

# Geoindicadores aplicados al estudio de los efectos ambientales de la explotación de oro aluvial en la cuenca baja del río Quito, Chocó (Colombia)

*Geoindicators applied to the study of environmental effects of alluvial gold exploitation in the lower Quito river basin, Choco (Colombia)*

Sergio Gaviria<sup>a, c</sup>, Jennifer Angel-Amaya<sup>b</sup>

## RESUMEN

Se realizó la formulación y evaluación preliminar de geoindicadores físicos, químicos y mineralógicos en la cuenca del río Quito, localizada en el Chocó Biogeográfico, una de las regiones más húmedas y biodiversas del planeta. El objeto del estudio consistió en reconocer los cambios inducidos por la minería ilegal de oro de aluvión sobre el medio natural, por medio de la caracterización de sedimentos, suelos y aguas. Los minerales y los productos de meteorización, que se liberan junto con el oro durante la extracción, podrían actuar como vehículos para el transporte de metales potencialmente tóxicos, entre ellos el mercurio, en el medio acuoso. En este trabajo se identificaron los minerales que componen los sedimentos activos, los suelos y los materiales en suspensión en las zonas afectadas por minería ilegal de oro, base para entender la movilidad de los metales en el sistema hidrológico. Las actividades extractivas afectan los suelos y sedimentos en las terrazas aluviales, generando erosión y aumento del transporte de sedimentos; modificando el funcionamiento del sistema hídrico, abatiendo el nivel freático y en consecuencia generando nuevas zonas de oxidación que aumentan la intensidad de la alteración, tanto de los minerales primarios como de las arcillas, disminuyendo la cristalinidad de las últimas. En este proceso se liberan hierro y aluminio, y en menor proporción sulfatos y metales. El aumento en la acidez en el medio acuoso produce agregación de coloides en los suelos y floculación de arcillas, que forman pseudo-partículas de tamaño limo. Los cambios inducidos por la actividad extractiva se observan tanto en cortos periodos, como años después del cese de la intervención extractiva, sin embargo, factores como la alta pluviosidad pueden diluir los efectos químicos y dificultar su detección. Se plantea el empleo de geoindicadores para el monitoreo de los procesos fisicoquímicos en aguas y sólidos suspendidos que viajan por el río como consecuencia de la extracción de oro aluvial. La meta es que los resultados del monitoreo, a mediano plazo, sirvan de base para proponer medidas de prevención y de mitigación de los impactos ambientales entendiendo la dinámica geoquímica natural de estos geoecosistemas, con la imposición de los efectos de las actividades extractivas.

**PALABRAS CLAVE:** minería de oro aluvial; meteorización; caracterización geoambiental; impacto ambiental.

## ABSTRACT

A preliminary geoindicators assessment was carried out in the Quito river basin located in the Choco biogeographic region, one of the most humid and biodiverse regions on the planet. The purpose of this study was to recognize the changes induced by illegal alluvial gold mining on the natural environment, through the characterization of sediment, soil and water samples. Minerals and weathering products, which are released along with gold during mining, could act as vehicles for the transport of potentially toxic metals, including mercury, in the aqueous medium. In this work, active sediments, soils and suspended solids in gold mining impacted areas were identified, as a basis for understanding the mobility of metals in the hydrological system. The mining activities affect soils and sediments in the alluvial terraces, generating erosion, and increasing sediment transport; modifying the functioning of the water system, lowering the water table and consequently exposing new oxidation zones that increase the intensity of the alteration, both of primary minerals and clays, reducing their crystallinity. In this process iron and aluminum are released, as well as sulfates and metals in a minor proportion. The increase in the acidity produces aggregation of colloids in the soils and flocculation of clays, which form pseudo silt-sized particles. The changes induced by mining are observed both in short periods and years after the ending of the intervention, however, factors such as high pluviosity can dilute their chemical effects and hinder their detection. The use of geoindicators is proposed for monitoring the physicochemical processes in soils, waters and suspended solids that travel through the river as a consequence of illegal alluvial gold mining. Their monitoring aims to provide a basis for prevention and mitigation the adverse effects, understanding the natural geochemical dynamic of these geo-ecosystems, with the superimposition of the mining effects.

**KEY WORDS:** alluvial gold mining; weathering; geoenvironmental characterization; environmental impact.

a Consultor independiente, Bogotá, Colombia. ORCID Gaviria, S.: 0000-0003-0751-7419

b Corporación Geopatrimonio, Bogotá, Colombia. ORCID Angel-Amaya, J.: 0000-0002-7925-7444

c Autor de correspondencia: [sergiogaviriame@gmail.com](mailto:sergiogaviriame@gmail.com)

Recepción: 04 de junio de 2019. Aceptación: 29 de noviembre de 2019

## Introducción

Colombia posee una larga tradición aurífera que remonta a tiempos precolombinos (Campuzano, 1993). Esta actividad se ha realizado durante siglos con extracción de oro de aluvión por la técnica tradicional de concentración en batea a lo largo de muchos ríos del occidente colombiano (Poveda, 2002). Sin embargo, en las últimas décadas la actividad se ha incrementado de manera exponencial en los departamentos de Chocó y Antioquia con la llegada de retroexcavadoras y dragas de alta capacidad y con el uso indiscriminado de mercurio para la recuperación del metal precioso presente en las fracciones finas de los sedimentos (Ángel-Amaya et. al., 2019). Para el año 2014, se reportaron 78.939 ha con evidencias de explotación de oro de aluvión (EVOA) con maquinaria en tierra en 17 de los 32 departamentos del país y el 79% están ubicadas en los departamentos de Antioquia y Chocó (UNODC, 2016). Entre 2014 y 2016, se encontraron 83.620 ha y la explotación de oro de aluvión no ha cesado de extenderse; en 2018 llegó a 92.046 ha activas y para 2019 se calculan alrededor de 98.000 ha (UNODC, 2018).

Los impactos ambientales y sociales ligados a la extracción ilegal de oro de aluvión han sido puestos en evidencia en estudios con imágenes de satélite que muestran las huellas profundas de destrucción del medio natural en los cauces y en los valles aluviales de muchos ríos del país (UNODC, 2016, 2018), entre los impactos que causa la minería sobre el medio natural se pueden destacar los siguientes: pérdida de la cobertura vegetal, destrucción directa de suelos, erosión, alteración de la topografía, emplazamiento de escombreras, alteración del nivel freático, sedimentación de cauces, aporte de contaminantes químicos a sedimentos, suelos y aguas, entre otros (Valencia, 2002). Los anteriores impactos se pensaban para la minería aurífera subterránea para la elaboración de indicadores de sustentabilidad, pero se pueden aplicar a la minería aluvial con las especificidades que da una explotación a cielo abierto (Valencia, 2002).

En 2012, Fedesarrollo realizó el levantamiento de la línea base sobre minería informal de oro en los departamentos con mayor producción aurífera y mayores niveles de informalidad. El 93,6% de las 2.959 unidades de producción minera de oro muestreadas

en ese estudio eran informales. “La “minería informal” hace referencia a aquella actividad de extracción que se lleva a cabo sin tener un título minero debidamente registrado en Catastro Minero. Este tipo de minería puede incluir la minería artesanal, tradicional, ocasional, de subsistencia, a pequeña y mediana escala, sin títulos mineros, pero no se debe confundir con la minería criminal vinculada a grupos al margen de la ley o al financiamiento de actividades ilícitas” (Goñi et al., 2014, p. 6). Sin embargo, en Antioquia y Chocó donde la mayoría de la actividad es aluvial, el 20% de las explotaciones utilizaban ya maquinaria pesada (retroexcavadoras y dragas).

En 2014 el 60% de las EVOA de todo el país no contaban con ninguna figura de explotación autorizada por la ley, el 20% estaba amparado con títulos sin licencia y solamente el 2% contaba con título y licencia ambiental (UNODC, 2016). En 2016 la explotación ilegal aumentó al 66%, aunque el número de explotaciones con Licencia Ambiental pasó del 2 a 7%, principalmente en la escala de explotaciones familiares (UNODC, 2018).

Una de las regiones más afectadas por la explotación de oro aluvial es la región Pacífica. Durante el periodo 2001 solo se encontraron en EVOA 637 ha mientras que para el 2014 se determinaron 40.839 ha, la mayor aceleración fue entre 2011 y 2014 con expansión de 120 veces (35.431 ha) debido a la llegada masiva de retroexcavadoras y dragas, período que coincide al incremento acelerado del precio de oro (UNODC, 2016).

La problemática generada por los recientes mineros foráneos al desplazar las prácticas artesanales por la explotación mecanizada, ejercen mayor presión de transformación en comparación a los pobladores originales sobre el territorio (UNODC, 2016). Para la población local que se dedicaba a la pequeña minería tradicional las técnicas no solo son adecuadas para la recuperación de oro sino a su vez contribuyen en reducir los daños a la salud de quién la realiza y no causan impactos graves en el medio ambiente (IPBES, 2019). Se ha demostrado que la ilegalidad está muchas veces asociada a la presencia de bandas criminales, lo que genera impactos en el tejido social de la población por el conflicto armado y la proliferación de cultivos ilícitos. La relación entre EVOA

y los cultivos de coca para 2014 fue 38 y 42% para 2016 (UNOCD, 2016, 2018).

La cuenca del río Quito sobresale al presentar la mayor expansión del fenómeno y porque representaba el 30% de la EVOA en la región para el 2014. En efecto, el río Quito, afluente que desemboca en el río Atrato frente a Quibdó, es uno de los lugares con mayor grado de intervención antrópica derivada de la actividad minera. En los últimos 30 años ha sufrido un efecto devastador que se inició con la deforestación progresiva de las terrazas aluviales, la remoción de suelos y excavación o dragado de los depósitos de sedimentos en las terrazas y en el fondo del río (Angel-Amaya et al., 2019). Se han abierto extensas superficies que conforman pozos de agua de diferentes coloraciones en donde antes existía selva, alterando el cauce natural y el conjunto del paisaje aluvial. El incremento de las áreas afectadas es enorme, pasando de 109 ha en 2001 a 12.137 ha en 2014 (UNODC, 2016), tendencia que continúa hasta la actualidad.

La mayor parte de las investigaciones se han enfocado en estudiar el efecto contaminante sobre el medio biótico y la salud humana del mercurio, elemento necesario en el proceso de amalgama *in situ* para la recuperación del oro. Esta práctica ha sido común en muchas partes del mundo, pero su aplicación ha tenido especial impacto en las regiones auríferas tropicales del mundo en las últimas décadas. Numerosos estudios han profundizado en la contaminación en aguas, suelos y sedimentos, el papel de los factores hidrológicos en el transporte de mercurio en ríos, lagos y en cultivos regados por aguas contaminadas, la bioacumulación en peces y seres humanos (Ramírez et al., 2002; Campbell et al., 2003; Ikimgura et al., 2006; Appleton et al., 2006; Álvarez et al., 2011; Diringer et al., 2015).

