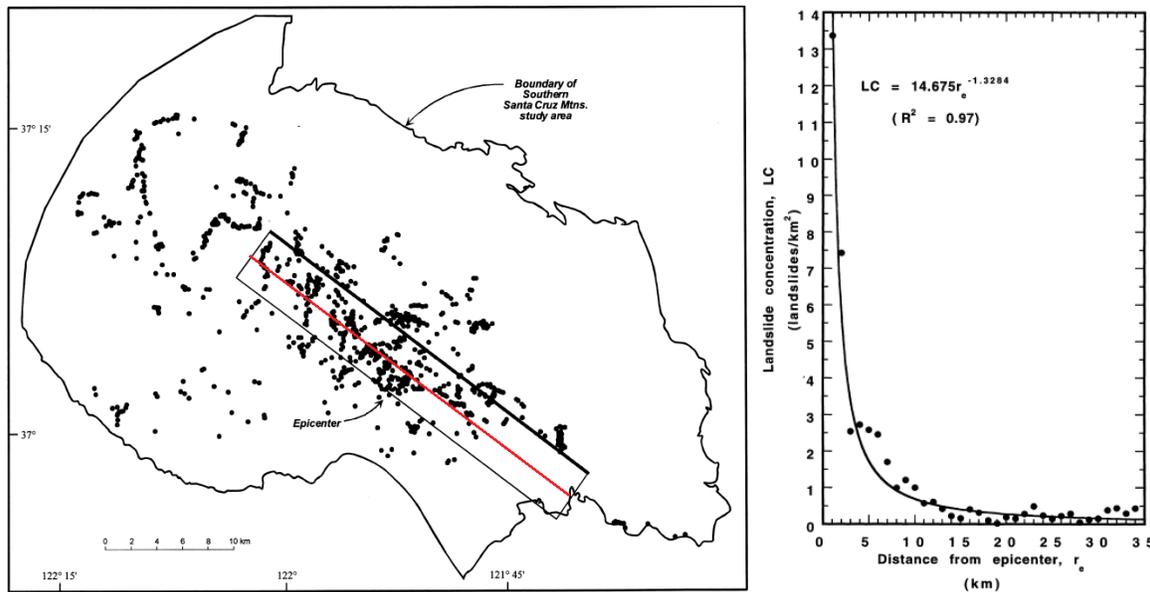


FIGURA 35: DISTRIBUCIÓN DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA EVENTO DE LOMA PRIETA, CALIFORNIA, 1989 Y RELACIÓN ENTRE LA DISTANCIA AL EPICENTRO Y CONCENTRACIÓN DE DESLIZAMIENTOS (KEEFER, 2000)²⁷

En la anterior figura se puede observar como los deslizamientos la densidad de eventos (referente a movimientos en masa) se alinean con la zona de ruptura (línea roja) y no necesariamente siguen un patrón radial alrededor del epicentro. En cuanto a niveles de concentración de eventos, a más de 10 km de distancia la concentración de deslizamientos ha bajado del 1,35 a 1,0, lo cual deja ver la forma como se disipa la energía liberada en el evento sísmico (Keefer, 2000).

Lluvias críticas

La lluvia como factor detonante está relacionada en mayor medida con tres eventos. El primero de ellos corresponde a las inundaciones, asociadas a precipitaciones muy fuertes que se presentan en periodos muy cortos de tiempo y que elevan el nivel de la lámina de agua hasta zonas donde se encuentran personas o bienes de interés. El segundo tipo de evento está relacionado con movimientos en masa. En el capítulo de geomorfología se realiza el inventario de movimientos en masa. El tercer evento, el cual unifica el primer evento y el segundo, son las avenidas torrenciales. En el capítulo de geomorfología se realiza la identificación de depósitos como terrazas y abanicos aluviales asociados a estos.

En Carmen de Atrato y en toda la cuenca alta del río Atrato hay evidencia de torrencialidad de los cuerpos de agua. A la fecha se han logrado identificar tres eventos críticos que ocasionaron pérdidas materiales y humanas. En la siguiente tabla se presentan los tres eventos relacionados y las fuentes. Es claro que hay mayores evidencias de este tipo de procesos y de cómo éstos podrían afectar las obras relacionadas con la Mina El Roble y las poblaciones aguas abajo de ésta.

²⁷ Keefer; 2000; Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distributionm- the 1989 Loma Prieta, California event

TABLA 3: EVENTOS DE AVENIDAS TORRENCIALES EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO ATRATO

| Evento | Tipo de Evento | Zonas afectadas | Fuente |
|---------------------|--------------------|-------------------|---|
| 23 de enero de 1996 | Avenida torrencial | El Quince | http://eltiempo.com/archivo/documento/MAM-374442 |
| 10 de mayo de 2008 | Avenida torrencial | El Siete | http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-4158475 |
| 22 de julio de 2014 | Avenida torrencial | Quebrada El Roble | https://www.youtube.com/watch?v=uDkwr84D3Lg |

[Consideraciones frente a la falla y problemas asociados a la torrencialidad de la cuenca alta del río Atrato](#)

Falla de presas de relave

La práctica común en presas de relave consiste en ubicarlas en zonas escarpadas o en valles que permiten asegurar un confinamiento de los materiales. Esto se traduce en que éstas se localizan muy cerca a cuerpos de agua en movimiento y, en particular, cerca de cauces cuyo régimen es torrencial. Por tal motivo, las presas de relave están sujetas a un riesgo constante de falla y, como consecuencia, las mismas podrían represar los cuerpos de agua sobre los cuales se encuentran.

Al fallar las presas de relave y represar el cauce, el material deslizado se comportaría como una represa natural (landslide dam). Los estudios realizados sobre estas presas han sido amplios, pero debido a su complejidad, la evaluación de los rompimientos de estas presas naturales se centra en la determinación de ecuaciones empíricas para la cuantificación del caudal pico asociado. John E. Costa ha sido un referente en el análisis del comportamiento de presas naturales y construidas por humanos. La siguiente figura, tomada de Costa²⁸, presenta la relación de la altura de la presa que falló y el caudal pico relacionado, la figura agrupa 31 casos en donde se pudo medir con certeza dicha relación. En particular, para el caso de presas asociadas a deslizamientos (landslide dams), la relación corresponde a $Q_{max} = 6,3 * H^{1,59}$.

²⁸ J.E. Costa; 1985; Flood from dam failure

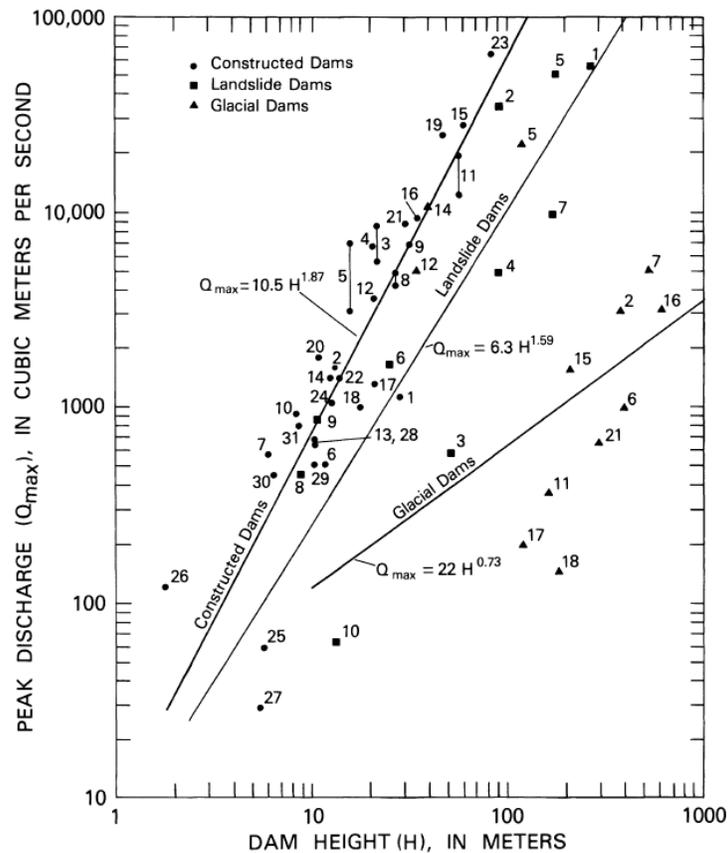


FIGURA 36. CAUDAL PICO EN FUNCIÓN DE LA ALTURA DE LA PRESA (COSTA, 1985)

La anterior figura muestra que, para represamientos del orden de unos cuantos metros, el caudal pico asociado al rompimiento de la presa está del orden de centenares de metros cúbicos.

Ahora bien, el caudal pico estimado tras la falla de una presa de tierra que obstruye el cauce del río disminuye a medida que éste avanza aguas abajo de la cuenca. Durante las últimas décadas se han estudiado las curvas de atenuación del caudal y de la influencia de éste en las zonas inundadas aguas abajo de la zona de falla (todo con el objetivo de minimiza la pérdida de vidas y la afectación u otras posibles estructuras). Los estudios han arrojado que las posibles zonas afectadas se relacionan directamente con el caudal pico liberado y con la distancia a la zona de falla. Las tasas de atenuación como un porcentaje del caudal pico y de la distancia aguas abajo se presentan en la siguiente figura.

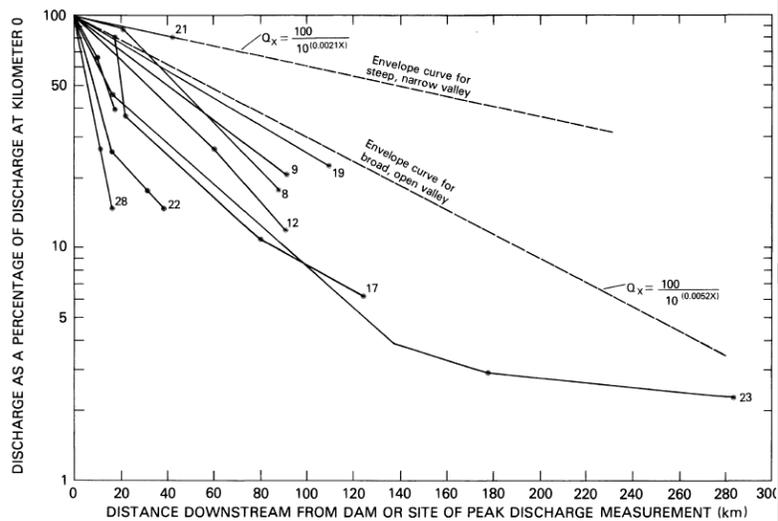


FIGURA 37: RELACIÓN ENTRE LA DISTANCIA AGUAS ABAJO DE LA PRESA Y EL PORCENTAJE DEL CAUDAL PICO ATENUADO (COSTA, 1985)

Es claro que las tasas de atenuación son mayores para valles amplios en donde las zonas inundables son mayores. Para el caso de cuencas en “V” o ríos encañonados, como los presentes en la zona de estudio, las tasas de atenuación de caudal son más lentas y por lo tanto el caudal liberado se desplaza una mayor distancia.

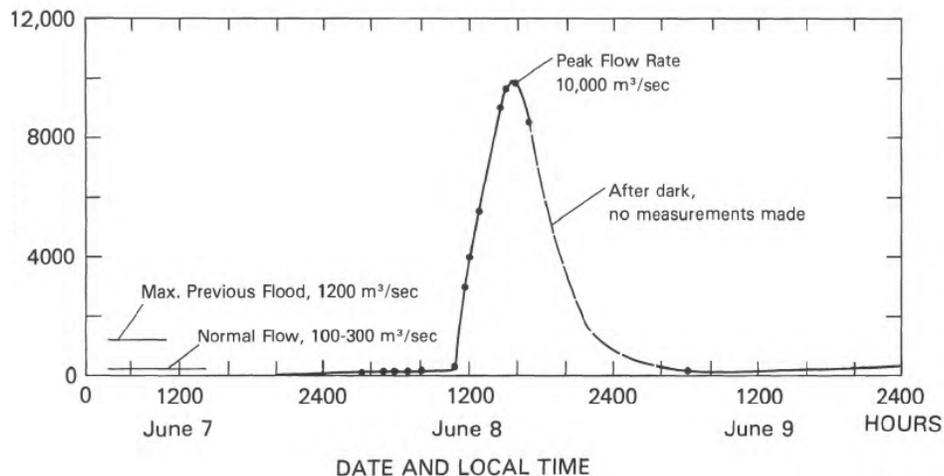


FIGURA 38: HIDROGRAFA DEL CAUDAL RESULTANTE DE LA FALLA DE LA PRESA NATURAL DE MAYUNMARCA, PERÚ 1974 (LEE Y DUNCAN, 1975)

Un caso particular de estudio en donde se midió el caudal pico en función de la hora fue estudiado en el Perú. La presa natural de Mayunmarca que rompió en 1974 se formó producto de un deslizamiento. El caudal medio del río variaba de 100 a 300 m³/seg, en temporadas de lluvia muy intensa el caudal alcanzaba picos del orden de 1200 m³/seg; tras el rompimiento de la presa natural se alcanzó un caudal pico de 10000 m³/seg. La hidrógrafa medida se presenta en la anterior figura. Tras el represamiento de ríos en cuencas susceptibles a estos procesos, los caudales liberados suelen ser mucho mayores

a los que en temporadas de lluvia se generan; en este caso en particular el caudal medido es casi 10 veces mayor al caudal pico registrado.

Estas condiciones dejan ver que poblaciones como El Siete son potencialmente vulnerables frente a estos procesos. En la actualidad se desconoce de la existencia de planes de contingencia, redes de alarma y monitoreo que permitan prever con tiempo este tipo de eventos.

3.5. **HIDROLOGÍA**

3.5.1. *Introducción*

Dada la naturaleza de los proyectos de minería subterránea de polimetálicos (oro, cobre, etc), para su explotación se requiere de la remoción de grandes volúmenes rocosos, lo cual puede alterar las configuraciones naturales de elementos geológicos y condiciones naturales de flujo, por ende generar alteraciones en las interacciones naturales en los hidrosistemas presentes²⁹ en zonas aledañas a estos proyectos.

Para este caso el probable impacto producto de la intervención minera se podría ver traducido en el cambio de la velocidad de flujo de estas aguas, dado que con la descompresión de los materiales geológicos la velocidad de flujo aumenta de manera sustancial, considerando la disminución en tiempos de residencia del agua puesto que antes fluían naturalmente a través de materiales porosos o fracturados.

El caso de estudio corresponde a la cuenca del río El Carmen (afluente del río Atrato) ubicada en jurisdicción del municipio del Carmen de Atrato (Chocó) y Bolívar, (Antioquia). En esta cuenca existe el título minero de la mina subterránea El Roble AIT-3931 (mina de polimetálicos) que actualmente se encuentra en operación.

Para poder visualizar si eventualmente existe un impacto asociado a la actividad minera, se empleó el parámetro el caudal de flujo base³⁰, que suele ser un buen índice para determinar el funcionamiento del hidrosistema (superficial y subterráneo) dado que este contempla las interacciones entre el agua superficial y el agua subterránea.