Las investigaciones se han centrado en la especiación del mercurio en ecosistemas acuáticos del norte de Colombia, sometidos a intensa actividad de extracción de oro y el efecto de la bioacumulación en peces y personas (Marrugo et al., 2008; Marrugo et al., 2015; Pinedo-Hernández et al., 2015). La Universidad de Cartagena evaluó la contaminación por mercurio en diversas matrices a lo largo del río Atrato, Chocó (Olivero, 2016). “Los esfuerzos investigativos se han centrado en evaluar los niveles de

mercurio en la biota acuática, en sedimentos, plantas y seres humanos en algunas zonas de Colombia. No se encontró suficiente información en revistas científicas de alto impacto que presenten datos sobre la determinación de metales pesados y su movilidad, cambio en parámetros fisicoquímicos como sólidos totales solubles, color, turbidez, oxígeno disuelto” (IP-BES, 2019, p. 37). De igual manera, no se encontró información sobre la utilización del componente mineralógico de suelos y sedimentos en la evaluación del impacto ambiental de la minería de oro aluvial.

Poco se conoce sobre los minerales involucrados junto a los procesos geoquímicos asociados a la extracción del oro aluvial. Es por ello, que se aportan nuevas evidencias sobre los impactos ambientales que genera la extracción de oro de aluvión, que afecta grandes territorios y comunidades. Con la ratificación del Convenio de Minamata para la eliminación del uso del mercurio en 2019, y la sentencia T-622 de la Corte Constitucional (2016)<sup>1</sup>, cobra relevancia la evaluación de impactos geoambientales en la actividad extractiva de oro aluvial.

En este contexto, la evaluación de geoindicadores descritos en magnitudes, frecuencias, tasas o tendencias de procesos geológicos y fenómenos que ocurren en la superficie, o cerca de la superficie terrestre, con o sin intervención humana, son importantes para el monitoreo y la evaluación de cambios ambientales entre periodos cortos (100 años o menos) (Berger, 1997; Berger, 1998; Berger, 2002). Algunos de estos procesos pueden afectar la salud humana, como es el caso de los incrementos de erosión y transporte de sedimentos, que pueden liberar elementos tóxicos depositados anteriormente; y cambios en la calidad de aguas subterráneas y superficiales a consecuencia de la deforestación, la contaminación, desviación de cauces y la minería (Skinner y Berger, 2003). Los geoindicadores obtenidos permiten medir el grado de deterioro que genera la minería informal de oro aluvial en el río Quito. Para lograr una cuantificación que contribuya a la evaluación del impacto ambiental, es indispensable analizar y monitorear continuamente a futuro, los efectos del avance de la actividad extractiva sobre los suelos, sedimentos y aguas, a la

1 La Sentencia reconoce al río Atrato como sujeto de derechos, con miras a garantizar su conservación y protección.

par de sistemas de información geográfica a un nivel macro (UNODC, 2016).

### Aspectos geológicos

El área de estudio está ubicada en el valle de los ríos Quito y Atrato, limitado entre la Cordillera Occidental al oriente y la Serranía del Baudó al occidente, no superan los 500 msnm (IGAC, 2011). La fisiografía del valle está representada por llanuras de planicie aluvial de 10 km de ancho en promedio, conformada por aluviones recientes y terrazas de los ríos Quito y Atrato, con relieve de plano bajo a moderadamente ondulado, con alturas que no sobrepasan 50 msnm, y que corresponden a zonas de inundación y formación de pantanos (INGEOMINAS, 2003).

La cuenca del río Atrato corresponde a una estructura sinclinal amplia de aproximadamente 30 km de ancho (INGEOMINAS, 2003) y alargada en dirección N a NW, que contiene un relleno sedimentario de gran espesor, estimado en más de 4.000

m en el intervalo Oligoceno-Plioceno (Duque-Caro, 1990 citado en INGEOMINAS, 2003). El núcleo está compuesto por depósitos cuaternarios y hacia los flancos afloran las Formaciones Sierra y Quibdó. Esta estructura sinclinal presenta poca deformación tectónica (IGAC y INGEOMINAS, 2001) y el eje se ubica paralelo entre los ríos Atrato y Quito, cubierto por los depósitos aluviales recientes (INGEOMINAS, 2003) (Figura 1).

Las Formaciones Sierra (n5n6-Sm) y Quibdó (N2-Sc) afloran en los bordes del valle, mientras que los depósitos cuaternarios corresponden a terrazas (Q-t) y aluviones recientes (Q-al) que rellenan la cuenca (SGC, 2015). Composicionalmente, la unidad n5n6-Sm con 1.550 m de espesor y de edad Mioce-no medio (Haffer, 1967, citado por INGEOMINAS, 2003), contiene areniscas de grano fino, lodolitas y areniscas grises localmente con niveles de conglomerados, atribuidas a un ambiente de depósito marino que varía de plataforma somera, hasta condiciones intermedias entre frente de playa y plataforma (IGAC

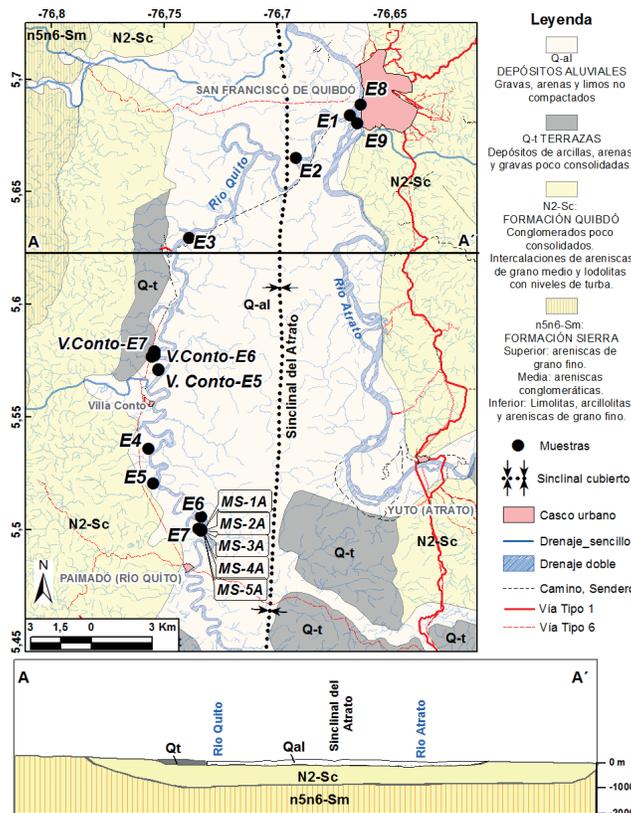


Figura 1. Mapa geológico de la cuenca del río Quito-Atrato, sector Paimadó-Quibdó, con la localización de las muestras colectadas (Tabla 1). La sección geológica representa la estructura sinclinal de la Cuenca del río Atrato. Fuente: modificada de INGEOMINAS (2003) y SGC (2015)

y INGEOMINAS, 2001). En contacto discordante suprayace la unidad N2-Sc, de edad Mioceno tardío - Plioceno y un espesor de 936 m (INGEOMINAS, 2003), compuesta predominantemente por arcillolitas masivas de color gris azulado e intercalaciones de arenitas de grano medio y conglomerados depositados en un ambiente continental de alta energía, indicando el inicio de la sedimentación fluvial en la cuenca del Atrato (IGAC y INGEOMINAS, 2001; INGEOMINAS, 2003). Los depósitos más recientes forman aluviones, playas, y terrazas adyacentes a los ríos Atrato y Quito, con un ancho de 15 km de este a oeste (Figura 1). La unidad de depósitos de terraza (Q-t) posee una composición polimíctica con granulometría variable desde limo-arenosa con materia orgánica, poco consolidada, a predominantemente más gruesa hacia el piedemonte, en una matriz de arena, limo y arcilla (IGAC y INGEOMINAS, 2001), y con alto contenido de metales preciosos, hasta 735 ppm de oro y 72 ppm de plata (INGEOMINAS, 2003). Se han identificado hasta 3 niveles de 1-3, 3-5 y 20 m de altura, respectivamente (James y Bermúdez, 1992, citado por INGEOMINAS, 2003). La terraza más antigua, fue depositada discordantemente sobre la Formación Quibdó, presenta a la base gravas en matriz arenosa, arcillas de color gris con restos de troncos, limos y finalmente 0,5 m de un horizonte orgánico. El segundo nivel está conformado a la base por gravas en matriz arenosa, seguida por turba con troncos de árboles, luego gravas y en el tope limos de color amarillo. La terraza superior, está compuesta por limos y arenas con abundante materia orgánica y está cubierta por vegetación. Finalmente, los Depósitos Aluviales Cuaternarios (Q-al) están localizados en las riberas de los ríos Atrato y Quito y están conformados por gravas, arenas y limos no compactados (INGEOMINAS, 2003) de composición variable de rocas ígneas intrusivas y volcánicas (IGAC, 2011). La mayor parte del material que se beneficia para la extracción de oro está compuesto de guijarros en matriz arenosa pobremente seleccionada; estos conforman cerca del 70% del depósito, y consisten en dioritas, gabros, basaltos, andesitas, pórfidos andesíticos, chert, cuarzo lechoso y esporádicamente se encuentran piroxenos (Ángel-Amaya et al., 2019). Estas áreas están sujetas a inundaciones por constituir zonas bajas que se usan para cultivo.

Los suelos que se desarrollan en los paisajes de valle y planicie aluvial contienen predominante cuarzo (12-55%) y caolinita (35-57%) tanto en la fracción arena como en la fracción arcilla. En la fracción arena se presentan minerales como feldespato (9%), anfíbol (9%), piroxeno (3%), biotita (trazas), y epidota (12%); mientras que en la fracción arcilla también se encuentran trazas (<5%) de vermiculita, interestratificados, hidrómicas, micas, amorfos y cloritas, que permiten catalogar al suelo como de fertilidad buena a baja, por los nutrientes que aportan estos minerales al descomponerse (IGAC, 2011).

## **Materiales y métodos**

La zona de estudio corresponde al cauce y terrazas aluviales del río Quito en la parte baja de la cuenca, aguas abajo del sector de mayor actividad de extracción de oro aluvial que corresponde a la zona donde se han hallado las mayores áreas de EVOA en la región del Pacífico (UNODC, 2016).

El muestreo se desarrolló el 27 de septiembre de 2017 durante un recorrido en lancha de 30 km a lo largo del río desde Paimadó hasta su desembocadura en el río Atrato, a la altura de Quibdó. Se colectaron muestras de suelos, sedimentos y aguas con el fin de investigar algunos parámetros físicos, químicos y mineralógicos que sirvieran como geoindicadores de la actividad de extracción de oro aluvial de la región. Las áreas de bosques y terrazas afectadas, así como transporte de sedimentos por los ríos, han sido ubicados con herramientas de percepción remota (UNODC, 2016).

Por otro lado, el Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico-IIAP publicó el protocolo general para la restauración ecológica de áreas de minería en el Chocó colombiano, con información del estado ambiental del valle aluvial y el sistema hídrico (IIAP, 2012), sin embargo, los datos de análisis de aguas y suelos son muy limitados.

## **Materiales**

A través de evidencias físicas en el cambio de paisaje (observación directa): desaparición de coberturas de bosques y suelos, destrucción de terrazas aledañas al río con maquinaria en tierra, destrucción

del cauce del río y del valle aluvial donde se forman pozos y lagunas por el avance de las dragas aguas afuera, se constató con la recolección y cuantificación del material particulado, el transporte de la suspensión de material removido por minería a lo largo del río Quito y se contrastó con el río Atrato aguas arriba de Quibdó, antes de la desembocadura del primero.

Se siguieron los protocolos de Palacios et al. (2018) para el muestreo de aguas, suelos y sedimentos, con el propósito de determinar parámetros físico-químicos y de material sólido en la caracterización física, química y mineralógica como base de interpretación sobre el funcionamiento del medio

físico, en su estado natural y con afectación minera (Tabla 1).

Se tomaron en el centro del cauce del río, nueve muestras de aguas superficiales de 1 L con carga de sólidos en suspensión en frascos de polietileno utilizando guantes de nitrilo. Las muestras se recolectaron aproximadamente cada 5 km entre el caserío de Paimadó y la desembocadura del río Quito en el río Atrato frente a Quibdó (Tabla 1, códigos E1 a E9). Aguas arriba del primer punto de muestreo, la extracción de oro aluvial ha sido muy activa con el uso de retroexcavadoras y dragas por cuenta de la minería ilegal. Las muestras fueron almacenadas en hielo y transportadas al laboratorio.

**Tabla 1.** Muestreo de suelos, sedimentos y aguas en la cuenca del río Quito (Colombia)

Código	Sector	Latitud	Longitud	Tipo	Descripción
E1	La Soledad	5,684	-76,668	Agua	Desembocadura río Quito
E2	Loma Los Gamboa	5,665	-76,691	Agua	Agua incolora
E3	San Isidro	5,629	-76,739	Agua	Perfil de banca: nivel del río a -3 m del nivel máximo, terraza de cultivo, arcillas grises con color ocre
E4	Villa Conto	5,536	-76,757	Agua	Agua incolora
E5	Villa Conto	5,52	-76,755	Agua	Agua incolora
E6	Paimadó	5,505	-76,733	Agua	Agua incolora
E7	Paimadó	5,5	-76,735	Agua	Agua incolora
E8	Río Atrato	5,689	-76,663	Agua	Agua incolora. Frente al malecón – Quibdó
E9	Río Atrato	5,681	-76,664	Agua	Agua incolora. Brazo del río Atrato, aguas arriba río Quibdó
MS-1A	Paimadó	5,499	-76,734	Suelo	Botadero de minería, gravas arenosas
MS-2A		5,499	-76,734	Suelo	Botadero de minería, Sedimento Arenoso-franco
MS-3A		5,5	-76,733	Suelo	Botadero de minería, gravas arenosas
MS-4A		5,5	-76,733	Suelo	Botadero de minería, sedimento Arenoso-franco
MS-5A		5,5	-76,733	Suelo	Botadero de minería, gravas arenosas
V.Conto-E5	Villa Conto	5,571	-76,753	Sedim.	Acumulación de sedimento franco-limoso de lavado terraza
V.Conto-E6		5,577	-76,754	Suelo	Perfil de suelo Franco Arcillo-Arenoso, color 7,5R5/8 strong brown. Suprayace un nivel de óxidos de hierro, color gris
V.Conto-E7		5,577	-76,754	Suelo	Perfil de suelo franco, color 10YR5/8 yellowish brown dark. Suprayace un conglomerado clasto soportado color 10R4/8 Red

Fuente: Elaboración propia

Al momento del muestreo fue constatado que desde Paimadó disminuyó progresivamente la extracción de oro aluvial, hasta desaparecer aguas abajo en Villa Conto, desembocadura en Quibdó. A la margen izquierda del río Quito, sector de Villa Conto, se colectaron dos muestras de suelo “*in situ*” en el perfil de la Figura 2 (V.Conto-E6 y V.Conto-E7), y una muestra de sedimentos (V.Conto-E5). Esta zona de explotación se encuentra inactiva desde hace 7 años y en proceso de restauración con siembra de especies vegetales en el marco del programa “Oro Legal” financiado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo – USAID (2016).

En el sector de Paimadó se obtuvieron cinco muestras de sedimentos (MS1A - MS5A) de 1 kg, en un transecto de 100 m sobre los depósitos aluviales de la margen derecha, a distancias regulares desde el borde del río, en la zona de explotación reciente, hasta la zona destruida por dragas. Esta franja es inundable por las aguas del río formando pozos (Figura 3). La observación y análisis del medio sin intervención e



**Figura 2.** Perfil de suelo en Villa Conto desarrollado en una terraza que ha sido intervenida para la extracción de oro, mediante “lavado” con agua a alta presión. Fuente: J. Ángel-Amaya, 2017.



**Figura 3.** Vista general de las terrazas destruidas del río Quito en el sector de Paimadó, las escombreras de minería fueron muestreadas en un transecto de 100 m. Fuente: J. Ángel-Amaya, 2017.

intervenido, ayudó a reconocer geoindicadores para la evaluación del estado actual del sistema afectado por la extracción de oro aluvial en tramo del río Quito.

## Métodos

Los geoindicadores físicos tienen que ver con el estado de las coberturas boscosas, los suelos y sedimentos de las terrazas; la erosión y el transporte de sedimentos en suspensión por el sistema de drenaje (UNODC, 2016). Los geoindicadores químicos se refieren a la calidad del agua y la liberación de iones por meteorización de los suelos; los geoindicadores mineralógicos permiten reconocer los procesos de alteración de minerales en suelos y sedimentos en su estado natural y por modificaciones debido a la actividad antrópica, siguiendo los protocolos de los estudios de impacto ambiental de la minería (Valencia, 2002; IIAP, 2012).

Análisis de mercurio en las diferentes matrices, fueron realizados por el grupo de eco-toxicología de la Universidad de Cartagena en el marco del proyecto WWF y Corporación Geopatrimonio (2018). En esta etapa no se abordó el estudio de metales pesados, pero se hizo una aproximación indirecta con los indicadores de calidad de aguas y de materiales sólidos. Las matrices colectadas fueron analizadas en el laboratorio por diferentes técnicas de caracterización físico-química, particulares para suelos, sedimentos y aguas.

## Suelos y sedimentos

Las especies microcristalinas como arcillas y productos amorfos derivados de las rocas por meteorización poseen alta reactividad físico-química (Mc Bride, 1989; Velde y Meunier, 2008) y en este caso, la selección de la fracción fina para análisis, corresponde con y en este caso, la selección de la fracción fina para análisis, corresponde con el mayor constituyente de las muestras. Estos materiales finos se han acumulado junto con fragmentos de roca tamaño grava y arena, formando terrazas de materiales detríticos durante los procesos morfo-dinámicos que han modelado las cuencas hidrográficas. En la actualidad, los materiales son arrastrados por la energía de las corrientes en forma de sedimentos de fondo que se fraccionan por tamaño de grano, mientras que las partículas más finas son transportadas como sólidos en suspensión en las aguas corrientes, lejos de las fuentes de origen.

### Caracterización por difracción de rayos X (DRX).

La caracterización estructural de los minerales arcillosos brinda información sobre fuentes y procesos geoquímicos ligados a la formación de la roca y a los procesos de meteorización en las cuencas hidrográficas (Velde y Meunier, 2008). El análisis mineralógico de muestra sólida se realizó sobre los sedimentos activos ( $<75 \mu\text{m}$ ) en los que abundan fragmentos muy pequeños de minerales heredados de las rocas junto con productos de meteorización como arcillas u óxidos, utilizando la técnica de Difracción de Rayos X (DRX) en agregado no orientado (Moore y Reynolds, 1997). Los sólidos en suspensión se recuperaron de las aguas por filtración y centrifugación y se analizaron por aparte. El análisis DRX de la fracción arcilla ( $<2 \mu\text{m}$ ) se realizó en muestras preparadas en lámina orientada con tres tratamientos: en estado natural (N), sometida a solvatación con etilenglicol y calentada a  $500^\circ\text{C}$  (500). Estos análisis ayudan a reconocer el complejo de alteración que acompaña a los minerales detríticos, que incluye, además de las arcillas, los óxidos de hierro y aluminio que contribuyen en el transporte de metales asociados con los sedimentos (Thorez, 1976; Moore y Reynolds, 1997). La cristalinidad de las arcillas se mide por el ancho del pico a la altura media (FWHM, por las siglas en inglés) que se traduce a los índices normalizados para clorita (IC), illita (IK) y caolinita (ICC) calculados a partir de la identificación de las señales

superpuestas en los difractogramas, por deconvolución de los picos. Se clasifican *grosso modo* los minerales arcillosos entre bien cristalizados, cuando los picos son agudos (índices  $<0,35$ ) y mal cristalizados, cuando los picos son anchos (índices  $>0,35$ ) (Warr y Rice, 1994; Bonilla et al., 2011).

**Análisis químicos.** Algunos ensayos de extracción selectiva de Si, Al y Fe con el reactivo ácido oxálico – oxalato de amonio a pH 3 (reactivo Tamm) sobre una muestra de suelos y otra de sedimentos de las terrazas del río Quito en las zonas de explotación minera (IGAC, 2006), dan información sobre la presencia de fases amorfas de interés en el transporte de metales y en el comportamiento de los sólidos suspendidos respecto a su capacidad de transporte en las corrientes hídricas.

**Análisis granulométricos.** El análisis granulométrico se realizó sobre cuatro muestras de sólidos suspendidos recuperados de las aguas, por la técnica de difracción láser que mide las distribuciones de tamaño de partícula a partir de la variación angular de la intensidad de la luz dispersada cuando un rayo láser pasa a través de una muestra de partículas dispersas. Se aplica a los sólidos en suspensión que produce la actividad minera en el río Quito y se compara con los que viajan por el río Atrato a la altura de Quibdó. La técnica aprovecha la desviación de los rayos laser que impactan las partículas puestas en suspensión, de acuerdo con su tamaño. Permite el análisis de pequeñas muestras, con la obtención de una curva de distribución continua en el rango de 3 mm a  $0,1 \mu\text{m}$  (Malvern Panalytical, s.f.).