Considerando la limitación en los ensayos (pruebas con trazadores e isotopos ambientales) y poca instrumentación para la zona de estudio, se aplicaron filtros digitales a series de caudales a nivel diario de las estaciones de la red de monitoreo del IDEAM para la obtención de series de flujo base. Posteriormente se aplicaron pruebas estadísticas a las series de flujo base para determinar si existen cambios significativos en la media y de esta manera determinar si existen impactos asociados a la actividad minera subterránea.

²⁹ Entiendase como hidrosistema, espacio definido en el cual se dan múltiples interacciones físicas y químicas enfocadas al flujo del agua en sus distintas fases.

³⁰ Caudal que circula por un río debido a causas más remotas que la escorrentía de un evento de precipitación, generalmente están asociados a flujos subterráneos

3.5.2. Marco conceptual

Definición de flujo base

Acorde con el Instituto Geológico y Minero de España, 2008³¹, la escorrentía puede definirse de una manera simplificada como la suma de dos componentes, escorrentía directa y la escorrentía subsuperficial y base, correspondiente a la fracción de agua que una vez infiltrada, recarga y circula a través del suelo y los acuíferos descargando posteriormente su almacenamiento en los ríos, lagos o en el mar. Este segundo tipo de aportes, de respuesta más lenta y continuada corresponde a una parte del flujo base o caudal base y su importancia es crucial desde el punto de vista cuantitativo y cualitativo de los recursos del sistema hidrológico.

Sumado a lo anterior, el flujo base también se constituye de parte de las aguas subterráneas que alimentan a los ríos en temporadas de precipitaciones bajas o nulas, cuando los niveles freáticos son más altos que los niveles del río. Estos ríos alimentados por aguas subterráneas se denominan ganadores y pueden abastecer comunidades con agua de buena calidad, debido a que por su naturaleza se encuentran libres de turbiedad y patógenos, lo que la hace, en general, apta para el consumo humano³².

Aproximaciones para separación de flujo base

Para la separación de flujo base y de flujo de escorrentía existen múltiples aproximaciones que a continuación se describen brevemente:

- **Aproximaciones hidrogeoquímicas (trazadores e isotopos):** Consisten en la aplicación o muestreo (dependiendo el caso) de isotopos estables y trazadores ambientales conservativos a las corrientes que mediante modelos de mezcla o diagramas de componentes extremos con balances de masas permiten conocer el volumen de agua correspondiente a flujo base y flujo superficial. Para el caso general se obtienen buenos resultados mediante la combinación de distintos trazadores.
- **Aproximaciones gráficas:** Estos métodos se basan en la interpretación gráfica de hidrogramas, son simples y de fácil uso, sin embargo presentan problemas a la hora de su implementación para casos particulares, (por ejemplo cuando se presentan superposición de eventos y el hidrograma se hace complejo) adicionalmente están sujetos a una alta incertidumbre considerando que no cuentan con una base física. Para este tipo de aproximación las metodologías más conocidas son: método de descarga constante, método de relación empírica, método de pendiente constante, método de concavidad, método de Frohlich, método de Boussinesq, entre otros.

³¹ Instituto geológico y minero de España. (2008). Guía metodología para la determinación de los caudales ambientales. Capítulo de aguas subterráneas- Tomo I: Métodos de estimación de las aportaciones subterráneas a los caudales ambientales.

³² Gómez, S., & Gómez, L. (2016). Baseflow analysis using master recession curves and numerical algorithms in mountain basins: Surata's river and Orós river (Santander, Colombia). DYNA (196), 213-221.

- **Aproximaciones físicas:** Esta aproximación es la más robusta teniendo en cuenta que tiene un fundamento físico (balance de masa), sin embargo dada la complejidad del problema han sido poco los autores que han abordado este tipo de aproximación. Las metodologías que se destacan son las de Furey & Gupta, 2001³³ y Birtles, 1978³⁴
- **Aproximaciones con base en filtros digitales (algoritmos):** Este tipo de aproximación aplica para largos periodos de tiempo (series temporales de caudal) y forman técnicas de separación. Las falencias de estas metodologías radican en que necesitan una calibración para su implementación e interpretación y que algunas de ellas algunas carecen de representación hidrológica.

Las metodologías más destacadas son las de Chapman & Maxwell, 1996³⁵, Boughton, 1993³⁶, Jakeman & Hornberger³⁷, Lyne & Hollick, 1979³⁸, Tularam & Ilahee³⁹, entre otros.

3.5.3. Metodología y resultados

Tal como se comentó en secciones previas, la zona de estudio se encuentra localizada en la cuenca del río el Carmen, parte alta de la cuenca del río Atrato. Para evaluar el impacto de la minería subterránea sobre el aporte de agua subterránea a los ríos (flujo base) de la zona, como aproximación inicial se busca separar el flujo base con base en mediciones diarias de caudales.

Considerando que en la parte alta del río El Carmen (zona de influencia minera) no se cuenta con instrumentación de tipo limnimétrica (medición de caudal líquido y caudal sólido), para los análisis de flujo base se utilizaron las series de caudales de la red de monitoreo ambiental del IDEAM. Las estaciones presentes en el área de estudio corresponden a la estaciones limnimétricas de Pte. La Sánchez (cod: 11027010) y El Siete (código: 11027030).

³³ Furey, P., & Gupta, V. (2001). A physically based filter for separating base flow from streamflow time series. *water resources research*, 2709-2722.

³⁴ Birtles, A. (1978). Identification and separation of major base flow components from a stream hydrograph. *water resources research*, 791-803.

³⁵ Chapman, T., & Maxwell, A. (1996). Baseflow separation- comparison of numerical methods with tracer experiments. Institute of engineers Australia National Conference.

³⁶ Boughton, W. (1993). A hydrograph-based model for estimating water yield of ungauged catchments. Institute of Engineers Australia National Conference.

³⁷ Jakeman, A., & Hornberger, G. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model. *water resources research* (29), 2637-2649.

³⁸ Lyne, V., & Hollick, M. (1979). Stochastic time-variable rainfall-runoff modeling. Institute of Engineers Australia Nationals .

³⁹ Tularam, G., & Ilahee, M. Exponential smoothing method of base flow separation and its impact on continuous loss estimates. *American Journal of Environmental Sciences* (136), 136-148.

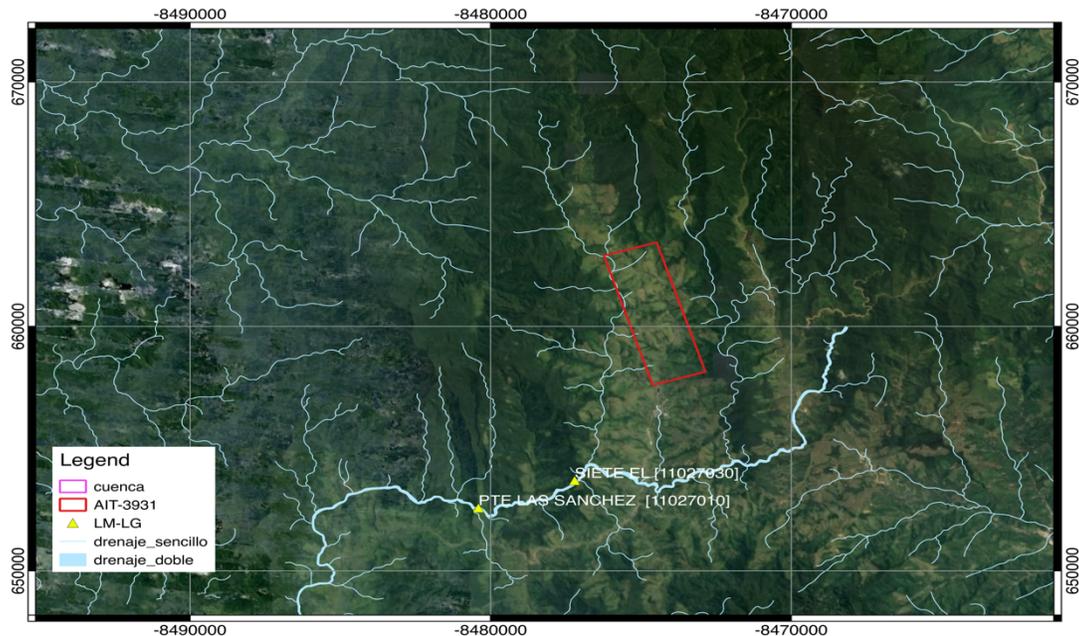


FIGURA 39. ESTACIONES LIMNIMÉTRICAS DE LA RED DE MONITOREO DEL IDEAM PRESENTES EN LA ZONA DE ESTUDIO. ELABORACIÓN PROPIA.

Puntualmente, para los análisis se tomó como base las series de caudales de la estación Pte La Sánchez dado que cuenta con un periodo de registro aceptable, comprendido entre 1976-2001 (26 años)⁴⁰ el cual permite evaluar de manera objetiva el comportamiento del flujo base y estimar su cambio respecto al tiempo.

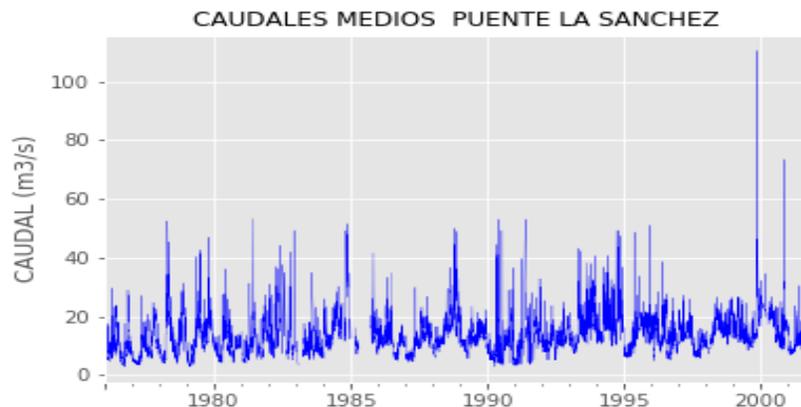


FIGURA 40. SERIE DE CAUDALES MEDIOS, ESTACIÓN PTE. LA SANCHEZ. ELABORACIÓN PROPIA.

Para la separación de flujo base se utilizó el software BFI+3,⁴¹ desarrollado por HydroOffice⁴², este cuenta con varias metodologías de tipo físico, gráficos y filtros digitales, siendo este último el componente más fuerte. A continuación se describen brevemente los filtros digitales disponibles para este software:

⁴⁰ Esta serie cuenta con un porcentaje de datos faltantes del 3.85%, media de 13,29 m³/s y desviación estándar de 6,75 m³/s.

⁴¹ Disponible para descarga en: <https://hydrooffice.org/Downloads>

⁴² Para más detalles ver: <https://hydrooffice.org>

TABLA 4. FILTROS DIGITALES DISPONIBLES PARA EL SOFTWARE BFI+3.0. FUENTE: (HYDROOFFICE)⁴³

Tab. 1: Recursive digital filters used in BFI+ 3.0 program.

| Filter name | Filter Equation | Comments |
|--|--|--|
| One-parameter algorithm (Chapman & Maxwell, 1996) | $q_{b(i)} = \frac{k}{2-k} q_{b(i-1)} + \frac{1-k}{2-k} q_{(i)}$ | $q_{b(i)} \leq q_{(i)}$ Applied as a single pass through the data. |
| Boughton two-parameter algorithm (Boughton, 1993; Chapman & Maxwell, 1996) | $q_{b(i)} = \frac{k}{1+C} q_{b(i-1)} + \frac{C}{1+C} q_{(i)}$ | $q_{b(i)} \leq q_{(i)}$ Applied as a single pass through the data. Allows calibration against other baseflow information such as tracers, by adjusting parameter C. |
| IHACRES three parameter algorithm (Jakeman & Hornbarger, 1993) | $q_{b(i)} = \frac{k}{1+C} q_{b(i-1)} + \frac{C}{1+C} (q_{(i)} + \alpha_q q_{(i-1)})$ | Extension of Boughton two-parameter algorithm. |
| Lynie & Hollick algorithm (Lynie & Hollick 1979; Nathan & McMahon, 1990) | $q_{f(i)} = \alpha q_{f(i-1)} + (q_{(i)} - q_{(i-1)}) \frac{1+\alpha}{2}$ | $q_{f(i)} \geq 0$ α value of 0.925 recommended for daily stream data filter recommended to be applied in three passes. Baseflow is $q_b = q - q_f$ |
| Chapman algorithm (Chapman, 1991; Mau & Winter, 1997) | $q_{f(i)} = \frac{3\alpha-1}{3-\alpha} q_{f(i-1)} + \frac{2}{3-\alpha} (q_{(i)} - \alpha q_{(i-1)})$ | Baseflow is $q_b = q - q_f$ |
| Furey & Gupta filter (Furey & Gupta, 2001) | $q_{f(i)} = (1-\gamma) q_{b(i-1)} + \gamma \frac{c_3}{c_1} (q_{(i-d-1)} - q_{b(i-d-1)})$ | Physically-based filter using mass balance equation for baseflow through a hillside |
| EWMA filter (Tularam & Ilahee, 2008) | $q_{b(i)} = \alpha q_{(i)} + (1-\alpha) q_{b(i-1)}$ | Exponential Smoothing Method of Base Flow Separation |

$q_{(i)}$ is the original streamflow for the i^{th} sampling instant
 $q_{b(i)}$ is the filtered baseflow response for the i^{th} sampling instant
 $q_{f(i)}$ is the filtered quickflow for the i^{th} sampling instant
 $q_{(i-1)}$ is the original streamflow for the previous sampling instant to i
 $q_{b(i-1)}$ is the filtered baseflow response for the previous sampling instant to i
 $q_{f(i-1)}$ is the filtered quickflow for the previous sampling instant to i
 k is the filter parameter given by the recession constant
 α, α_q are filter parameters
 C is a parameter that allows the shape of the separation to be altered
 γ, c_1, c_3 are physically based parameters

Considerando que no se cuentan con pruebas con trazadores, isotopos ambientales y series de precipitación para la zona de estudio, como una primera aproximación para realizar la separación de flujo base se adoptará el filtro propuesto por (Lynie & Hollick, 1979)⁴⁴ el cual posee una gran versatilidad considerando que únicamente involucra un parámetro (α) para su calibración. Se muestra la expresión que describe filtro adoptado.

⁴³ HydroOffice. BFI+3.0-User's Manual. (2010).

⁴⁴ *Ibid*

$$Q_{(t)} = \beta Q_{d(t-1)} + \frac{1+\beta}{2} (Q_{(t)} - Q_{(t-1)}) \quad (1)$$

y el caudal total está definido por

$$Q = Q_d + Q_b \quad \therefore \quad Q_b = Q - Q_d \quad (2)$$

Donde:

- Q=Flujo total para un intervalo de tiempo (i)
- Q_d =Flujo superficial o flujo de escorrentía para un intervalo de tiempo (i)
- Q_b =Flujo base para un intervalo de tiempo (i)
- β =Parámetro de ajuste de filtro asociado a la recesión del flujo.

Para la separación de flujo base, se utilizó un coeficiente de ajuste (β) de 0,9, el cual presenta un buen ajuste respecto a los caudales registrados en épocas de recesión. Se muestra la cuenca de drenaje y la separación de flujo base para la cuenca del río El Carmen delimitada a la altura de la estación Pte. La Sánchez (cod: 11027010).

FIGURA 41. CUENCA DEL RÍO EL CARMEN DELIMITADO A LA ALTURA DE LA ESTACIÓN PTE LA SÁNCHEZ.
FUENTE. ELABORACIÓN PROPIA.

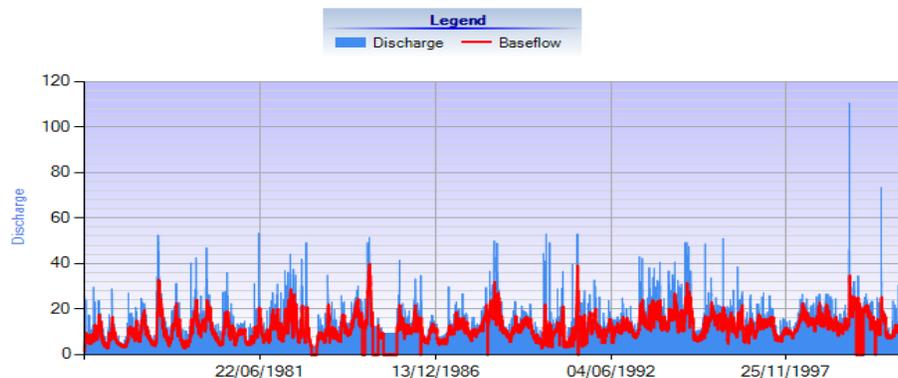
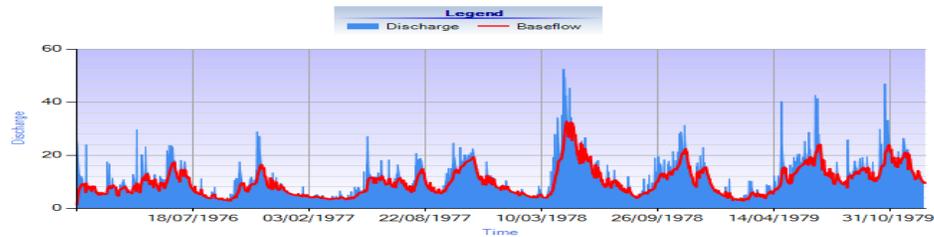
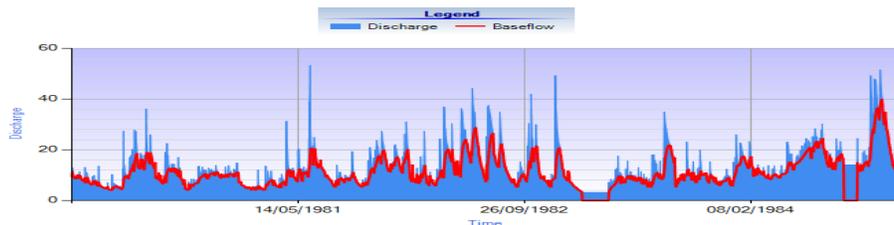


FIGURA 42. FLUJO BASE PARA EL PERIODO (1976-2001) A LA ALTURA DE LA ESTACIÓN PTE LA SÁNCHEZ.
FUENTE. ELABORACIÓN PROPIA.

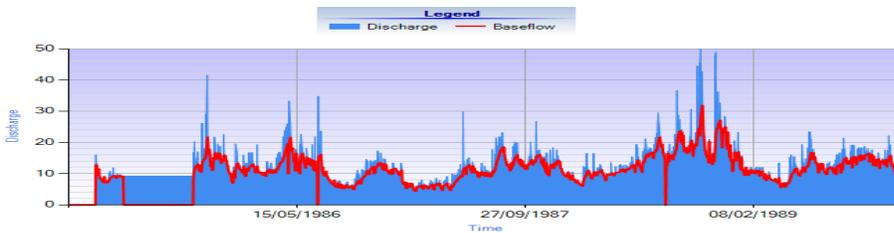
Se muestran gráficas para los periodos 1976-1989, 1980-1984, 1985-1989, 1990-1994 y 1995-2001⁴⁵.



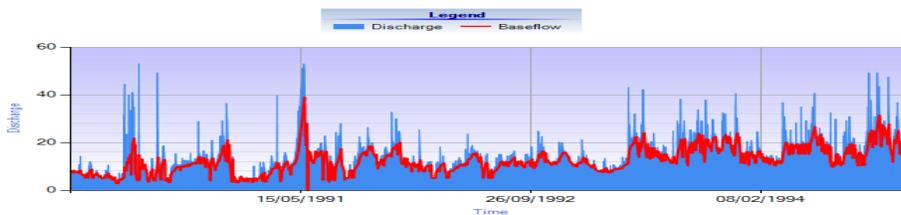
1976-1980



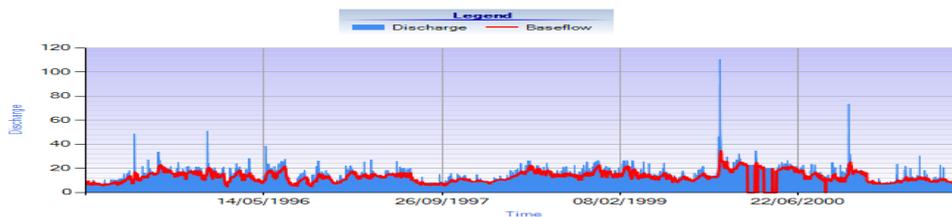
1980-1985



1985-1990



1990-1995



1995-2001

FIGURA 43. FLUJO BASE PARA LOS PERIODOS 1976-1989, 1980-1984, 1985-1989, 1990-1994 Y 1995-2001. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

⁴⁵ Para ver en detalle el comportamiento del flujo base a nivel anual, remitase al Anexo 2.

Una vez obtenida la serie de flujo base, se procedió a realizar pruebas estadísticas para detectar cambios de media que eventualmente podrían estar asociadas a la actividad minera subterránea.

Para la detección de estos cambios, se utilizó la prueba estadística no paramétrica⁴⁶ de suma de rangos de Wilcoxon o Mann-Whitney permite identificar cambios significativos en la media de una serie de datos, se utilizó un tamaño muestral de 1 año (365 datos).

Para esta prueba se adoptó como hipótesis nula la igualdad de medias y como hipótesis alternativa la desigualdad de medias; en consecuencia, si se aprueba la hipótesis nula se afirma que no existen variaciones significativas en la media y caso contrario si se rechaza la hipótesis nula se puede afirmar que existen variaciones significativas en la media. Estas pruebas se realizan para un nivel de significancia del 5% y un intervalo de confianza del 95%.

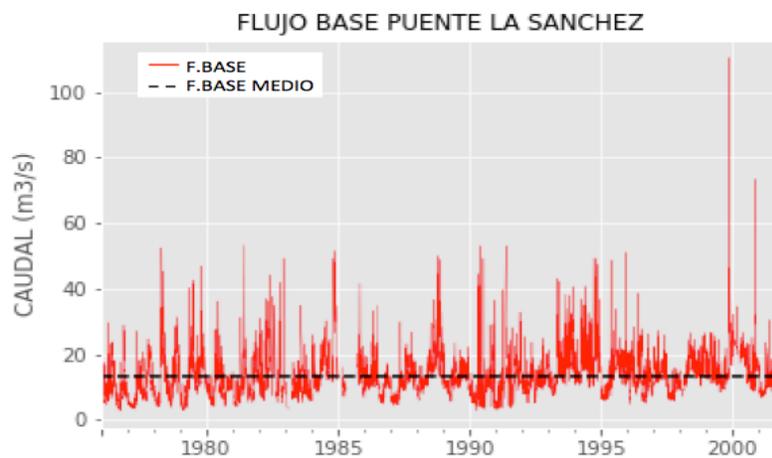


FIGURA 44. FLUJO BASE PARA EL PERIODO 1976-2001

Una vez aplicada la prueba para determinar el cambio de media para, se puede apreciar que no existen cambios significativos, por lo tanto, no se puede afirmar que la actividad minera subterránea de la mina El Roble haya impactado de manera considerable las condiciones de flujo base.

Sin embargo es pertinente dejar claramente planteadas las incertidumbres asociadas metodología aplicada previamente:

1. Incertidumbre asociada a la falta de pruebas hidrogeoquímicas: Considerando que no se cuentan con pruebas hidrogeoquímicas (pruebas con trazadores e isótopos ambientales),
2. Incertidumbre respecto al comportamiento hidrológico de la cuenca del río el Carmen respecto a la respuesta de la cuenca frente a eventos de precipitación y cuantificación del flujo base.
3. Incertidumbre asociada a la instrumentación: Se tiene incertidumbre respecto a la estación limnimétrica tomada como referencia que corresponde a la estación Pte La Sánchez, puesto que no registra únicamente el caudal del río El Carmen sino

⁴⁶ Considerando que no se conoce la distribución a la cual se ajustan los datos.

también el caudal de otros afluentes como la quebrada El Español, la quebrada El Aserradero, la quebrada Cocojondo, quebrada El Dabro, la quebrada La Unión, río El Ciervo, río Habita entre otros, lo cual no permite discernir de manera clara caudal efectivo del río El Carmen y por ende su flujo base.

3.6. CALIDAD DE AGUA

La exposición en superficie de grandes volúmenes de roca que en un principio se encontraban en el subsuelo, completamente aisladas del oxígeno, activa una serie de reacciones y transformaciones geoquímicas. Dependiendo de la composición mineralógica y geoquímica de las rocas que están siendo expuestas se pueden liberar y movilizar en las aguas superficiales y subterráneas especies químicas que pueden llegar a ser tóxicas para el ser humano o los ecosistemas (por ejemplo, metales pesados o metaloides como el arsénico) afectando de esta manera sus condiciones de calidad previas a la actividad minera.

En el caso de la mina El Roble (minería subterránea) el manejo de aguas de escorrentía que tienen contacto con la roca en los socavones y con los desechos rocosos en superficie, los vertimientos de aguas residuales industriales provenientes de las presas de relaves mineros resultantes del proceso de beneficio del cobre y la generación de aguas residuales domésticas, son algunos de las fuentes de contaminantes que eventualmente pueden ser causa del deterioro de la calidad del río Atrato y algunos de sus afluentes como la quebrada El Roble.

La importancia del río Atrato es de orden nacional, al ser empleado como fuente abastecimiento de agua, actividades de pesca, riego de cultivos y ser arteria fluvial de navegabilidad, lo cual es reiterado en la sentencia T-622 de 2016⁴⁷. En este sentido, y dada su vulnerabilidad al recibir los vertimientos directos e indirectos de aguas residuales industriales y domésticas provenientes del proyecto minero El Roble, es preciso estudiar las condiciones de calidad del agua actuales y así tomar decisiones urgentes en caso de que se esté viendo afectado. Debe tenerse en cuenta que no existe información de línea base para las condiciones fisicoquímicas del agua previas al inicio de la actividad minera y por lo tanto no es posible establecer con certeza los cambios que dicha actividad ha generado en la quebrada El Roble y el río Atrato.

3.6.1. Análisis de información de la entidad ambiental y minera

Autoridad minera – ANM

Se buscó información relacionada con el componente de calidad de agua dentro de los cuadernillos del expediente No. 9319 entregado por ANM a WWF con el fin de identificar información de línea base correspondiente a la caracterización fisicoquímica de los cursos de agua superficial a los alrededores de la mina El Roble.

En el **cuadernillo 3** - página 163 (24 de diciembre de 1986) se encuentra un oficio mediante el cual se remite a Protección del Medio Ambiente el Estudio de Declaración de Impacto Ambiental para la mina El Roble (el cual se encuentra incompleto). Según la evaluación de la Dirección General de Minas dicho documento “*se fundamenta en el*

⁴⁷ Corte Constitucional de la república de Colombia. Sentencia T-622 de 2016.

establecimiento de la Línea Base considerando el deterioro causado por el proyecto de explotación existente” (sic). Sin embargo, dicho documento fue entregado luego del inicio de las labores en la mina El Roble de tal manera que no es posible comparar el estado actual del agua con las condiciones anteriores a cualquier intervención minera.

Con relación al componente calidad de agua, dentro de dicho documento se destaca la identificación de las afectaciones por la ejecución del proyecto en la calidad del agua: vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales relacionadas con el beneficio, aguas ácidas provenientes de la mina y arrastre de sedimentos durante la fase de construcción. Adicionalmente se establecen algunas medidas de mitigación para cada uno de estas afectaciones y las condiciones fisicoquímicas que se pretenden alcanzar con estos tratamientos.

Sin embargo, esta información junto con la de la caracterización de línea base de calidad de agua se encuentra en las tablas 9, 10, 11, 22 y 23 las cuales no aparecen en el documento que fue remitido por la ANM. Por último, en el concepto mediante el cual el Ministerio de Minas y Energía aprueba el documento ambiental y requiere a la empresa para que semestralmente realice monitoreo de las características fisicoquímicas de las quebradas La Favorita y La Cristalina, no obstante en la información remitida los resultados de dicho monitoreo están ausentes.

En el **cuadernillo 8** – página 121 se encuentra un Informe de visita técnica realizada el 21 de enero de 2009 por funcionarios de INGEOMINAS (autoridad minera en ese momento) y Codechocó. De acuerdo con este informe las aguas de infiltración de los niveles 2.000 y 2.100 son evacuadas y posteriormente vertidas al río Atrato lo cual cambia el color natural de la corriente, situación que se puede interpretar como un vertimiento con alto contenido de material en suspensión el cual cambia las condiciones sedimentológicas naturales de este cauce.

Adicionalmente, en la página 187 se encuentra el reporte sobre el evento de inestabilidad en los relaves ocurrido el 13 de agosto de 2009 enviado por Miner S.A a Codechocó. Durante este evento alrededor de 5.100 m³ de relaves taponaron parcialmente el río Atrato y provocó el arrastre y acumulación de estos sedimentos a lo largo del cauce incluso hasta llegar a la población de El Siete. Como medida de mitigación se removió el material que estaba taponando el río Atrato y el acumulado en las riveras a lo largo del cauce, y como compensación la empresa definió hacer un monitoreo durante un mes, en un único punto frente al hospital del pueblo, donde medirían pH y sólidos suspendidos totales y luego remitirían los resultados a Codechocó. A pesar de las altas concentraciones de elementos tóxicos como metales pesados y metaloides que estos relaves suelen tener ni la empresa ni Codechocó⁴⁸ vieron la necesidad de medir este tipo de parámetros (por lo menos conductividad) para determinar si la afectación al río pudo haber sido algo más que carga de sedimentos.