## Aguas

Finalmente se realizaron mediciones *in-situ* y análisis en laboratorio de muestras de agua para evaluar efectos relacionados con la actividad minera. Las mediciones *in-situ* de las muestras recolectadas incluyen parámetros físico-químicos de campo: pH, POR y conductividad. Ensayos cualitativos clásicos con reactivos de campo ayudaron a reconocer la presencia de  $\text{Fe}^{2+}$  (ferricianuro de potasio, prueba de azul de Prusia) y de sulfatos (con cloruro de bario). Se complementa con el análisis de cationes y aniones comunes determinados en laboratorio por espectroscopia de absorción atómica (IGAC, 2006; Gaviria, 2015).

## Resultados y discusión

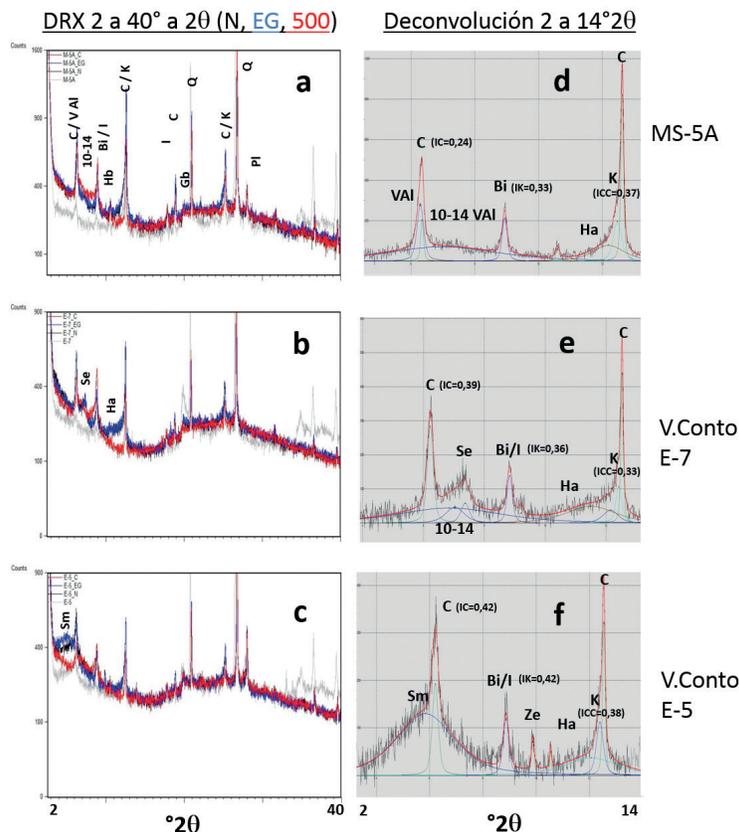
### Distribución de minerales en las terrazas aluviales del río Quito

En el sector de Paimadó, los difractogramas presentan picos bien definidos y agudos, lo que indica minerales detríticos bien cristalizados, asociados con fases menos abundantes de minerales de alteración (Figura 4, A y D; MS-5A). Restos de plagioclasa y hornblenda se conservan por los aportes de material fino. Entre los filosilicatos primarios predominan clorita y biotita (IC=0,24; IK=0,33). Completan el complejo de alteración: vermiculita con aluminio en la inter-lámina; una estructura inter-estratificada illita-clorita; sepiolita, producto de alteración de minerales ferromagnesianos; caolinita en parte degradada (ICC=0,37); haloisita deshidratada y gibsitita.

Los sedimentos activos depositados en el borde del río Quito son heredados de rocas que han sufrido modificaciones por exposición al medio ambiente. La presencia de vermiculita, caolinita, haloisita y gibsitita, indican la presencia del ion aluminio en el medio que resulta de la descomposición de feldespatos y micas.

Las muestras recolectadas en la terraza de Villa Conto de la margen izquierda del río Quito, conserva un perfil de suelo *in-situ* preservado de la destrucción por la minería (V.Conto-E6 y V.Conto-E7). Adicionalmente, se recuperó material fino depositado al borde del río (V.Conto-E5).

La muestra de suelo a 1 m de profundidad (V.Conto-E7) produce un difractograma de la fracción arcilla que se caracteriza también por picos intensos correspondientes a los filosilicatos heredados de las rocas: clorita y biotita alteradas (IC=0,39; IK=0,36) (Figura 4, B y E). Estructuras inter-estratificadas



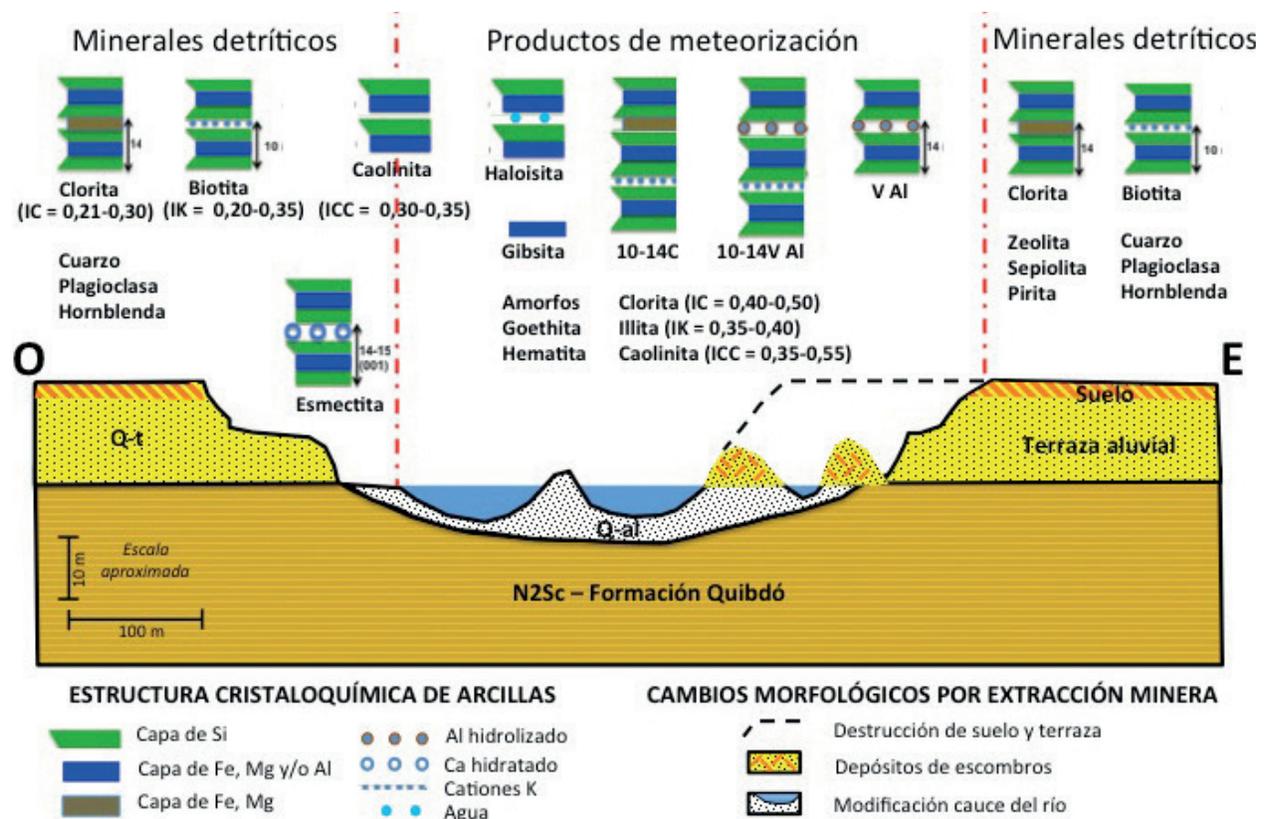
**Figura 4.** DRX fracción arcilla de las terrazas aluviales del río Quito afectadas por minería reciente (izquierda). Deconvolución de fases y medida de índices de cristalinidad IC, IK e ICC (Kubler, 1967; Bonilla et al., 2011, derecha). A y D: MS-5A, sedimento terraza de Paimadó; B y E: V.Conto-E7, suelo de Villa Conto; C y F: V.Conto-E5, sedimento lavado. Sm = Esmeclita; C = Clorita; V = Vermiculita; 10-14 = inter-estratificado; Al = aluminio; Se = Sepiolita; Bi = Biotita; I = Illita; Ze = zeolita; Hb = Hornblenda; Ha = Haloisita; K = Caolinita; Gb = Gibsitita; Q = Cuarzo; Pl = Plagioclasa. Fuente: elaboración propia.

clorita-illita rica en láminas de clorita, e illita-vermiculita con inter-lámina de aluminio, indican meteorización parcial de clorita y biotita. También aparece caolinita ( $ICC=0,33$ ), haloisita parcialmente hidratada, gibsita y los óxidos de hierro goethita y hematita. Los minerales primarios hornblenda y plagioclasa han desaparecido por meteorización.

El difractograma de la Figura 4 (C y F) corresponde a la fracción arcilla del sedimento fino depositado al pie de la terraza de Villa Conto después del abandono de la minería (V.Conto E-5). A diferencia del suelo descrito anteriormente, los minerales primarios plagioclasa, hornblenda y una zeolita de origen hidrotermal se conservan en la fracción arcilla, lo que demuestra bajo grado de meteorización de los detritos. Sin embargo, clorita ( $IC=0,42$ ) y biotita ( $IK=0,42$ ) están fuertemente alteradas al igual que caolinita ( $ICC=0,38$ ) y una banda ancha de

haloisita. Estas arcillas provienen del lavado de los suelos afectados químicamente durante la extracción mineral mezclados con minerales conservados en las terrazas. Al pie de la terraza aparece una nueva estructura arcillosa, esmectita de bajo grado de cristalinidad, mineral arcilloso expansivo que se hincha cuando se aplica el tratamiento con etilenglicol. Los depósitos aluviales del río Quito en este sector se caracterizan por su alta plasticidad que dificulta en extremo el paso, experiencia vivida durante el desembarco en la playa durante la visita de campo.