En el **cuadernillo 12** – página 84 se encuentra el Informe de preparación de campo No. 5 a cargo del Consorcio HGC (25 de junio de 2014) en cuyo aparte ambiental se afirma que sobre el cauce de la quebrada El Roble se ha dispuesto *material estéril* (sic) lo cual probablemente tuvo implicaciones en el deterioro del agua de dicha quebrada (cambios en sus características fisicoquímicas).

⁴⁸ Codechocó. 2010. Informe de visita de seguimiento avance plan de contingencia (SCCA-140-IS-RRCB/DCC-001-10)

Además, desde la página 134 (6 de agosto de 2014) se encuentra el Informe de Inspección técnica de seguimiento y control a la mina El Roble elaborado por el mismo consorcio, en el cual se hacen las siguientes observaciones: las aguas bombeadas deberían ser tratadas y monitoreadas (con parámetros o indicadores de aguas ácidas) antes de ser descargadas al río Atrato, se observan mezclas de aguas industriales con aguas de escorrentía natural, las aguas que surgen de la mina subterránea no son monitoreadas para conocer si son de naturaleza ácida o no y que los *depósitos de estériles y de mineral* (sic) se encuentran a la intemperie sin medidas adecuadas para el control de lixiviados que puedan generarse por agua de escorrentía.

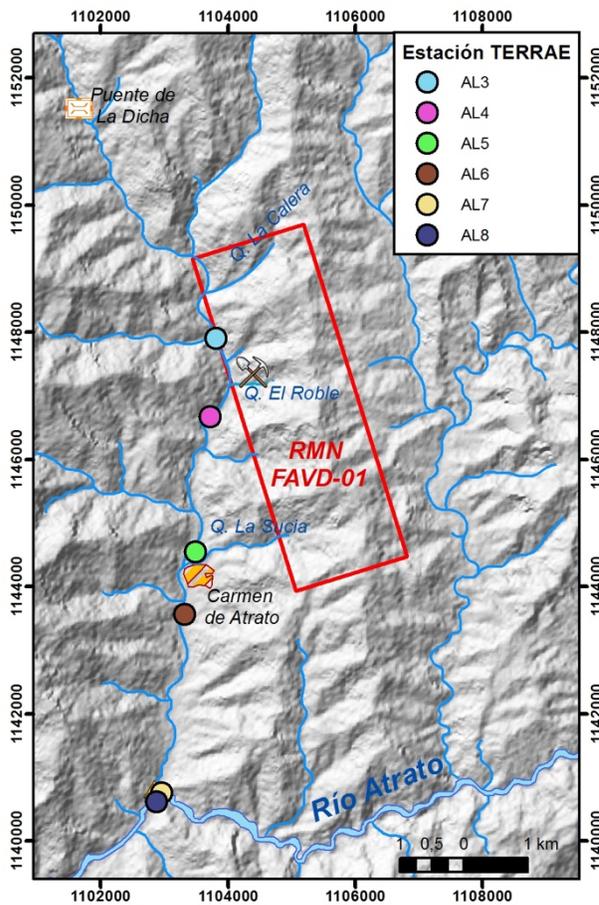
Finalmente, en este informe se concluye, entre otras cosas, que la quebrada El Roble es una de las principales afectadas por vertimientos de aguas que surgen de la mina y por el aporte de sedimentos desde la vía de acceso a la bocamina.

[Autoridad ambiental - Codechocó](#)

Durante la visita hecha a la sede de Codechocó en Quibdó se obtuvieron datos del monitoreo que hace esta Corporación a lo largo del río Atrato e información del expediente ambiental de la mina El Roble.

Según las memorias de los monitoreos hechos por el laboratorio de aguas de Codechocó los parámetros incluidos en el análisis fisicoquímico son turbiedad, pH, temperatura, conductividad, dureza, alcalinidad, cloruros, nitritos, fosfatos, sólidos totales, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto, DBO, coliformes fecales y totales. El enfoque del monitoreo es fundamentalmente para la determinación de carga orgánica, aporte de nutrientes y contaminación por materia fecal. No existe información de concentración de metales pesados puesto que el laboratorio no cuenta con los equipos necesarios para este tipo de determinaciones.

Para el sector de Carmen de Atrato existe monitoreo para los años 2010 y 2013 y aunque se identificaron falencias en la identificación de las estaciones de monitoreo (coordenadas erróneas o falta de coordenadas) durante el recorrido hecho en noviembre de 2016 con funcionarios de Codechocó fue posible identificar estas estaciones y establecer un equivalente con las estaciones de TERRAE.



| Estación TERRAE | Estación Codechocó |
|-----------------|------------------------------------|
| AL3 | Antes vertimiento Miner S.A |
| AL4 | Después vertimiento Miner S.A. |
| AL 5 | Antes Carmen de Atrato (pueblo) |
| AL6 | Después vertimiento alcantarillado |
| AL7 | Puente El Siete |
| AL8 | Bomba El Siete |
| S.E | Quebrada La Sucia |

S.E: Sin equivalente

FIGURA 45. EQUIVALENCIA DE ESTACIONES DE MONITOREO DE CODECHOCÓ CON LAS ESTACIONES HECHAS POR TERRAE EN 2016. ELABORACIÓN PROPIA

En el año 2010 se tomaron datos en marzo y dos fechas de septiembre, sin embargo los datos del primer mes difieren bastante con respecto al segundo. Mientras que en febrero se midió turbiedad, coliformes fecales y totales, dureza, sólidos totales, alcalinidad, cloruros, DBO5, nitritos y fosfatos, en septiembre tan solo se midió dureza, alcalinidad, cloruros y DBO5.

En el mes de febrero se destacan en particular las estaciones del Puente El Siete (aguas arriba de la confluencia del río Atrato con el río Habita) y Bomba El Siete (aguas abajo de dicha confluencia) debido a sus altos valores de coliformes fecales (19.600 y 18.700 UFC) y totales (21.300 y 20.500 UFC)⁴⁹, sólidos totales (912 y 1.128 mg/L) y sólidos suspendidos totales (788 y 956 mg/L), y la estación Después del vertimiento del alcantarillado por concentraciones de coliformes fecales de 14.700 UFC y totales de 21.300 UFC. En este mes es imposible identificar algún efecto generado por la mina dado que no se registra información del punto aguas arriba de esta. Aun así lo que se observa es una tendencia al aumento de prácticamente todos los parámetros medidos en esta fecha en dirección aguas abajo.

⁴⁹ Tanto coliformes fecales como totales se encuentran por encima del límite establecido por la Resolución 2115 de 2007. En general, todas las estaciones se encuentran por encima del límite.

En el mes de septiembre no se observa una tendencia clara al aumento o disminución de los parámetros medidos. Igualmente no se evidencian valores anómalos, a excepción de un valor de DBO5 en la estación Después del vertimiento alcantarillado la cual es de 5,17 mg/L. En general los valores de alcalinidad se encuentran alrededor de 60 mg/L, los de cloruros alrededor de 1 mg/L y dureza alrededor de 100 mg/L.

En el 2013 se midió en el mes de agosto turbiedad, pH, temperatura, conductividad, dureza, alcalinidad, fosfatos, sólidos totales, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto, DBO, % de saturación, coliformes fecales y totales. Se observa un incremento significativo de la turbiedad entre la estación Antes del vertimiento de la mina y Antes del pueblo (14,2 a 155 NTU), el cual coincide con el incremento de la dureza (25,7 a 83,2 mg/L), sólidos totales (132,1 a 325 mg/L) y sólidos suspendidos totales (<10,38 a 176 mg/L). En los demás parámetros no se evidenció un cambio significativo entre estaciones: el pH se encuentra alrededor de 7, la conductividad eléctrica alrededor de 170 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la alcalinidad alrededor de 60 mg/L y los fosfatos por debajo de 0,2 mg/L.

Atico Mining Corporation (Miner S.A)

En el expediente ambiental de la mina El Roble se encontró un Informe de Cumplimiento Ambiental – ICA entregado por Miner S.A en el año 2012. En este se encuentran los resultados de análisis de laboratorio de cuatro muestras de agua tomadas en el río Atrato y la quebrada El Roble, sin embargo no se encontraron las coordenadas para estos puntos sino el nombre de cada uno.

Al comparar algunos de los parámetros medidos entre las estaciones analizadas se identificaron anomalías en los valores reportados en la quebrada El Roble. Por ejemplo los valores de alcalinidad sobre el río Atrato se encuentran entre 23 y 56 mg/L mientras que en la muestra de la quebrada El Roble es de 102 mg/L, los sulfatos sobre el río Atrato son de 7,23 a 28,74 mg/L y en la quebrada El Roble son de 145,56 mg/L. Estos últimos probablemente se generaron a partir de la oxidación de los sulfuros que conforman las rocas dispuestas sobre el cauce de esta quebrada.

En el expediente se encontraba también el *Estudio hidrológico, hidráulico, hidrogeológico y de calidad de aguas del título minero “El Roble”* (mayo de 2013), de la empresa Atico Mining Corporation. En este se encuentra la caracterización de 10 muestras de agua, 8 superficiales y 2 subterráneas, de diferentes cursos de agua presentes en el área de influencia de la mina.

Durante el muestreo se tomaron datos en campo de temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales. El pH en todos los puntos de muestreo es alcalino a muy alcalino (8,44 a 9,45), la conductividad se encuentra entre 53 y 466 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a excepción de las muestras de agua subterránea (bocamina 2000 y 2100) en las cuales es de 2.525 y 2.295 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Algo similar sucede con los sólidos disueltos totales donde los valores de las muestras de agua superficial están entre 27 y 233 ppm y los de agua subterránea son 1.263 y 1.147 ppm. De los resultados de los ensayos de laboratorio se destacan los valores por encima de 1.000 mg Cl/L en todas las estaciones (excepto Atrato Alto y La Cristalina), y los valores del orden de decenas y centenas de miles de dureza total medida en mg CaCO_3/L .

En cuanto a la influencia directa de la actividad minera en la muestra de la Bocamina 2100 y 2000 se encontró una concentración de 0,194 y 0,082 mg/L de níquel y 7.394 y 304.338 mg/L de zinc respectivamente lo cual, admitido por la empresa en ese mismo

documento, excede los límites establecidos por la Resolución 2115 de 2007 para consumo humano y con los estándares de la EPA para la protección de ecosistemas acuáticos. Adicionalmente los valores de concentración de sulfatos más altos se encontraron en las dos muestras de agua subterránea y en la de la quebrada El Roble (145.555 a 181.302 mg/L).

3.6.2. Análisis de monitoreo in situ

Los parámetros medidos in situ en el río Atrato y sus principales tributarios fueron: pH (unidades de pH), temperatura (grados Celsius - °C), conductividad eléctrica (CE) ($\mu\text{S}/\text{cm}$), potencial de óxido-reducción (ORP) (mV) y sólidos totales disueltos (TDS) (mg/l). Estos datos se midieron con un medidor multiparamétrico HI 98195 de la marca HANNA INSTRUMENTS, el cual cuenta con una sonda con cable de 4 metros (13,1'), con sensores de pH/redox, y conductividad eléctrica (CE). Además, se utilizaron equipos multiparamétricos portátiles HANNA Ref. HI98121 y LaMotte PockeTester Tracer Ref. 1749 (estos equipos no miden TDS).

La toma de datos fisicoquímicos en el río Atrato y algunos de sus afluentes se realizó con el objetivo de tener la mayor cantidad y representatividad de información para identificar eventuales impactos ambientales generados por la actividad minera desarrollada por el proyecto El Roble. El reconocimiento del área se basó en el recorrido del río Atrato desde aguas arriba del proyecto minero, exactamente en el sector conocido como el Puente de la Dicha y aguas abajo en el casco urbano de Carmen de Atrato.

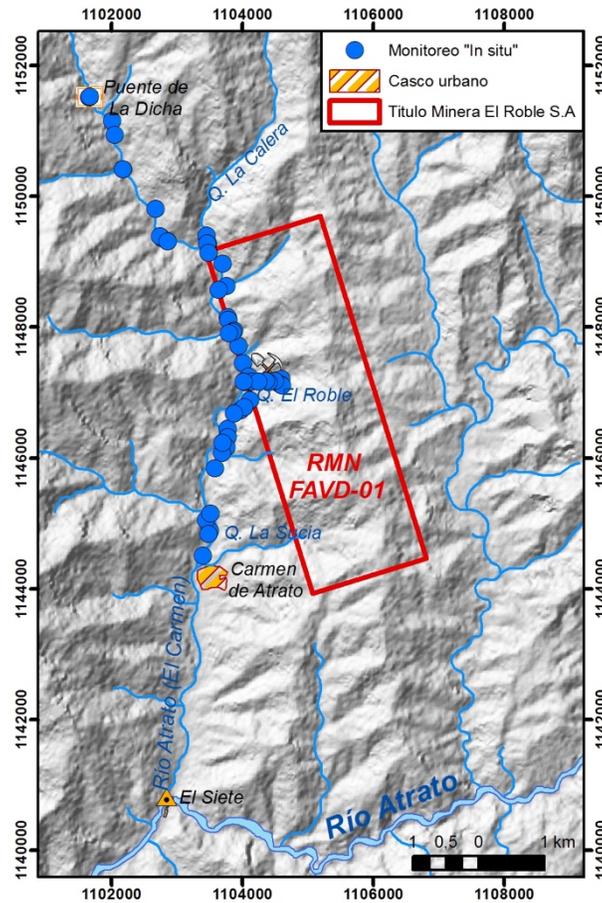


FIGURA 46. ESTACIONES DONDE SE MIDIERON PARÁMETROS *IN SITU* EN AGUA SUPERFICIAL. ELABORACIÓN PROPIA

Con relación al pH se observó que este tiende a ser alcalino (7,5 – 9) a lo largo del río Atrato y en la mayoría de sus afluentes de su vertiente oriental, excepto un valor de 10,5 que se midió en los relaves de la presa 4. Durante la jornada de campo no se observó un cambio evidente de pH hacia la cercanía de la mina o en los alrededores de las presas de relaves. Por otro lado, los valores de conductividad eléctrica se encontraron entre los 22,7 y 1.929 $\mu\text{S}/\text{cm}$ observándose en este caso una clara distribución de los valores más altos (mayores a 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$) a lo largo de la quebrada El Roble y a los alrededores de la mina y presas de relaves.

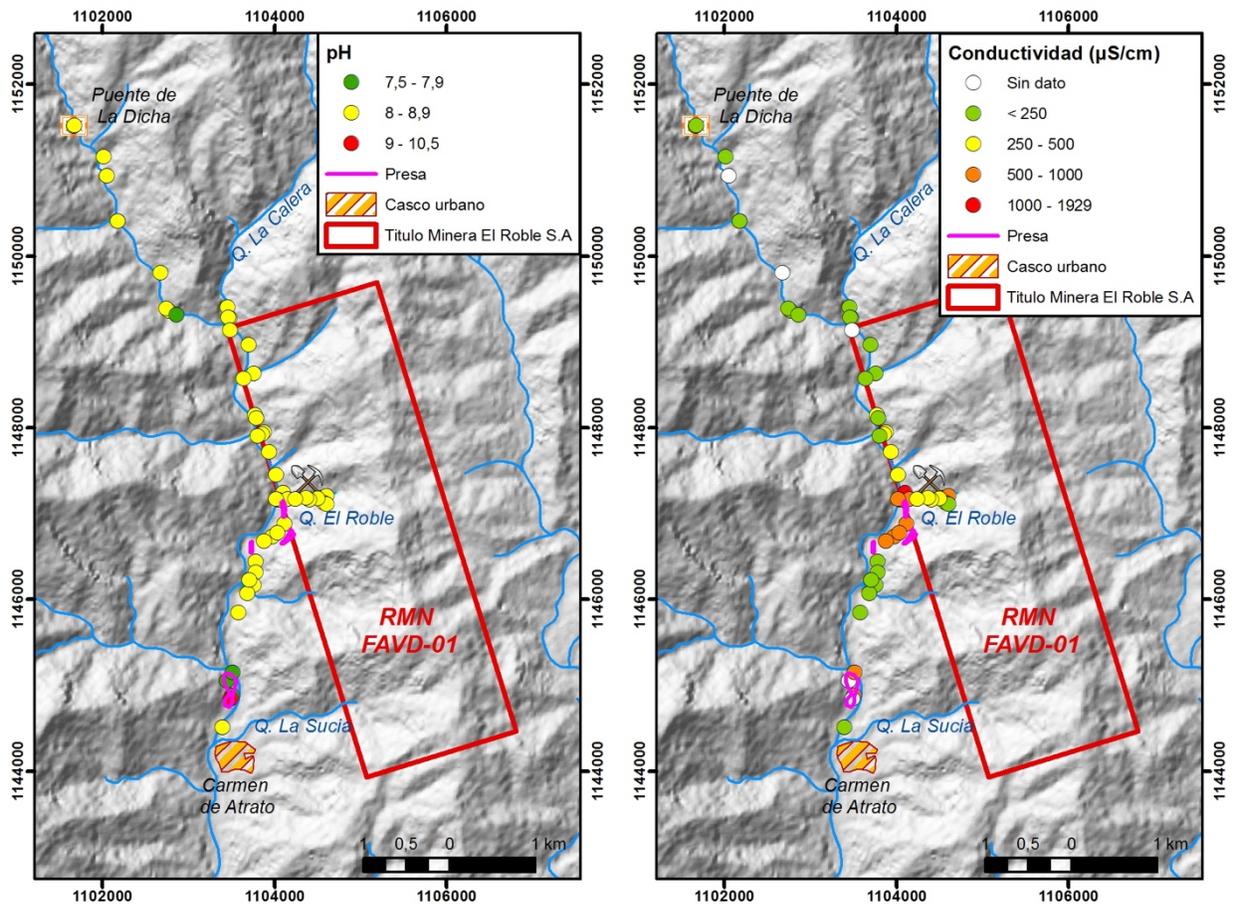


FIGURA 47. VALORES DE PH (DERECHA) Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (IZQUIERDA) MEDIDOS *IN SITU* EN AGUA SUPERFICIAL. ELABORACIÓN PROPIA

Ahora, con el fin de analizar patrones de distribución y correlación espacial de los parámetros medidos en campo se utilizó la técnica estadística de interpolación conocida como Distancia Inversa Ponderada (*IDW* por sus siglas en inglés). Este método de interpolación es considerado de tipo local, pues solo emplea los puntos muestrales que están en la vecindad de cada punto no muestral y el resultado del proceso de interpolación reproduce exactamente los valores en los puntos muestrales. El resultado será que el valor de una variable en un punto no muestreado es el promedio de la distancia inversa ponderada de los valores de los puntos muestreados que se encuentran alrededor (Romero, Irene y Gascueña, Toro, s.f).

Teniendo en cuenta que las mediciones se hicieron sobre el río Atrato (o cerca de las confluencias de sus afluentes) y sobre la quebrada El Roble, la interpolación se hará a lo largo de estos dos cursos de agua en un buffer de 50 metros para cada uno. Debe tenerse en cuenta que este tipo de representación espacial se está empleando como un medio indicativo gráfico de las propiedades fisicoquímicas medidas *in situ*, más no representa el comportamiento normal de la zona puesto que no se cuenta con una serie temporal de datos que permita robustecer el modelo de predicción y la densidad de muestreo no hizo total cubrimiento de la zona.

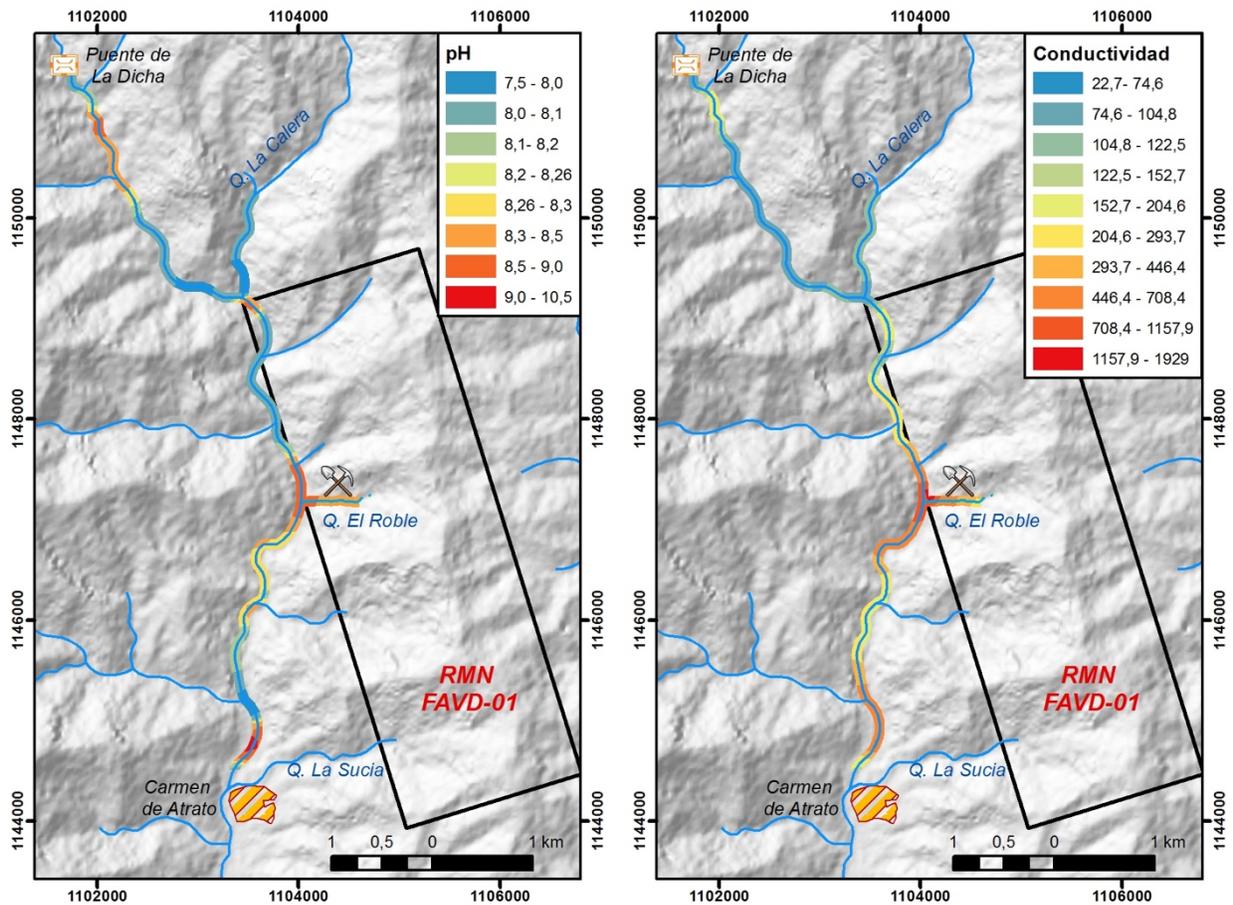


FIGURA 48. INTERPOLACIÓN DE DATOS DE pH (DERECHA) Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (IZQUIERDA) CON EL MÉTODO IDW. ELABORACIÓN PROPIA

Dado que la interpolación maneja rangos más pequeños (definidos por el propio programa según la distribución de todos los datos) es más sencillo identificar cambios leves de pH. Por ejemplo, en la figura anterior (derecha) ahora si se observa una concentración de los valores más alcalinos de pH cerca de la mina y presas de relaves, no obstante este comportamiento se observa también unos metros aguas abajo del Puente de la Dicha.

Con relación a la conductividad el modelo de predicción evidencia claramente como las condiciones del agua del río Atrato cambian y aparentemente no se recuperan luego de pasar por la mina y las presas de relaves. En cuanto a la quebrada El Roble se observan tonos cálidos (conductividades altas) a lo largo de todo el trazo.

Los datos de TDS se tomaron en el río Atrato los cuales estuvieron en un rango de 36 a 86 mg/L, a excepción del dato medido en el vertimiento (estación AL23) el cual dio 275 mg/L.

3.6.3. Análisis de resultados de laboratorio

La recolección de muestras se realizó con base en el protocolo del IDEAM y las instrucciones dadas por laboratorio de aguas de la Universidad de Cartagena, laboratorio encargado del análisis de estas. Los parámetros por analizar en laboratorio son: pH,

conductividad eléctrica, contenido de sólidos, carga orgánica y metales pesados. La selección de puntos de muestreo de agua superficial se realizó a lo largo del río Atrato con el propósito de evaluar las condiciones de calidad del río e identificar posibles afectaciones generadas por la actividad minera.

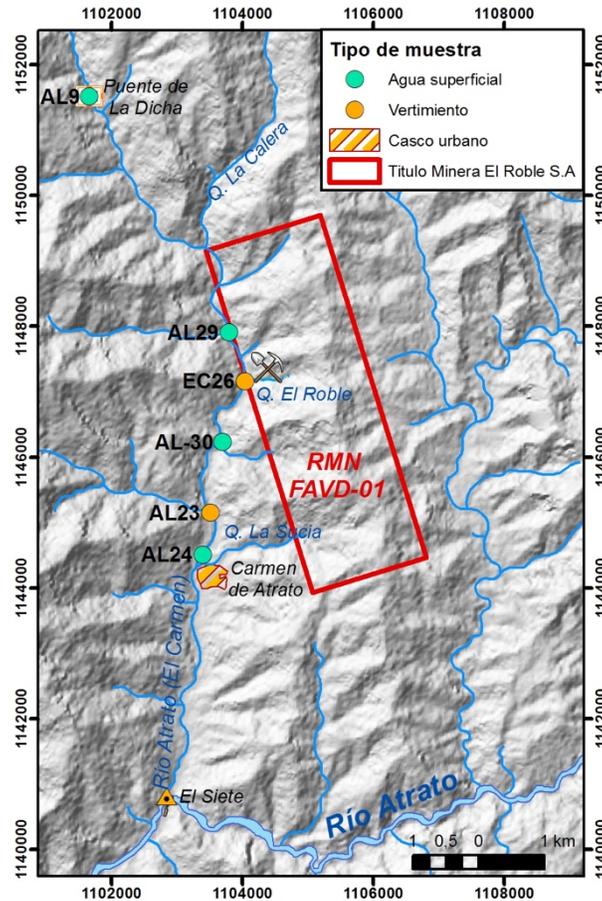


FIGURA 49. LOCALIZACIÓN DE MUESTRAS DE AGUA SUPERFICIAL. ELABORACIÓN PROPIA

Por lo anterior, se seleccionaron dos puntos aguas arriba de la mina y dos aguas abajo de la actividad minera antes de llegar a Carmen de Atrato. Además, se incluyó muestreo de agua dos vertimientos que hace la minera al río Atrato, el primero a la altura de la quebrada El Roble, cuerpo de agua que se encuentra atravesando la zona minera y el segundo a la altura de la presa No. 4.

TABLA 5. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO DE LAS MUESTRAS DE AGUA SUPERFICIAL

| PARÁMETRO | UNIDADES | L.D | MUESTRA | | | | | |
|----------------------|---------------------|----------|---------|--------|-------|--------|--------|--------|
| | | | AL23 | AL24 | AL25 | EC26 | AL29 | AL30 |
| Parámetros generales | pH | Unidades | 6,68 | 7,13 | 7,04 | 6,75 | 7,18 | 7,21 |
| | Conductividad | μS/cm | 577 | 138,20 | 83,30 | 824,00 | 113,40 | 147,10 |
| | Sólidos totales | mg/L | 397,40 | 141,00 | 56,00 | 504,00 | 79,00 | 184,00 |
| | Sólidos suspendidos | mg/L | 1,00 | 58,00 | 1,05 | 106,00 | 50,00 | 97,00 |

| PARÁMETRO | UNIDADES | L.D | MUESTRA | | | | | | |
|--------------------------|---------------------------|------|---------|--------|-------|---------|--------|--------|--------|
| | | | AL23 | AL24 | AL25 | EC26 | AL29 | AL30 | |
| Sólidos disueltos | mg/L | | 385,00 | 76,00 | 55,00 | 396,00 | 78,00 | 82,00 | |
| Sólidos sedimentables | mg/L | 0,10 | ND | 0,30 | ND | 2,00 | 0,50 | 0,30 | |
| Alcalinidad total | mg/L CaCO ₃ | | 30,00 | 54,00 | 40,00 | 20,00 | 52,00 | 42,00 | |
| Alcalinidad carbonácea | mg/L CaCO ₃ | | 30,00 | 54,00 | 40,00 | 20,00 | 53,20 | 42,00 | |
| Alcalinidad bicarbonácea | mg/L CaCO ₃ | 1,00 | 200,00 | 26,00 | ND | 268,00 | 1,20 | 38,00 | |
| Acidez total | mg/L CaCO ₃ | 0,25 | ND | ND | ND | ND | ND | ND | |
| Acidez mineral | mg/L CaCO ₃ | 0,25 | ND | ND | ND | ND | ND | ND | |
| D.Q.O | mg/L | | 6,96 | 2,32 | 10,32 | 107,36 | 4,64 | 23,20 | |
| D.B.O | mg/L | | 3,00 | 1,50 | 5,00 | 50,00 | 2,50 | 10,00 | |
| Detergentes | mg/L | 0,05 | 0,06 | 0,80 | ND | 0,26 | ND | 0,06 | |
| Metales pesados | Zinc | µg/L | 13,90 | 1,91 | 1,00 | 1720,30 | 2,69 | 338,00 | |
| | Níquel | µg/L | ND | ND | ND | ND | ND | ND | |
| | Plomo | µg/L | 0,70 | 0,60 | 0,68 | 12,36 | 0,70 | 0,70 | |
| | Arsénico | µg/L | 0,02 | 0,30 | ND | 1,08 | 0,39 | 0,12 | |
| | Cromo | µg/L | 0,07 | ND | 0,75 | 1,90 | 0,27 | 0,25 | |
| Iones | Sulfuros | mg/L | 0,05 | ND | N.D | 0,28 | N.D | ND | |
| | Sulfatos | mg/L | 0,06 | 243,00 | 23,40 | 7,92 | 322,00 | 14,44 | 28,11 |
| | Calcio | mg/L | | 42,3 | 4,46 | 2,59 | 58,85 | 4,26 | 4,20 |
| | Magnesio | mg/L | 0,02 | 1,82 | 1,47 | 1,02 | 2,98 | 1,54 | 172,00 |
| | Potasio | mg/L | 0,07 | 14,56 | 1,71 | 0,61 | 18,07 | 3,10 | 3,81 |
| | Sodio | mg/L | 0,05 | 1,21 | 1,07 | 0,49 | 4,30 | 1,14 | 1,21 |

Aqua superficial

Algunos de los parámetros analizados fueron comparados con la Resolución 2115 de 2007 la cual establece los valores límites para consumo humano y el Decreto 1594 de 1984 el cual define los límites para uso agrícola, pecuario y recreativo. Además se tuvo en cuenta las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud – OMS

Las muestras AL9 y AL29 se encuentran sobre el río Atrato aguas arriba de la mina El Roble, la primera en el sector conocido como Puente de La Dicha y la segunda justo antes de la mina. Los valores de pH son muy cercanos a la neutralidad (7,04 y 7,18), la conductividad se encuentra en 83,3 y 113, 4 µS/cm, concentración de sulfatos de 7,92 y 14,44 mg/L y los contenidos de sólidos totales son de 56,0 y 79,0 mg/L, lo cual representa condiciones óptimas de la calidad del agua en esos sectores. En cuanto a los

contenidos de metales pesados y metaloides, aunque todas las concentraciones se encuentran por debajo de los límites establecidos en la norma y recomendados por la OMS, es importante tener en cuenta que en ambas muestras se detectaron contenidos de zinc y plomo, y arsénico y cromo en la muestra AL29.