En síntesis, clorita y biotita (índice IC e IK  $<0,35$ ) son filosilicatos que están asociados con plagioclasas cálcicas, hornblenda y cuarzo que constituye el material detrítico procedente de fuentes ígneas y metamórficas de la cuenca (Figura 5). La esmectita parece estar relacionada con depósitos sedimentarios de la base de las terrazas. La zeolita y sepiolita



**Figura 5.** Corte esquemático del río Quito en el sector comprendido entre Villa Conto y Paimadó con los depósitos de sedimentos del Neógeno (Formación Quibdó), las terrazas cuaternarias (Q-t), los depósitos aluviales recientes (Q-al) y los suelos. Se ilustran algunos efectos de la actividad minera sobre las terrazas y el cauce del río. Los minerales asociados con la fracción fina de sedimentos y suelos ( $<75 \mu m$ ) se distribuyen en la sección, con los detritos en las terrazas y los productos de meteorización en la parte central. Se muestran las estructuras cristalógicas de minerales arcillosos y los índices de cristalinidad para clorita (IC), biotita/illita (IK) y caolinita (ICC). Fuente: elaboración propia

pueden ser productos de alteración de minerales ferromagnesianos. Caolinita heredada de suelos de la cuenca con ICC > 0,35, se asocia con las especies producidas por procesos de alteración recientes: minerales arcillosos derivados de clorita y biotita (illita) con índices de cristalinidad > 0,35, vermiculita e inter-estratificados illita-vermiculita (10-14V), illita-clorita (10-14C), y gibsitita.

Para complementar los resultados anteriores, un análisis con acetato de amonio - ácido acético a pH 3 (reactivo TAMM), extrae las formas más libres de Si, Al y Fe que resultan de procesos de meteorización (IGAC, 2006). En las terrazas del río Quito, se obtuvieron valores de aluminio de 0,39% en Villa Conto (V.Conto-E7) y 0,13% en Paimadó (MS-5A), respectivamente. El suelo de Villa Conto da un valor más alto debido a la meteorización más avanzada. El aluminio que se libera de silicatos que se degradan, queda disponible para asociarse con arcillas susceptibles de incorporarlo a su estructura: vermiculita, illita-vermiculita y gibsitita.

Estos minerales reflejan la intensidad de los procesos de meteorización en los ambientes tropicales del Chocó, a pesar de existir simultáneamente detritos ricos en minerales ferro-magnesianos alterables, lo que parece una contradicción desde el punto de vista termodinámico. Se explica por la mezcla de materiales de diferentes niveles por el efecto mecánico y geoquímico de la minería.

La presencia de aluminio libre tiene consecuencias físico-químicas notables sobre la forma del transporte de arcillas: esta especie química actúa como agente floculante por aglomeración de coloides arcillosos, proceso que estabiliza la estructura física de los suelos y dificulta el transporte de sedimentos por las aguas corrientes (Besoin, 1985; Mc Bride, 1989). La destrucción de los suelos protectores de las terrazas por la acción mecánica de la minería expone los sedimentos finos a la erosión y el transporte en suspensión.

Las evidencias de campo y laboratorio muestran que las terrazas aluviales están deterioradas por el trabajo mecánico de retro-excavadoras y dragas. En muchos lugares se presentan escombreras al borde del río y pozos excavados a lo ancho del valle, en donde los materiales están mezclados. La erosión produce la homogenización de los sedimentos finos que

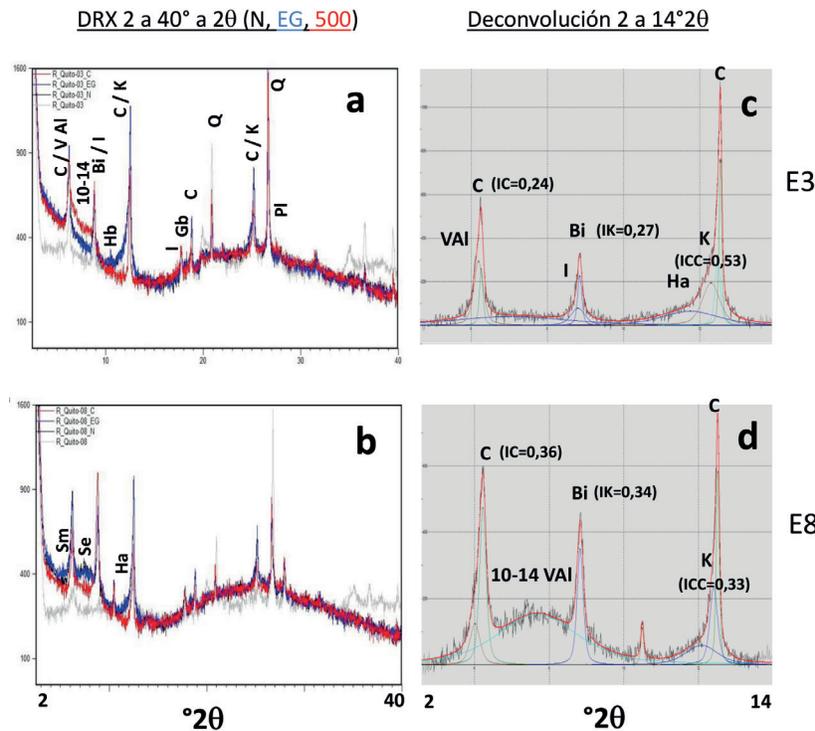
conforman la matriz de los conglomerados en las terrazas, junto con sedimentos aluviales activos y suelos.

Adicionalmente la goethita y hematita son óxidos de hierro que resultan de la meteorización de ferromagnesianos y de la oxidación de la pirita. La extracción con el reactivo TAMM libera también el hierro que proviene de la meteorización de minerales ferromagnesianos y de pirita. Son las fracciones lábiles que se producen por cambios en las condiciones de potencial redox y en forma de productos mal cristalizados o amorfos (Bonneau y Souchier, 1979). Generalmente resultan del ataque de especies susceptibles a cambios en el Eh (potencial redox) como los sulfuros de hierro cuando se oxidan. También podrían liberarse en suelos sometidos a largos períodos de inundación o de saturación hídrica por degradación de los óxidos que liberan el ion ferroso soluble. Cuando las aguas freáticas encuentran condiciones oxidantes al aire, las especies solubles precipitan, principalmente como hidrolizados amorfos (Langmuir, 1997).

En el sedimento de Paimadó (MS-5A) el valor obtenido fue de 0,41% y el suelo de Villa Conto arrojó un valor de 0,22% de Fe libre. La minería activa en el sector libera el hierro más reactivo de sulfuros por efecto de la oxidación de los sedimentos removidos. En el suelo *in-situ*, el proceso está ligado a la degradación de los minerales ferro-magnesianos, probablemente relacionado a los cambios en el nivel freático. La importancia de estos precipitados de hierro es la posible contribución al transporte de metales, incluido el mercurio, fenómeno que debe evaluarse en los medios en donde esta especie activa sea abundante. Lo anterior es debido a las cargas de superficie de los coloides de hierro que atrapan iones metálicos y facilitan su transporte en suspensión en las aguas (Brown y Calas, 2013).

### **Sólidos en suspensión en las aguas de los ríos Quito y Atrato**

Los difractogramas de la Figura 6 presentan la mineralogía de la fracción arcilla de los sólidos en suspensión recuperados de muestras de agua del río Quito y del río Atrato cerca de la unión de los dos afluentes.



**Figura 6.** DRX fracción arcilla de sedimentos en suspensión de ríos Quito y Atrato (izquierda). Deconvolución de fases y medida de índices de cristalinidad IC, IK e ICC (Kubler, 1967; Bonilla et al., 2011, derecha). A y C: E3 aguas debajo de Villa Conto; B y D: E8 Atrato aguas arriba de Quibdó. Sm = Esmectita; C = Clorita; V = Vermiculita; 10-14 = inter-estratificado; Al = aluminio; Se = Sepiolita; Bi = Biotita; I = Illita; Hb = Hornblenda; Ha = Haloisita; K = Caolinita; Gb = Gibsita; Q = Cuarzo; PI = Plagioclasa. Fuente: Elaboración propia

La Figura 6 (A y C) presenta los difractogramas de la fracción arcilla del material particulado recolectado en las aguas superficiales del río Quito, frente al caserío de San Isidro (sitio E3). Las muestras E1 a E7, recolectadas en el tramo aguas arriba hasta Paimadó, dan resultados similares con algunas pequeñas variaciones en la proporción relativa de los mismos minerales. Las señales principales corresponden a cuarzo, plagioclasa y hornblenda, remanentes de minerales heredados de las terrazas aluviales y concentran partículas muy pequeñas de clorita (IC=0,24) y biotita (IK=0,27). Adicionalmente aparecen claramente diferenciadas las señales de los minerales arcillosos producidos por meteorización: vermiculita aluminosa, illita, caolinita degradada (ICC=0,53), haloisita y contenidos menores de gibsita.

La Figura 6 (B y D) presentan los difractogramas de la fracción arcilla en los sólidos en suspensión recuperados de las aguas del río Atrato, en el sitio E8, antes de la desembocadura del río Quito. Los minerales identificados coinciden con los encontrados

en este drenaje, aunque aparecen diferencias significativas en las arcillas como resultado de los procesos de meteorización. Clorita (IC=0,36) y biotita (IK=0,34) han sufrido deterioro en las estructuras, transporta en suspensión esmectita, vermiculita y un producto inter-estratificado illita-vermiculita no aluminoso y variados productos de alteración que van de caolinita (ICC=0,33) a haloisita, son indicadores procesos de meteorización regional.

### Composición de aguas

Los valores de pH a lo largo del río Quito son constantes, alrededor de 6,5 en el tramo inferior de su recorrido; el potencial de oxidación-reducción (POR) que determina el valor de Eh del medio acuoso está entre +120 y +150 mV, corresponde a ambientes óxicos que se confirma con mediciones de oxígeno disuelto entre 6 y 8 mg L<sup>-1</sup> (IIAP, 2015); las conductividades se encuentran entre 12 y 15  $\mu$ S cm<sup>-1</sup>, valores que indican un bajo contenido en iones

solubles para aguas corrientes. Las muestras tomadas en el río Atrato aguas arriba y frente a Quibdó, tiene pH 7,5 neutro a ligeramente alcalino; POR de +140 mV condiciones óxicas en el mismo rango medido en las aguas del río Quito y conductividad alrededor de 39  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , valor superior al de su afluente pero dentro del rango de aguas con bajo contenido en iones solubles (Tabla 2).

La alta pluviometría que caracteriza la zona produce grandes caudales en los ríos y dilución de las especies solubles provenientes de los suelos y los sedimentos, como lo indican los valores de pH cercanos a la neutralidad y las bajas conductividades eléctricas. La suma de cationes comunes,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  presentes en pequeñas cantidades da valores entre 5 y 10  $\text{mg L}^{-1}$ . Estas especies provienen de la degradación de minerales: sodio y calcio de plagioclasas; magnesio de silicatos ferro-magnesianos; potasio de micas, principalmente. El aluminio soluble es muy bajo en estas aguas de pH cercano a la neutralidad.