Aguas abajo de la mina se tienen las muestras AL30 y AL24, también sobre el río Atrato antes de su paso por el casco urbano de Carmen de Atrato. La primera, AL30, se tomó aguas abajo de las presas de relaves antiguas (1, 2 y 3) y la AL24 se tomó aguas abajo de la presa de relaves 4 la cual se encuentra activa. Los valores de pH se encuentran también muy cerca de la neutralidad (7,21 y 7,13), sin embargo si se evidencia un incremento en los valores de conductividad eléctrica (147,10 y 138,20 $\mu\text{S}/\text{cm}$), concentración de sulfatos (23,40 y 28,11 mg/L) y en los contenidos de sólidos (totales de 184,0 y 141,0 mg/L, suspendidos de 58,0 a 97,0 mg/L y disueltos de 76,0 a 82,0 mg/L).

Adicionalmente, se observó un incremento en la concentración del zinc de hasta dos órdenes de magnitud para la muestra AL30 (0,338 mg/L, por encima del límite establecido en el Decreto 1594 de 1984 para contacto primario de 0,1 mg/L) y de cromo para la muestra AL24 (0,75 $\mu\text{g}/\text{L}$). Las concentraciones de plomo son similares a las encontradas aguas arriba de la mina y el arsénico se encuentra por debajo del límite de detección (0,02 $\mu\text{g}/\text{L}$).

A partir de lo anterior se puede decir que las condiciones de calidad del agua del río Atrato se ven afectadas luego de pasar por el área influencia de la mina El Roble, por lo menos en términos de conductividad, concentración de sulfatos y contenido de sólidos disueltos. Adicionalmente se observa un incremento en el contenido de algunos metales pesados (cromo y zinc). Sin embargo, las cuatro muestras se encuentran por debajo de los límites establecidos en la norma tanto para consumo humano como para uso agrícola, pecuario y recreativo.

Vertimientos

Las muestras EC26 y AL23 se tomaron en vertimientos directos al río Atrato identificados durante la jornada de campo, la primera a la altura de la quebrada El Roble donde se encuentran las instalaciones de la mina y la segunda a la altura de la presa de relaves 4. Ambas muestras son de aguas combinadas, es decir que recogen aguas residuales industriales (de la planta de beneficio y de la presa de relaves) y aguas de escorrentía.



FIGURA 50. ESTACIÓN EC26 (DERECHA) Y AL23 (IZQUIERDO) DONDE SE IDENTIFICARON VERTIMIENTOS

Los parámetros analizados fueron comparados entonces con la Resolución No. 631 de 2015 (artículo 10 - Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas – ArnD a cuerpos de aguas superficiales se actividades de minería).

Los valores de pH se encuentran muy cerca de la neutralidad (6,68 y 6,75) sin embargo, a diferencia de las muestras de agua superficial, estas tienden a la acidez. Los valores de conductividad eléctrica se encuentran en 824 y 577 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la concentración de sulfatos en 322 y 243 mg/L y los contenidos de sólidos totales en 597 y 397,4 mg/L, suspendidos en 106 y 1 mg/L y disueltos en 396 y 385 mg/L. En general se observa que las condiciones de calidad de agua de los vertimientos están bastante deterioradas en comparación con las condiciones normales del agua en el río Atrato. Aun así no se observan incumplimientos respecto a la Resolución 631 de 2015.

Por otro lado, se observó un incremento en la concentración del zinc de dos a cuatro órdenes de magnitud en ambas muestras (1,7203 y 0,0139 mg/L) e incremento de cromo (1,90 $\mu\text{g}/\text{L}$), arsénico (1,08 $\mu\text{g}/\text{L}$) y plomo (12,36 $\mu\text{g}/\text{L}$) en la muestra EC26, con relación a las condiciones normales del río Atrato. Aunque los valores encontrados se encuentran cumpliendo con estipulado en la norma debe tenerse en cuenta que estos vertimientos se están haciendo directamente en el río Atrato el cual, como se dijo anteriormente, tiene condiciones óptimas muy diferentes a la de estos vertimientos.

3.7. HIDROBIOTA

Los ecosistemas acuáticos continentales (lóticos y lénticos) son especialmente sensibles a las actividades humanas. La explotación de recursos naturales (minerales o bióticos), la descarga de desechos industriales, agropecuaria o doméstica de forma directa o por lavados generan vertimientos que tienen como destino final los ambientes acuáticos. Estos aportes generan modificaciones de las características químicas de los cuerpos de agua reflejándose en los cambios de la biota a razón de la composición y abundancia de grupos asociados a rangos de tolerancia a parámetros tales como sedimentación, contaminación, pH, oxigenación, conductividad, entre otros.

La evaluación de la hidrobiota, especialmente los macroinvertebrados como indicadores de la calidad del agua se argumenta en que dichos organismos tienen ciclos de vida muy cortos, por lo que en pocas generaciones (medido en días o semanas), se refleja el cambio de especies adaptadas a condiciones iniciales a aquellas más tolerantes a las modificaciones de la calidad de agua. Es por ello que constituyen un indicador sensible de la calidad ambiental. Siendo estos organismos la base alimentaria de peces, anfibios y aves, su disminución no solo pone en evidencia el efecto de contaminantes sino también la potencial afectación sobre el suministro alimentario para organismos superiores.

La evidencia presentada en el componente de calidad de agua sobre los vertimientos a las quebradas producto de las actividades de la Mina El Roble, da cuenta de los contaminantes que afectan las características antes y después de los puntos de operaciones. Estos pueden constituir la causa de la disminución en composición y abundancia observada en la comunidad de macroinvertebrados evaluados antes, durante y después de la mina. Sin embargo, no se cuenta con estudios previos o línea base ambiental en las quebradas que atraviesan el título minero que permitan establecer una relación de causalidad de los resultados hallados y las operaciones mineras.

3.7.1. Análisis de información de la entidad ambiental y minera

Previo al levantamiento de la información en terreno, se realizó una revisión bibliográfica de estudios realizados en la zona lo cual comprende literatura gris de carácter académico, publicaciones científicas, informes técnicos relacionados con el título minero, así como también en estudios ambientales desarrollados en la zona. Esto tiene como objetivo construir un panorama en cuanto a las características ambientales del área de estudio.

- En el documento **“Estudio hidrológico, hidráulico, hidrogeológico y calidad de aguas del título minero "El Roble" de la empresa Atico Mining Corporation”** presentado por Corporación Merceditas (2013) solo se hace mención respecto a la biota a que *“Las márgenes de la quebrada está compuesta de arbusto de mediano tamaño y en algunas zonas hay presencia de árboles”*.

De igual forma que para otros componentes se realizó una revisión detallada del componente biótico en los cuadernillos del expediente No. 9319 de ANM a WWF con el objeto de tomar de base los estudios iniciales sobre la mina el Roble y compararlos con los resultados obtenidos.

- En el **cuadernillo 3** - página 143 (30 de septiembre de 1986) en referencia a los Informes de revisión del informe final, donde la sección Protección de Medio Ambiente señala que en el informe final de exploración de la licencia 9319 no hay información ecológica, que ese aparte sólo constituye una declaración de efecto ambiental relacionado al beneficio, transporte y otros puntos de operación.

Entre las páginas 164 – 180 se menciona un cambio en la carga de sedimentos y transparencia de las quebradas, la degradación del Atrato como corriente receptora, descargas de desecho ácido por percolación de los túneles de la Mina, problemas sociales relacionados con cambio de aspecto del río el cual fue oscurecido.

- En el **cuadernillo 7** - página 30 en referencia al tratamiento de residuos líquidos producto de operaciones y mantenimiento a equipos, remoción de sólidos suspendidos y carga de contaminantes. Y lo más acercado al tema biótico se establece con la medida de compensación en reforestación por el equivalente de 5 hectáreas en bosque.
- En el **cuadernillo 8** - página 125 se hace referencia a un informe de verificación donde se señala que el agua subterránea proveniente de la mina es evacuada y vertida agua abajo, y presentan un color turbio originario por las partículas sólidas derivadas de la explotación, cargue y descargue de material. En la página 222 se redefinen las medidas de compensación ambiental así: reforestación, repoblamiento íctico, monitoreo de calidad y sólidos en suspensión.
- En el **cuadernillo 9** - se hace referencia a pruebas de toxicología en animales de sustancias a utilizarse o siendo utilizadas en la Mina (no queda claro esta parte en el documento), estas al parecer siguen los protocolos de la OCDE. Los nombres de los reactivos evaluados no son mencionados salvo por el AERO@3477 Promoter Aqueous – Sodium dialkyl dithiophosphate, la cual corresponde a una sal que funciona como agente de flotación. Acorde a la ficha la mortandad de peces ocurre a una concentración de 125mg/L a las 96Hrs y los invertebrados a los 132mg/L.

En la página 34 menciona brevemente de un incidente en el que por filtración de agua hacia una de las presas hubo caída de parte del jarillón de una presa sobre el río Atrato, sin pérdida de vidas humanas. Se menciona que el componente ambiental es

responsabilidad de Codechocó, mientras que en la pág. 50 acorde a lo establecido en el Decreto 2477 de 1986 es el titular de la mina quien debe asegurar las medidas de manejo ambiental.

- Como resultado de la visita hecha a Codechocó en Quibdó se puso en evidencia la ausencia de estudios a nivel biótico. Mencionan estudios en curso para el levantamiento de línea base ambiental en el marco de una figura de área protegida en cercanías al área de la Mina El Roble.
- Al igual que en las anteriores oportunidades los reportes de Atico Mining sobre la mina El Roble no hacen mención de estudios de impacto ambiental biótico o características ambientales diferentes a nivel fisicoquímico en los cuerpos de agua.

No se encontraron referencias de línea base sobre la biota acuática o su afectación en ningún documento revisado tanto los suministrados por la ANM a WWF, como documentos técnicos académicos o literatura gris.

3.7.2. Análisis de monitoreo in situ

Se realizó una campaña de campo donde se consideró la toma de muestras y mediciones *in situ* en tres puntos de muestreo localizados en el área de influencia de la mina, dos aguas arriba, uno aguas abajo de la presa de relave 1 y su presa auxiliar, otro debajo de la presa de relave 2 y otro, agua abajo de la presa de relave 4.

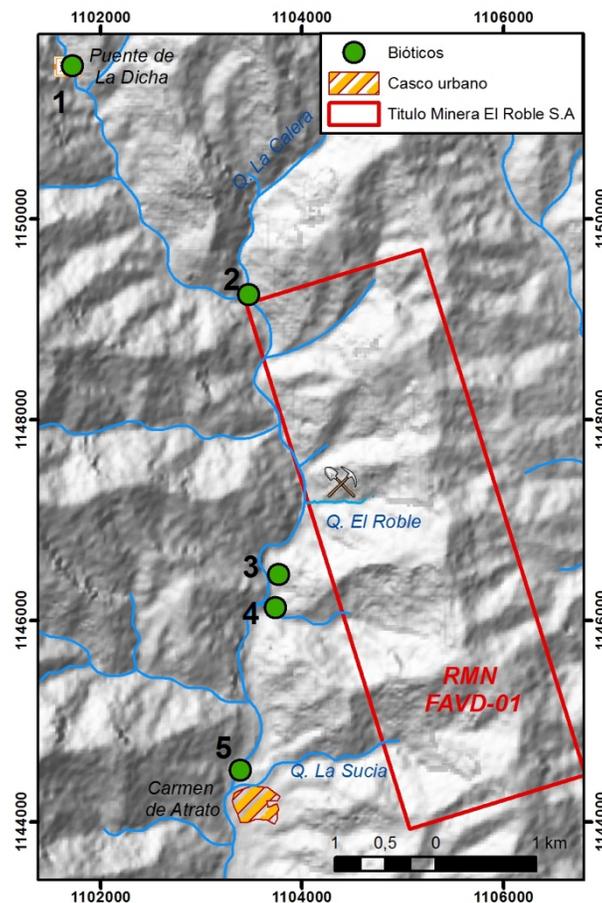


FIGURA 51. LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES CON MUESTREO BIÓTICO

El trabajo de campo de hidrobiota se realizó al inicio de la temporada seca. Los puntos muestreados presentaron las siguientes características cualitativas:

- Punto 1: Corresponde al tramo del río cercano al Puente La Dicha. Esta zona presenta como mayor intervención antrópica el paso de una carretera. Se caracterizó por: ser una zona con poca pendiente, sustrato rocoso con presencia de gravas, aguas transparentes al parecer oligotróficas, con profundidad menor a 50 cm y una importante presencia de vegetación ribereña nativa.
- Punto 2: Corresponde a la zona del río con aportes de la Quebrada La Calera. La intervención antrópica, además de la carretera, está dada por la cercanía a una truchera y un uso agropecuario del suelo. Se caracterizó por ser una zona con pendiente media, sustrato rocoso con presencia de arenas y limos, aguas transparentes con baja turbiedad, con profundidad menor a 50 cm y pastizales con algunos arbustales en las riberas.
- Punto 3: Se encuentra posterior a la Quebrada el Roble. La influencia antrópica viene dada por la presencia de los aportes de vertimientos provenientes de la quebrada, del beneficiadero de la mina, aportes de materiales de las zonas de acumulación del material de desecho rocoso, presa de relave 1 y presa auxiliar 1. El tramo del río posee una pendiente suave, con sustrato arenoso con presencia de gravas y bloques. El agua luce muy turbia con arrastre de material particulado oscuro, una profundidad entre 50 cm y 1m. La vegetación cercana corresponde a pastizales asociados a revegetalización de las presas con presencia de arbustales.
- Punto 4: Este tramo es similar en características al Punto 3. Se encuentra posterior a la presa de relave 2 y 3.
- Punto 5: Este tramo es similar en características al Punto 3. Corresponde al punto agua abajo de la presa de relave 4. Adicional a la intervención antrópica mencionada sobre la cuenca, se presentan aportes de sedimentos procedentes del deterioro erosivo de un costado de las riberas, así como vertimientos que escurren de la presa, la piscina de lodos y aguas servidas.