Los aniones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) suman entre 7 y 12  $\text{mg L}^{-1}$ . Los sulfatos provienen principalmente de la oxidación de los sulfuros ( $\text{S}^{2-}$ ), según se evidenció en los análisis químicos de sedimentos en esta cuenca a través de un corte sintético (Figura 7).

Los sólidos en suspensión dieron valores variables comprendidos entre 200 a 500  $\text{mg L}^{-1}$  que reflejan el

aporte de sedimentos a las aguas, producto de la actividad extractiva. El contenido total de mercurio en los sólidos suspendidos dio valores comprendidos entre 0,11 y 0,21  $\mu\text{g g}^{-1}$ . Las mayores concentraciones se encontraron en el tramo inferior del río Quito, receptor del efecto de la actividad minera que emplea mercurio (WWF y Corporación Geopatrimonio, 2018).

Adicionalmente, una muestra de agua de infiltración en el conglomerado clasto-soportado de la terraza de la margen izquierda del río Quito aguas abajo de Villa Conto, aflora en la base del talud sobre una capa lodosa por encima del nivel actual del río (Figura 8). El agua es translúcida en contraste con las aguas turbias del río, el pH 5,4 ácido, la conductividad 115  $\mu\text{S cm}^{-1}$  y el valor de POR se midió en +203 mV. Un ensayo de campo con cloruro de bario dio prueba positiva para  $\text{SO}_4^{2-}$  y otra con ferricianuro de potasio fue positiva para  $\text{Fe}^{2+}$ . Estos resultados de campo indican que el material de la terraza contiene sulfuros que se oxidan en contacto con las aguas lluvias liberando sulfato ácido. Lo anterior se deduce por el valor de la conductividad, diez veces superior a la del río, lo que indica mayor concentración de iones en solución, con el sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) como anión dominante. Estas aguas disuelven también el ion ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) que puede provenir de la oxidación de pirita, el cual se detecta en el agua que aflora en el talud donde comienza a precipitar al contacto con el aire formando un depósito

**Tabla 2.** Análisis de aguas superficiales del río Quito entre Paimadó y río Atrato.

Cód.	pH	Cond ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	POR (mV)	SS	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Hg* ( $\text{g g}^{-1}$ )
				(mg L <sup>-1</sup> )									
<b>Río Quito – San Isidro-Paimadó</b>													
E1	6,50	12,5	+144	235,5	0,62	0,3	0,87	3,04	0,02	2,74	8,00	2,10	0,20
E2	6,54	12,5	+129	475,0	0,77	0,36	0,97	6,93	0,02	2,08	10,00	0,70	0,21
E3	6,45	14,56	+149	439,0	0,77	0,3	0,94	3,38	0,02	2,84	9,00	2,40	0,17
E4	-	-	-	455,0	0,83	0,31	1,34	0,68	0,19	2,32	5,00	0,80	0,13
E5	6,50	15,35	-	351,0	1,32	0,39	1,11	5,61	<0,005	2,58	8,00	0,40	0,16
E6	6,51	14,49	+120	352,5	0,82	0,31	1,13	0,47	<0,005	2,61	5,00	0,40	0,14
E7	6,45	14,62	+120	191,5	1,32	0,31	1,07	0,44	<0,005	2,66	8,00	0,40	0,11
<b>Río Atrato</b>													
E8	7,57	39,4	-	-	1,57	0,71	1,38	7,58	N.D.	3,04	7,00	2,10	0,12
E9	7,50	38,5	+140	-	0,73	0,7	1,53	2,85	<0,005	3,24	8,00	2,10	0,16

Cód.=Código, Cond=Conductividad, POR=Potencial Redox, SS=Sólidos en suspensión, \*Mercurio total en SS. Análisis en el Laboratorio de Toxicología, Universidad de Cartagena (WWF y Corporación Geopatrimonio, 2018) Fuente: elaboración propia

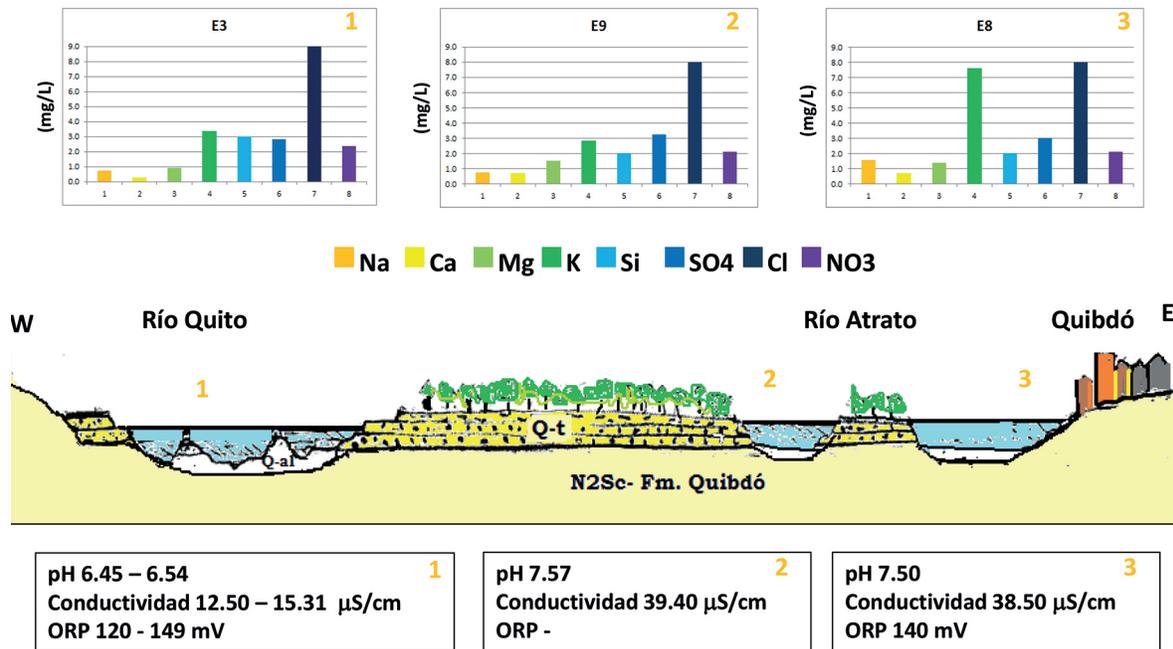


Figura 7. Corte esquemático del valle aluvial de los ríos Quito y Atrato en el sector entre Paimadó y Quibdó. 1. Río Quito entre Paimadó (siete muestras) y desembocadura (E3). 2. Río Atrato aguas arriba de Quibdó (E8). 3. Río Atrato frente al malecón de Quibdó (Eg). Fuente: Elaboración propia



Figura 8. Terraza de la margen izquierda del río Quito abajo de Villa Conto, con agua infiltrada en la terraza aluvial, enriquecida en sulfato de aluminio y óxidos de hierro. Fuente: Jennifer Angel Amaya tomada en 27 de septiembre de 2017.

de color rojizo por oxidación y precipitación de la especie férrica (Gaviria, 2015).

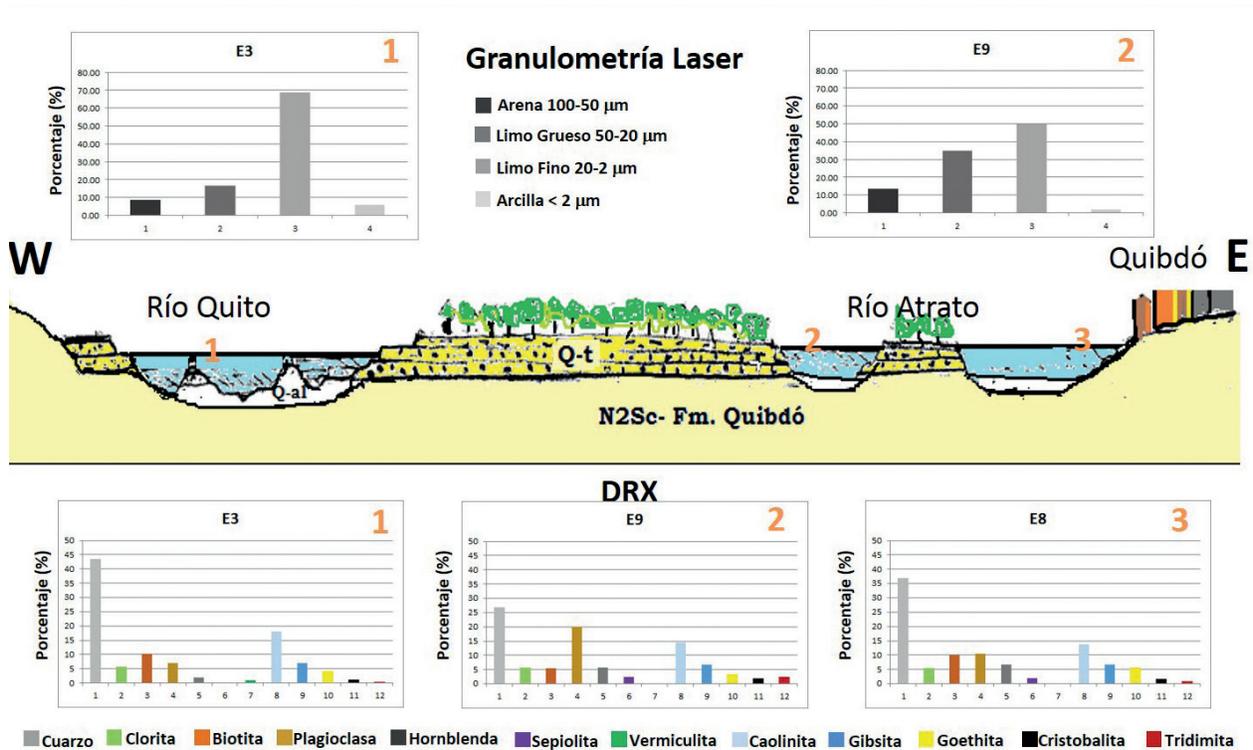
Las evidencias del aporte de sulfatos en las aguas que se infiltran desde las terrazas aluviales, es un geoindicador de procesos de alteración de minerales que puede ocurrir de forma natural o por efecto de la exposición de los materiales durante el trabajo

mecánico de la minería. Estas reacciones pueden ser muy agresivas cuando los materiales contienen localmente cantidades apreciables de sulfuros y quedan expuestos de manera abrupta, lo que genera drenajes ácidos (Norstrom, 2011).