El muestreo se ejecutó conforme a lo planeado. Las muestras colectadas fueron preservadas en alcohol al 96%, refrigeradas y transportadas cuidando la cadena de frío, para su posterior análisis en laboratorio.



FIGURA 52. COLECTA DE MUESTRAS CON RED SURBER EN RÁPIDOS

Para cada punto de muestreo se tomó registro de características generales: descripción cualitativa del sustrato, contaminación aparente u otro agente externo que influya en el hábitat, diferentes a las asociadas por operaciones de la mina.

La fauna bentónica fue colectada mediante una red Surber de 0,09 m² de área de muestreo y 500 µm de trama de malla. Se realizaron raspados a lo largo de 20 metros por punto, para ello se incluyeron todos los microhábitats observados (rivera vegetada y no vegetada, zonas con depósitos, estancamientos, rápidos, fondos rocosos o con limos, etc.). Todo el material raspado fue combinado en una sola muestra por punto y preservado en alcohol agua y glicerina, y refrigerado para su transporte al laboratorio.

3.7.3. Análisis de resultados de laboratorio

La identificación de ejemplares y abundancias se llevó a cabo en el laboratorio hasta el nivel taxonómico más bajo posible, garantizando al menos llegar hasta Familia, con el fin de determinar calidad ambiental. A partir de las muestras evaluadas se calcularán los parámetros comunitarios abundancia total (ind/m²) y riqueza total (número de taxa) para cada punto de muestreo.

Se estimaron los siguientes índices ecológicos para cada grupo biológico: Índice de diversidad de Shannon, Índice de homogeneidad de Pielou, Índice de dominancia de Simpson y Abundancia relativa y riqueza específica. Estos son comparados mediante test de contrastes de hipótesis y análisis multivariantes teniendo en cuenta factores como puntos de muestreo y parámetros fisicoquímicos.

Finalmente, se estimó la calidad ambiental biótica también conocidos como índices de tolerancia ambiental taxonómica para macroinvertebrados, particularmente el adaptado para Colombia. Estos contemplan el uso de estos bioindicadores de la salud del ecosistema acuático. La presencia o ausencia de un grupo y su abundancia se pondera de acuerdo a la sensibilidad que presenta al factor de perturbación que se quiera valorar. Este índice, sobre la base del tipo de familias presentes en un tramo del río y un puntaje asignado a cada familia en función de su sensibilidad a la contaminación.

Descripción de la estructura y diversidad de la comunidad de macroinvertebrados

Empleando el programa Estimates V7.0 se calcularon las curvas de acumulación de especies basada en 100 iteraciones de los datos, con el fin de eliminar la influencia del orden en el que se adicionaron los muestreos. Para los resultados esperados se utilizaron los estimadores Chao2, ACE y Jackknife. Estos métodos utilizan la frecuencia de especies únicas y especies duplicadas para estimar un número de especies esperado teórico el cual asume un potencial número de especies no detectadas.

Por otra parte, se elaboró una matriz de abundancias (número de individuos en cada familia por punto de muestreo), con la cual en el programa estadístico PAST V3, se estimaron los índices ecológicos de riqueza específica (R), equidad de Pielou (J'), dominancia de Simpson (D') y diversidad de Shannon y Weaver (H').

Finalmente, se estimó la calidad ambiental biótica también conocidos como índices de tolerancia ambiental taxonómica para macroinvertebrados, particularmente el adaptado para Colombia. Estos contemplan el uso de estos bioindicadores de la salud del ecosistema acuático. La presencia o ausencia de un grupo y su abundancia se pondera de acuerdo a la sensibilidad que presenta al factor de perturbación que se quiera valorar.

Este índice, sobre la base del tipo de familias presentes en un tramo del río y un puntaje asignado a cada familia en función de su sensibilidad a la contaminación.

Índices de calidad de aguas basada en macroinvertebrados

- ETP: Los órdenes de insectos Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera, estos tres órdenes son muy vulnerables a la degradación de la calidad del agua.

Composición de macroinvertebrados

Se encontraron 387 individuos m² distribuidos en 14 órdenes y 29 familias (Se observan singletons y doubletons, es decir familias representadas por solo uno o dos individuos, respectivamente (Tabla 2), principalmente en el punto 1 donde se presentó el mayor valor de riqueza y una abundancia 5 veces mayor al resto de los puntos (Tabla 1). Es importante resaltar que esta riqueza y abundancia de macroinvertebrados fue obtenida para el punto de muestreo con “menor impacto físico”.

Tabla 1. Índices de diversidad

| Índices | Puntos | | | | |
|-----------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Riqueza | 18 | 14 | 6 | 14 | 8 |
| Abundancia | 229 | 45 | 46 | 43 | 24 |
| Simpson 1-D | 0,806 | 0,842 | 0,749 | 0,806 | 0,767 |
| Shannon H | 3,00 | 2,23 | 1,51 | 1,06 | 1,71 |
| Equitatividad J | 0,880 | 0,844 | 0,845 | 0,782 | 0,823 |

Tabla 2). La diversidad de familias obtenidas fue moderadamente inferior a los valores esperados teóricos usando los índices Chao 2 (N: 55,3, Eficiencia: 56%), ACE (N: 42.7, Eficiencia: 72,6%) y Jackknife (N:43, Eficiencia: 72,1%), esto es coherente con el esfuerzo muestral realizado para 5 transectos cada uno de 50 metros (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Esto significa que los análisis derivados nos permiten realizar una aproximación adecuada pero que deberá contemplarse en estudios posteriores como el monitoreo un esfuerzo de campo mayor hasta obtener valores observados cercanos a los esperados, es decir con eficiencia superior al 80%. El análisis de similitudes con base en la composición y abundancia de organismos revela 3 principales clases (Figura): menor impacto (Punto 1), (Punto 2) y mayor impacto (Puntos 3, 4 y 5). Estos se encuentran bien soportados, se presentó una variación interclases de un 96,02% frente a un 3,98% intraclases, este resultado se soporta aún más con la prueba de contraste de hipótesis ANOSIM, la cual muestra que los grupos formados tiene un R alto (0,8095) y significativa ($p=0,0204$).

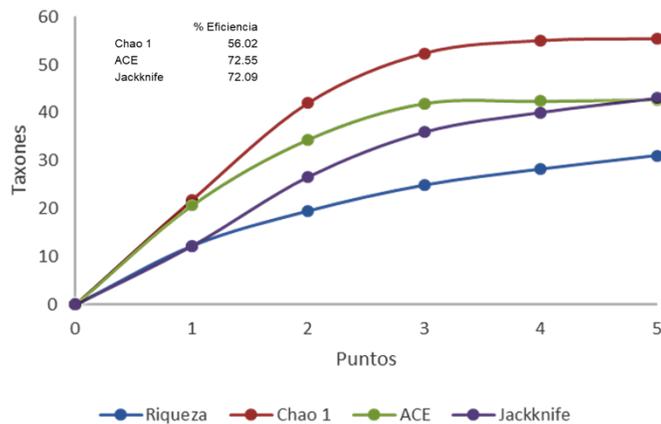


Figura 53. Curva acumulación de taxones basada en familia. Elaboración propia

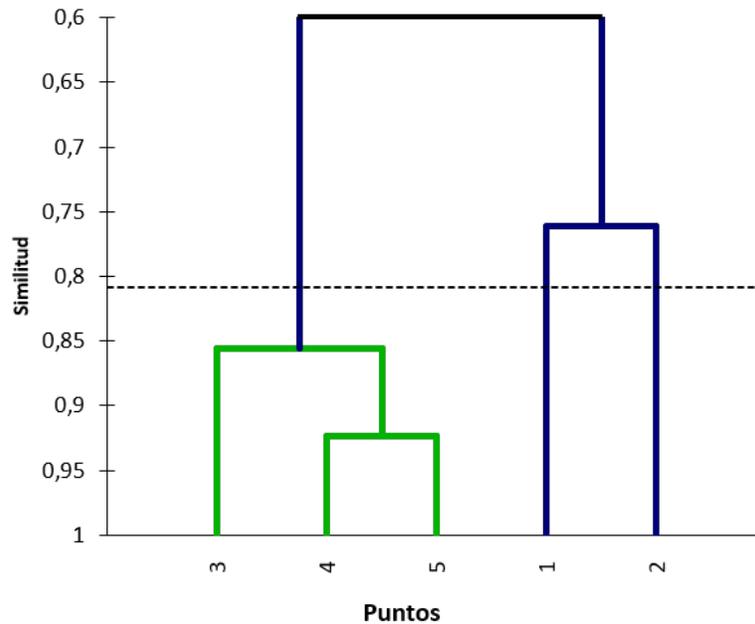


Figura 54. Análisis cuantitativo de similitud empleando el Coeficiente de correlación Pearson para las estaciones de muestreo en el Alto Atrato. Elaboración propia

Se observan singletons y doubletons, es decir familias representadas por solo uno o dos individuos, respectivamente (Tabla 2), principalmente en el punto 1 donde se presentó el mayor valor de riqueza y una abundancia 5 veces mayor al resto de los puntos (Tabla 1). Es importante resaltar que esta riqueza y abundancia de macroinvertebrados fue obtenida para el punto de muestreo con “menor impacto físico”.

Tabla 1. Índices de diversidad

| Índices | Puntos | | | | |
|-----------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Riqueza | 18 | 14 | 6 | 14 | 8 |
| Abundancia | 229 | 45 | 46 | 43 | 24 |
| Simpson 1-D | 0,806 | 0,842 | 0,749 | 0,806 | 0,767 |
| Shannon H | 3,00 | 2,23 | 1,51 | 1,06 | 1,71 |
| Equitatividad J | 0,880 | 0,844 | 0,845 | 0,782 | 0,823 |

Tabla 2. Abundancia y composición de familias por punto muestreado

| Taxa | | | | Punto | | | | | Total general |
|----------------------|-------------|--------------------|-----------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| Phylum | Clase | Orden | Familia | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Annelidae | Hirudinea | Glossiphoniiformes | Psychodidae | | 1 | | | | 1 |
| | Oligochaeta | Clitellata | Tubificidae | | | | 1 | | 1 |
| Arthropoda | Arachnoidea | Acari | Lymnessiidae | 1 | | | | | 1 |
| | Insecta | Coleoptera | Dryopidae | | 2 | | | 1 | 3 |
| Elmidae | | | 24 | 5 | 17 | 15 | 9 | 70 | |
| | | | Gyrinidae | 1 | | | | | 1 |
| | | | Hydrophilidae | | 2 | 9 | 1 | | 12 |
| | | | psephenidae | 1 | 1 | | | | 2 |
| | | | Ptilodactylidae | 1 | 1 | | | | 2 |
| | | | Staphylinidae | | | | 3 | 1 | 4 |
| | | Diptera | Blepharoceridae | 2 | 3 | | | | 5 |
| | | | Chironomidae | 2 | | | 3 | | 5 |
| | | | Psychodidae | | | | | 1 | 1 |
| | | | Simuliidae | | | | 1 | | 1 |
| | | | Tabanidae | 4 | | | | | 4 |
| | | | Tipulidae | | | | 1 | | 1 |
| | | Ephemeroptera | Baetidae | 26 | 4 | | 2 | | 32 |
| | | | Leptophlebiidae | | 2 | | 1 | | 3 |
| | | Hemiptera | Naucoridae | 1 | | | | | 1 |
| | | Himenoptera | Formicidae | | | | 1 | 3 | 4 |
| | | Lepidoptera | Crambridae | 1 | | | 1 | | 2 |
| | | Megaloptera | Corydalidae | 13 | 5 | 6 | 2 | 2 | 28 |
| | | Odonata | Libellulidae | 1 | | | | | 1 |
| | | Plecoptera | Perlidae | 69 | 15 | 11 | 10 | 6 | 111 |
| | | Trichoptera | Glossosomatidae | 5 | | | | | 5 |
| | | | Helicopsychidae | | 1 | 1 | 1 | | 3 |
| | | | Hydrobiosidae | 15 | | | | | 15 |
| | | | Hydropsychidae | 61 | 2 | 2 | | | 65 |
| | | | Leptoceridae | 1 | | | | | 1 |
| | | | Trichoptera NI | | | | | | 1 |
| | | | | | | | | | 1 |
| Coelenterata | Hydrozoa | Hidroida | Hydridae | | 1 | | | | 1 |
| Total general | | | | 229 | 45 | 46 | 43 | 24 | 387 |

Índices de calidad de aguas basados en macroinvertebrados

El índice de diversidad de Shannon-Wiener es uno de los más ampliamente utilizados para examinar las características generales de una comunidad biológica. Esta medida de la diversidad se basa en la teoría de la información; simplemente, la medida del orden (o desorden) dentro de un sistema particular. El índice oscila entre 0 y 5, siendo valores cercanos a 5 posee una mayor diversidad. Esta interpretación debe tomarse con cuidado dado que no necesariamente puede corresponder a especies de un hábitat en buen estado. Este índice debe ir acompañado de otros. Sus resultados han sido correlacionados con la calidad ambiental en diferentes estudios^{50,51,52} que se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de las aguas y su significado ecológico de acuerdo al índice diversidad de Shannon

| Clase | Valor del índice | Condición |
|-------|------------------|--------------------------|
| I | > 4 | Alta calidad |
| II | <4 – 3 | Buena calidad |
| III | <3 – 2 | Moderada calidad |
| IV | <2 – 1 | Contaminada |
| V | < 1 | Fuertemente contaminadas |

Por su parte el índice BMWP-Col (Biological Monitoring Working Party) adaptado a Colombia se crea sobre una línea base de la composición de familias de macroinvertebrados acorde a niveles de contaminación en ríos, por la presencia y ausencia de cada familia se asigna un puntaje. La suma de puntajes por familia proporciona el valor de BMWP, este se divide entre el número de taxones evaluados para obtener un valor entre 0 y 10, valores cercanos a cero indican condiciones graves de contaminación. A pesar de ser recomendado en numerosos documentos institucionales^{53, 54, 55}, varios artículos científicos nacionales cuestionan la necesidad de realizar adaptaciones locales para asegurar su efectividad, inclusive Roldan (2016) quien lo

⁵⁰ Plotka N, Ebrahmi M, Hui Z, Crisosto T, Pajak G, Spychala E. Ecological Status of the Lake Durowskie in Poznan Based on Benthic Macroinvertebrates. Consultado en línea desde la URL [8 Agosto 2017]:

http://restlake.amu.edu.pl/download/archive-2009/Report_Benthic_Macro-invertebrates.pdf

⁵¹ Naturvårdsverket (2007). Bedomningsgrunder för sjoar och vattendrag, bilaga A till handbok 2007:4

Consultado en línea desde la URL [8 Agosto

2017]:<http://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/620-0148-3.pdf>

⁵² Segnini S. 2003. El uso de los macroinvertebrados bentónicos como indicadores de la condición ecológica de los cuerpos de agua corriente. Sociedad Venezolana de Ecología. Ecotropicos 16(2): 45-63

⁵³ IAvH. 2011. Manual de Monitoreo del Agua para el Investigador Local. Instituto de Investigación en Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. Bogotá, Colombia-Arfo Editores e Impresiones Ltda

⁵⁴ IDEAM. 2006. Documento técnico Código TP0413: Macroinvertebrados acuáticos, determinación taxonómica – conteo. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 15p

⁵⁵ IAvH. 2005. Metodología para la utilización de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua. Elaborado por: Luisa Fernanda Álvarez Arango. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

adaptó originalmente para Colombia⁵⁶. La suma de los puntajes de todas las familias proporciona el puntaje total BMWP. El puntaje se encuentra en la Tabla 4.