### Análisis granulométrico de sólidos en suspensión

Los resultados de los sólidos en suspensión a lo largo de los ríos Quito y Atrato exponen la relación de la composición mineralógica de los sólidos en suspensión en la desembocadura del río Quito frente al malecón (E8) es muy similar a la de E3. Lo anterior indica la influencia directa del aporte de material particulado del río Quito al río Atrato en su desembocadura, como se observa en la Figura 9, donde se presenta el corte esquemático del valle de los ríos Quito y Atrato aguas arriba de Quibdó.

Por el contrario, la composición mineralógica de los sólidos en suspensión aguas arriba del río Atrato es mucho más rica en plagioclasa y más pobre en



**Figura 9.** Corte esquemático de la granulometría láser y composición mineralógica por DRX de los sólidos en suspensión recuperados de muestras de aguas en el valle aluvial de los ríos Quito y Atrato, en el sector entre Paimadó y Quibdó. 1. Río Quito entre Paimadó (siete muestras) y desembocadura (E3). 2. Río Atrato aguas arriba de Quibdó (E9). 3. Río Atrato frente al malecón de Quibdó (E8). Análisis de granulometría láser expresado en porcentaje (%) de las fracciones de arena, limo grueso, limo fino y arcilla. Fuente: Elaboración propia.

cuarzo que en el río Quito (diferencia de 15%). Esto indica aportes cuantitativamente diferentes entre ambas cuencas que también se reflejan en la distribución del tamaño de partícula.

El análisis granulométrico por difracción láser se realizó al material particulado que se recuperó por sedimentación y centrifugación de tres muestras de agua recolectadas en el río Quito y en una muestra del río Atrato (Tabla 3).

Las muestras del río Quito (E3, E5 y E7), a diferencia de sedimentos y suelos, dan valores de partícula tamaño arcilla muy bajos, del orden de 5%. El contenido de partículas tamaño limo fino (2 a 20 µm) es extremadamente alto, entre 60 y 70%. Los limos gruesos están entre 15 y 20%. Las partículas mayores a 100 µm (hasta 150 µm) constituyen menos del 5% y el río no transporta en suspensión superficial partículas de mayor tamaño (Figura 10A).

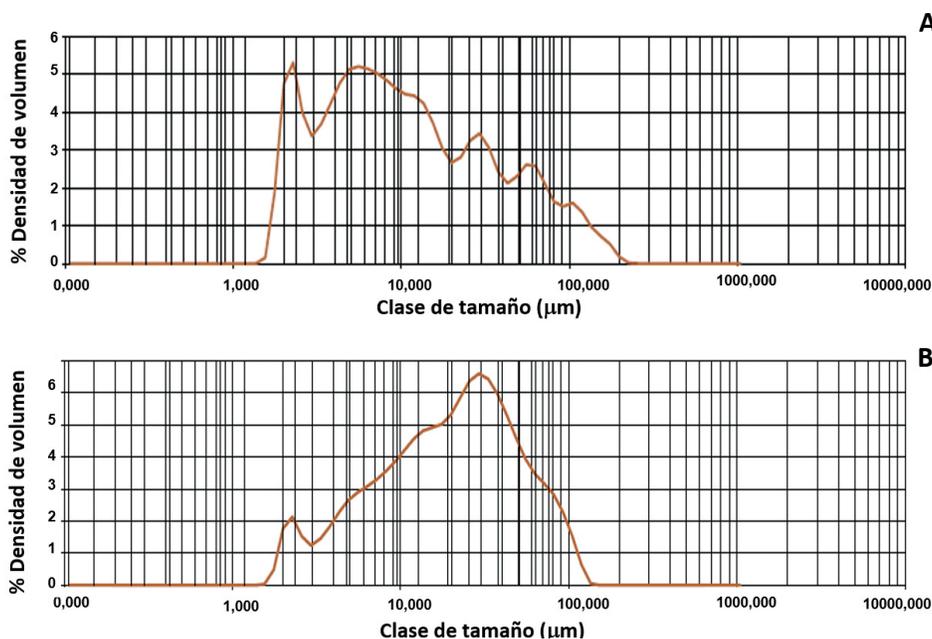
De acuerdo con los análisis mineralógicos es posible que parte de la fracción limo esté constituida por pseudo-partículas conformadas por tamaño arcilla en aglomerados de mayor magnitud. Lo anterior, como

**Tabla 3.** Distribución de tamaño de partícula normalizada de sólidos en suspensión de los ríos Quito y Atrato expresada en porcentaje (%). Análisis por granulometría Laser

Cód.	Sector	Arena (98,6-51,8 µm)	Limo grueso (51,8 - 21,1 µm)	Limo fino (21,2 - 2,13 µm)	Arcilla (<2,13 µm)
E3	Río Quito, San Isidro	8,90	16,56	68,81	5,73
E5	Río Quito	10,13	20,27	64,66	4,94
E7	Río Quito	11,27	19,60	63,76	5,37
E9	Río Atrato aguas arriba de Quibdó	13,34	34,04	49,70	1,91

Fuente: Elaboración propia

consecuencia de la unión de partículas coloidales en agregados estables por el efecto floculante del aluminio. Es probable que este efecto ocurra ya en los sedimentos de las terrazas y en los suelos, de manera que la erosión aporta al río partículas tamaño limo



**Figura 10.** Análisis de tamaño de partículas por difracción laser de 0,1 a 1.000 µm, expresado en % de densidad de volumen. A. Sector San Isidro río Quito (E3); B. río Atrato aguas arriba de desembocadura del río Quito (E9). Fuente: Elaboración propia.

preferencialmente sobre el tamaño arcilla. La distribución de partículas por tamaño se observa claramente en la gráfica de porcentaje de densidad de volumen (Figura 10A). Abundan dos fracciones de limo fino: una entre 2 y 4 µm y otra repartida entre 5 y 20 µm. Es probable que ocurra una distribución específica de minerales detríticos en partículas individuales de cloritas y biotitas tamaño limo fino, junto a pseudo-partículas de minerales arcillosos aglomerados con los mismos diámetros equivalentes.

La muestra del río Atrato (E9), contiene un valor pequeño de partículas tamaño arcilla del 2%. Los limos finos alcanzan 50% y los limos gruesos 35% (Figura 10B). Esta composición granulométrica contrasta con el aporte de sólidos en suspensión del río Quito que son más finos. La distribución de partículas expresada en densidad de volumen muestra la abundancia de partículas de limo más gruesa que en el río Quito, entre 10 y 50 µm. En este caso, los procesos de erosión física en la cuenca mejor preservada y la mayor energía de transporte del río Atrato sobre partículas individuales de limo, podría estar reflejando este contraste.

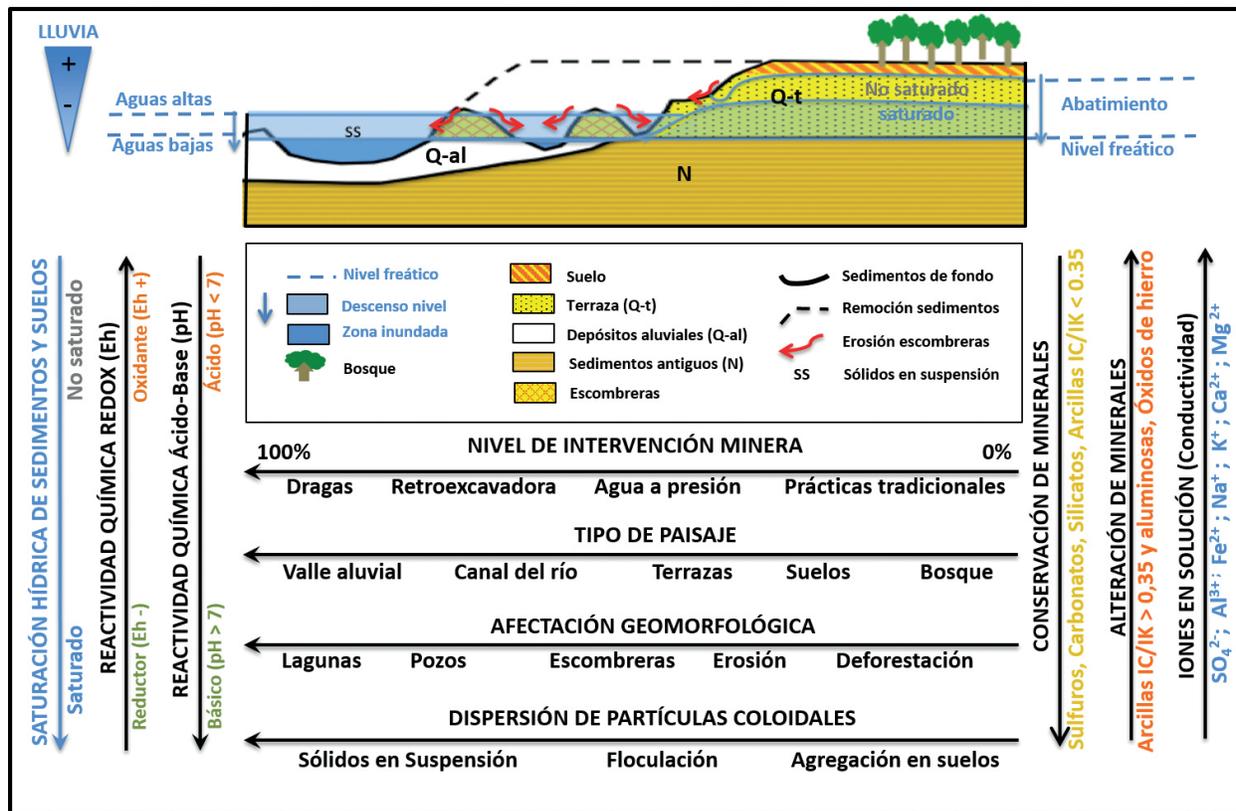
La evidencia de campo demuestra que ocurre un fraccionamiento granulométrico diferente en el río Atrato que aparece menos turbio que el río

Quito. Lo anterior, puede ser considerado como el transporte natural en un río que no ha sufrido aún la misma magnitud del proceso devastador de los dragados y excavaciones de su lecho y terrazas como el que ocurre actualmente en el río Quito. Los estudios de percepción remota y sedimentación en el río Quito y la modelación hidrológica, confirman la ocurrencia de cambios importantes en la dinámica fluvial de este afluente como consecuencia de la actividad minera ilegal (UNODC, 2016; WWF y Corporación Geopatrimonio, 2018).

## Identificación de geoindicadores de la actividad minera

El conjunto de resultados de análisis, junto con las observaciones de campo, permitieron identificar una serie de geoindicadores de los efectos ambientales de la actividad minera en la cuenca del río Quito, que se ordenaron en tres tipos: físicos, químicos y mineralógicos.