Tabla 4. Clasificación de las aguas y su significado ecológico de acuerdo al índice BMWP

| Clase | Valor | del | Condición |
|-------|----------|-----|--|
| I | > 150 | | Agua muy limpias |
| | 123- 149 | | Aguas no contaminadas de modo sensible |
| II | 71 – 122 | | Son evidentes algunos efectos de contaminación |
| III | 46 – 70 | | Aguas contaminadas |
| IV | 21 – 45 | | Aguas muy contaminadas |
| V | < 20 | | Aguas fuertemente contaminadas |

El resultado del cálculo de estos 2 índices muestra que el punto 1 el cual se encuentra en el Puente de La Dicha aguas arriba de la influencia de la mina está en buenas condiciones ambientales respecto al resto. El punto 2 cerca a la Quebrada La Calera presenta una calidad moderada con contaminación incipiente. Este fue el único punto donde fue hallado un Oligoqueto de la clase Hirudinea conocido comúnmente como sanguijela, el cual se asocian comúnmente con presencia de materia orgánica⁵⁷, este punto presenta un estanque de patos y ganadería que podría explicar estos aportes orgánicos.

Los metales en aguas naturales tienen un rol importante para las funciones biológicas, sin embargo, pueden ser tóxicos en relación a sus niveles de concentración. En esos casos pueden interferir con los procesos fisiológicos, interrumpir la reproducción, causar alteraciones teratológicas y consecuentemente ocasionar un daño en la estructura y composición de la comunidad biótica⁵⁸. Una vez quedan en formas bio-disponibles, los metales ingresan en la trama trófica al ser absorbidos por organismos bénticos, los cuales son consumidos por taxas mayores como los peces los cuales terminan bioacumulando en sus tejidos estos metales, siguiendo así la cadena trófica que puede ocasionalmente incluir el consumo humano.

Los índices de los puntos 3-4-5 dan señales importantes de contaminación (Tabla 5). Estos se encuentran en inmediaciones de las operaciones de la mina. Entre los principales cambios observados está una drástica reducción de la diversidad desde los puntos 1 y 2 hacia el resto⁹. Se ha documentado ampliamente la sensibilidad de la abundancia y diversidad de invertebrados bénticos con la toxicidad causada por la presencia de metales pesados en el medio, su efecto ha sido evidenciado cuando el fuente de contaminación es puntual o acumulado⁵⁹ e inclusive cuando un proyecto minero

⁵⁶ Roldan-Pérez, G. 2016. Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 40(155):254-274

⁵⁷ Roldán G. 1988. Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia. Fondo Fen Colombia, Colciencias, Universidad de Antioquia, 217p

⁵⁸ Klishko O., Tatyana V. 2014. The assessment of water quality on bioaccumulation of heavy metals in caddis larvae of Rhyacophila (Trichoptera: Rhyacophilidae) in Natural and Antropogenic transformed streams.

⁵⁹ Hideyuki D., Atsushi T., Kikuchi E. 2007. Stream Macroinvertebrate Community Affected by Point-Source Metal Pollution. Internat. Rev. Hydrobiol. 92(3): 258-266

ha finalizado y sido abandonado⁶⁰. Los resultados de la interpretación de los índices de diversidad son consistentes con los resultados del índice BWMP.

Acorde a los análisis fisicoquímicos en el componente de calidad de aguas en este mismo documento, los puntos inmediatamente aguas debajo de la mina El Roble presentaron niveles de zinc, plomo, cromo y arsénico con valores por encima de las referencias permitidas para el uso humano y para la fauna, esto acorde a la Resolución 0631 del 2015 (Tabla 5). Estos se encuentran listados entre los metales pesados porque han sido asociados con potencial eco-toxicidad.

Tabla 5. Compilado de resultados de la interpretación de los índices bióticos y la calidad ambiental del agua. En color resaltado se encuentran los valores que superan los límites permisibles (en mg/L) para consumo humano y doméstico

| Punto | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------|-----------------------|--|---------------------------------|--|------------------------------|
| | 3 | 2,23 | 1,51 | 1,06 | 1,71 |
| Shannon | Buena calidad | Moderada calidad | Contaminada | Muy contaminada | Contaminada |
| | 133 | 96 | 38 | 78 | 46 |
| BWMP | Clase I buena calidad | Clase II Incipientes signos de contaminación | Clase IV Aguas muy contaminadas | Clase II Incipientes signos de contaminación | Clase III Aguas contaminadas |
| Plomo | 0,68 | 0,70 | 0,70 | ND | 0,60 |
| Arsénico | ND | 0,39 | 0,12 | ND | ND |
| Cromo | ND | 0,27 | 0,25 | ND | 0,75 |
| Zinc | 1,00 | 2,69 | 338,00 | ND | 1,91 |
| Sulfatos | 7,92 | 14,44 | 28,11 | ND | 23,40 |
| Magnesio | 1,02 | 1,54 | 172,00 | ND | 1,47 |
| SST | 1,05 | 50,00 | 97,00 | ND | 58,00 |
| pH | 7,04 | 7,18 | 7,21 | ND | 7,13 |
| Conduc. | 83,30 | 113,40 | 147,10 | ND | 138,20 |
| DQO | 10,32 | 4,64 | 23,20 | ND | 2,32 |

Se recomienda incluir el monitoreo periódico de metales pesados y su relación con la hidrobiota. Con un mayor conjunto de datos puede establecerse un análisis de regresión lineal que permita tener estimaciones estadísticas sobre el efecto observado. Adicionalmente, se sugiere complementar los análisis con bioacumulación de metales pesados en tejido de peces, tejido de macroinvertebrados o algunas plantas bioacumuladoras.

⁶⁰Stoyanova T., Traykov I., Yaneva I., Bogoev V. 2012. Accumulation of Heavy Metals in THE Macrozoobenthos of THE Luda River, Bulgaria. Biotechnology & Biotechnological Equipment. 26(3): 2981-2986

4. CONCLUSIONES

- A partir del análisis químico en roca es posible identificar un aumento considerable en la concentración de cobre, hierro, plata, azufre, mercurio, arsénico, antimonio, cadmio, molibdeno y zinc en la zona mineralizada respecto a la abundancia de las mismas especies químicas en la roca aledaña, por esta razón estos elementos deben ser considerados a la hora de realizar el análisis en sedimento fino, ya que importantes valores en dicha matriz bien podrían estar asociados a la remoción y exposición de los materiales mineralizados. De todas formas, siempre deben considerarse los valores promedio que presentan las rocas de la zona a evaluar y que usualmente influyen en la abundancia de especies químicas en el agua.
- De la revisión de los datos en sedimento activo recolectados durante trabajos de prospección mineral es posible identificar que los principales elementos de interés identificados en la matriz de sedimento fino, asociados con la actividad minera en la cuenca del río Atrato, corresponden a cobre y zinc razón por la cual principalmente estos elementos deben ser valorados y comparados respecto a los resultados del análisis químico en sedimento activo para las muestras colectadas en la Fase I. Posteriormente, estos deben ser contrastados respecto a los resultados químicos en agua.
- La contrastación de la cartografía tectónica en diferentes estudios en conjunto con el levantamiento rápido de datos de campo permite inferir un modelo de deformación con predominio de cizalla. No obstante, las consideraciones geotécnicas e hidrogeológicas que se relacionan con el entendimiento de la geología estructural parecen estar ausentes en los estudios ambientales y mineros.
- A partir del análisis multitemporal de fotografías aéreas e imagen satelital de Google Earth, se tiene que la cuenca del río Atrato, así como la microcuenca de la Quebrada El Roble, son altamente susceptibles a presentar movimientos en masa y avenidas torrenciales o avalanchas. Siendo la margen izquierda del río Atrato la más susceptible a presentar movimientos en masa.
- Como evidencia de lo anterior se tienen las huellas de los movimientos en masa (antiguos y recientes), y la presencia de terrazas aluviales de hasta 10 metros de altura como lo es la que fue cubierta por la presa de relaves No 4.
- El impacto geomorfológico generado por la actividad de la Mina El Roble es la disminución del área inundable del río Atrato, debido a la construcción de presas de relaves en dicha zona, por lo que los niveles de inundación en caso de crecidas serán más altos, que los presentados históricamente antes de la construcción de dichas presas.
- De igual forma, la ubicación de las presas de relaves sobre la llanura de inundación del río Atrato, y en la desembocadura de la quebrada El Roble sobre el río Atrato, hace que dichas presas puedan ser consideradas como una nueva fuente de amenaza. En caso de que se presenten nuevas avenidas torrenciales, las presas de relaves serán sometidas a fuerzas debidas al choque de bloques, piedras y agua, que podrían ocasionar su colapso y por ende una emergencia aguas abajo de las mismas.
- Las presas de relave como estructuras que contienen materiales que son potencialmente contaminantes deben estar diseñadas y construidas bajo las más altas especificaciones.

- Debido a que el mayor número de fallas en este tipo de presas se presentan durante la construcción u operación, la vigilancia constante de la autoridad ambiental encargada y el monitoreo continuo del comportamiento estructural de las presas es de vital importancia.
- Las presas se encuentran sobre la cuenca alta del río Atrato. El régimen de torrencialidad de la cuenca, la susceptibilidad de las laderas a movimientos en masa, las fuertes lluvias y la alta recurrencia de eventos sísmicos, hacen a las presas estructuras vulnerables y como tal deben tener las obras que permitan la mitigación de los riesgos asociados a la amenaza latente y a la vulnerabilidad ya mencionada.
- Debido a las evidencias de fallas estructurales en las presas y de que ya se han generado eventos de inestabilidad que las han afectado. Se recomienda que se realice un análisis detallado de vulnerabilidad física de las presas frente a eventos torrenciales.
- Dicho estudio deberá modelar las crecientes del río y la eventualidad de avenidas torrenciales que puedan socavar la base de las presas. El estudio también deberá tener el plan de manejo de dichos procesos y las obras proyectadas para su control.
- Ya que aguas abajo de los cuerpos de presa se encuentra la población El Siete y ya que éste, se ha visto afectado por avenidas torrenciales e inundaciones, se considera pertinente que se generen los planes de respuesta frente a la falla de las presas de relave. Dicho análisis deberá contener los planes tras un represamiento del cauce y una falla súbita de la presa natural formada, delimitando las áreas seguras en los pueblos afectados. Se deben cumplir los requerimientos del Decreto 1807 de 2014 para insertar las consideraciones de riesgo en el ordenamiento territorial de Carmen de Atrato y de otras poblaciones ubicadas aguas abajo.
- Con base en las suposiciones y metodología aplicada para la separación de flujo base, no se puede afirmar que exista un impacto sobre el agua subterránea asociado a la actividad minera. Sin embargo, es pertinente dejar claramente planteadas incertidumbres asociadas a la falta de pruebas hidrogeoquímicas, al desconocimiento hidrológico de la cuenca del río El Carmen respecto a la precipitación y cuantificación del flujo base, y asociadas a la deficiencia en la instrumentación hidrometeorológica.
- Para la separación de flujo con base en registros de caudales, se recomienda la aplicación de filtros con base física como los propuestos por Birtles, 1978⁶¹ y Furey & Gupta, 2001⁶², siendo esta última metodología la más adecuada considerando la topografía de la zona de estudio. Esta herramienta se configura como una buena alternativa para realizar la separación de flujo base dado que estos filtros contemplan una base física consistente.
- Para aumentar una mayor comprensión del hidrosistema de la cuenca del río El Carmen, se recomienda la caracterización hidrogeoquímica (pruebas con trazadores e isótopos ambientales) de las aguas, sumado a ello, se recomienda el acoplamiento del modelo hidrogeológico para determinar las salidas del sistema hidrogeológico.

⁶¹ Ibíd

⁶² Ibíd

- La calidad del agua del río Atrato y la quebrada El Roble se ha visto afectada por las actividades relacionadas con la actividad extractiva y de beneficio de la mina El Roble. A partir de información suministrada por Codechocó, por Atico Mining Corporation (Miner S.A) y la generada en el presente estudio, se han identificado incrementos significativos en parámetros como la conductividad, contenido de sólidos, concentración de sulfatos y concentración de metales pesados y metaloides (zinc, cromo, plomo y arsénico) en el río Atrato aguas abajo de la mina y en el área intervenida de la quebrada El Roble. Por el contrario, el pH se mantiene cercano a la neutralidad con tendencia a la alcalinidad a lo largo del trayecto evaluado, a excepción de unos valores anómalamente alcalinos para el año 2013 en información de Atico Mining Corporation (Miner S.A).
- El análisis documental del componente biótico (hidrobiota) revela la ausencia de información asociada al PMA del año 2002 y 2016, así como en estudios de caracterización, en informes técnicos y reportes de visitas realizadas por diferentes autoridades mineras y ambientales. Esto dificulta establecer el efecto del proyecto a la salud del ecosistema acuático. Se recomienda obtener la información relacionada para poder tener un escenario completo de impactos y poder así diseñar metodologías para su monitoreo, mitigación y manejo.
- La hidrobiota presentó una disminución drástica de la composición y abundancia entre el punto de control negativo (Puente La Dicha) en relación a los puntos localizados en y después de la zona de presas de relaves. Acorde a tablas de referencia para interpretación de nivel ecológico, los bajos niveles de diversidad observados se asocian comúnmente con aguas contaminadas. Esta conclusión es soportada con el índice BMWP y son coherentes con los resultados fisicoquímicos en el análisis de calidad de agua.