Se ordenaron los indicadores en una escala cualitativa de derecha a izquierda en relación con el grado creciente de afectación por la minería, como se observa en la Figura 11. A la derecha está la tendencia de los diferentes parámetros en condiciones de



**GEOINDICADORES FÍSICOS.** La afectación por incremento en el nivel de intervención extractiva, se indica con flechas horizontales dirigidas de derecha a izquierda, desde minería artesanal hasta el uso de maquinaria pesada y dragado: remoción de bosques, suelos y terrazas donde se depositan los escombros; floculación por aguas ácidas en las terrazas destruidas y agregación de partículas finas en los suelos; erosión y aporte de sedimentos de fondo y sólidos en suspensión (SS) al agua; destrucción del cauce del río y formación de pozos y lagunas en el valle aluvial; dispersión y transporte de coloides arcillosos por las aguas del río.

**GEOINDICADORES QUÍMICOS Y MINERALÓGICOS.** La afectación en la composición de sedimentos y suelos causada por la extracción minera, se indica con flechas verticales que están en relación con la saturación hídrica en sedimentos y suelos (nivel freático), cuya dirección depende de la reactividad del medio en ambientes saturados y no saturados. Por abatimiento del nivel freático debido a la perturbación geomorfológica en las terrazas, ocurre la ampliación de la zona no saturada, donde el ambiente se torna oxidante y ácido, propicio para la alteración de minerales y la liberación de iones metálicos. La conservación de minerales ocurre dentro de la zona saturada, en los suelos y los sedimentos de las terrazas donde el oxígeno no penetra. En los pozos abiertos en el valle aluvial, que contienen materia orgánica en descomposición del bosque destruido, el ambiente es reductor, lo que favorece la estabilidad química de los sulfuros.

**Figura 11.** Esquema del efecto de la extracción de oro en el valle aluvial del río Quito en el medio físico afectado por minería ilegal de alta, media y baja intensidad. Fuente: Elaboración propia

baja afectación que corresponde a los lugares donde se realiza minería artesanal y donde potencialmente el bosque cubre las terrazas. En el centro de la figura aparece la situación de cambio de los indicadores correspondientes a un estado intermedio de afectación que podría acercarse al uso de retroexcavadoras y al empleo de bombas de agua a presión que afecta los suelos y los sedimentos sobre las terrazas. A la izquierda se encuentra el estado avanzado de cambio de los indicadores por una minería informal de alto impacto que se puede atribuir al uso de grandes dragas o “dragones” que excavan el fondo del cauce y penetran en el valle aluvial.

## Geoindicadores físicos

Los geoindicadores físicos se refieren a la afectación del sistema geomorfológico de las terrazas y el cauce del río. En el caso donde no se ha dado la minería de alto impacto se conservan las geoformas originales de terrazas y el río sigue su cauce natural. En la minería de mediano impacto las terrazas están excavadas y el material mezclado de sedimentos y suelos se convierte en escombrera, y finalmente con el alto impacto de las dragas, las terrazas desaparecen y se abren enormes excavaciones que afectan la dinámica fluvial del río, modificando su cauce natural en grandes áreas del antiguo valle aluvial.

Con el incremento de la minería informal, los procesos de erosión se magnifican y se liberan a las aguas grandes volúmenes de sedimentos finos que son llevados por la corriente aguas abajo generando turbiedad. Como en las condiciones naturales, los suelos que cubren las terrazas contienen aluminio libre que tiene un efecto floculante, las arcillas se asocian en agregados estables que previenen la erosión. Cuando desaparece esta capa protectora por la excavación de las terrazas, los materiales detríticos quedan expuestos y pueden ser arrastrados por la corriente en forma de partículas finas en suspensión. Con el avance impactante de la minería, el efecto floculante disminuye y las aguas de los pozos mantienen una gran carga de sólidos en suspensión.

Sumado a lo anterior, la alta pluviometría que caracteriza el clima de esta región se encarga de mantener niveles freáticos altos en las terrazas que saturan con agua la parte inferior de los depósitos aluviales durante todo el ciclo climático. La zona no saturada mantiene condiciones variables de humedad de acuerdo con los aportes de aguas lluvias. Cuando se perturban las terrazas, se abaten los niveles freáticos y el material queda expuesto al aire donde ocurren procesos de meteorización. La acción agresiva de las dragas anega el valle aluvial con el agua del río y los sedimentos excavados quedan debajo del agua de manera permanente.

### Geoindicadores químicos

El pH de las aguas corrientes en su estado menos afectado por la minería es del orden de 7,5. A medida que aumenta el deterioro geoquímico, reacciones de oxidación liberan aguas ácidas de minería y el pH disminuye. En condiciones de alto impacto es factible encontrar localmente pH del orden de 5. Sin embargo, el efecto diluyente del agua lluvia se encarga de mantener el pH de los ríos en valores más cercanos a la neutralidad, entre 6,5 y 7,5.

El potencial de óxido-reducción de aguas corrientes es positivo por su mezcla con el oxígeno del aire y el producido por la respiración de las plantas en el proceso de fotosíntesis (Boyd, 2017). La minería cambia las condiciones hidrodinámicas y puede generar ambientes menos oxidantes cuando disminuye la velocidad de la corriente. En zonas de alto

impacto con pozos profundos se espera disminución del valor del potencial de oxidación, eventualmente con la ayuda de la descomposición de restos orgánicos de la vegetación destruida, que origina un ambiente reductor.

La conductividad del agua que mide el contenido de iones disueltos es muy baja en zonas no afectadas por la minería. Por el efecto de las reacciones de oxidación y degradación de minerales se liberan las especies más solubles: cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  de los minerales originales y especies aniónicas entre las cuales la principal es el sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Este efecto de degradación aumenta con el impacto mayor de la minería. Sin embargo, su detección es muy difícil debido a la alta dilución con los aportes de aguas lluvias a los caudales de los ríos. Nuevamente se debe medir en zonas de circulación restringida donde las concentraciones pueden ser mayores.

Para terminar, el ion  $\text{Fe}^{2+}$ , que se pone en evidencia con la prueba de ferricianuro de potasio en campo, se encuentra en forma soluble cuando el ambiente acuoso es reductor. Por tal razón, la presencia de hierro libre en forma de hidrolizado insoluble que produce un precipitado de color rojizo observable a simple vista en la interfase con el agua durante la meteorización, es fuente del ion ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ), cuando los materiales son anegados en la minería de alto impacto. Su presencia en los drenajes de minería y en medios de circulación restringida, es un indicador del impacto químico creciente sobre las aguas.

### Geoindicadores mineralógicos

La caracterización mineralógica de suelos y sedimentos de las terrazas permite reconocer en el sistema geo-edafológico indicadores minerales relacionados con los procesos de meteorización. Los minerales primarios o detríticos se conservan en las terrazas saturadas con agua de las zonas con baja actividad minera, a pesar de condiciones ambientales agresivas que podrían actuar sobre minerales alterables ferro-magnesianos y feldespato cálcico, entre otros. En los suelos y la zona no saturada ocurren reacciones de oxidación de sulfuros que producen sulfato ácido. Este ataque químico natural degrada parcialmente los minerales. Cloritas y biotitas (illitas) disminuyen su cristalinidad por apertura de las

láminas (IC e IK > 0,35) (WWF y Corporación Geopatrimonio, 2018); hornblenda y plagioclasa se alteran parcial o totalmente y dejan productos amorfos. En este proceso de meteorización se libera aluminio y precipitan óxidos de hierro de la pirita y de minerales ferromagnesianos que permanece en los suelos.

Cuando se deteriora el equilibrio de este sistema por las actividades extractivas, los suelos desaparecen y quedan expuestos sedimentos frescos ricos en minerales no alterados. Los valores de IC de clorita e IK de illita son menores (<0,35) indicando conservación de las estructuras cristalógicas por estar bien preservados dentro de las terrazas (WWF-Corporación Geopatrimonio, 2018). La liberación de hierro y sulfatos también ocurre en una minería de mediana intensidad con retroexcavadora por exposición de los sedimentos que estaban protegidos debajo de los suelos. Finalmente, en los pozos inundados por la minería de alta intensidad, el material permanece debajo del agua aislado de la atmósfera. Los procesos de oxidación no ocurren debido a la presencia de materia orgánica en descomposición que consume el oxígeno, creando un ambiente reductor cuando se destruye el bosque y las terrazas con retroexcavadoras y dragas.

Metales pesados asociados al oro en depósitos aluviales se encuentran generalmente en forma de sulfuros; estos minerales se desestabilizan cuando entran en contacto con el aire y liberan por oxidación especies más lábiles; tal situación ocurre naturalmente en los suelos expuestos de las terrazas después del depósito natural de los sedimentos. En el interior de las terrazas estos minerales están preservados de la meteorización y se conservan en forma de especies insolubles. El disturbio mecánico de las terrazas expone estos componentes y libera parcialmente metales pesados al medio. En la minería aluvial, los sulfuros metálicos se mantienen en su estado reducido e insoluble, siempre y cuando el material se devuelva nuevamente al agua después de la extracción. Así para reducir la contaminación de los ríos y cuerpos de agua, se requiere de la reducción de las actividades extractivas, y no solamente del desuso del mercurio para el recobro del oro (Skinner y Berger, 2003).

## **Conclusiones**

Las hipótesis y relaciones físico-químicas planteadas en ambientes de minería inactiva, en el río Quito permitieron postular unos geoindicadores para la evaluación del impacto y degradación del medio natural que genera la intervención mecánica para la extracción de oro de aluvión, cambios que perduran incluso después del cese de la intervención. La aplicación o medición de estos geoindicadores físicos, químicos y mineralógicos, constituye una herramienta clave en el estudio ambiental para evaluar los cambios en periodos cortos, lo que permitiría el planteamiento de medidas de remediación en ambientes afectados por actividades extractivas.

La extracción con técnicas artesanales de batea y pala produce el menor impacto, con ligero incremento en la turbiedad de las aguas. A medida que aumenta el grado de intervención con la aplicación de agua a presión, se incrementa el grado de afectación física por remoción de suelos y sedimentos en las terrazas. Cuando llegan las retroexcavadoras, se deforestan las terrazas y se convierten en escombros donde quedan mezclados y expuestos al medio externo los materiales residuales de los diferentes niveles. Inicia un proceso de erosión, lavado de sedimentos finos que van al río y el abatimiento de los niveles freáticos en los depósitos.

Así, se amplía la profundidad de la zona no saturada que queda sometida a condiciones oxidantes. Se genera la degradación de minerales alterables en las terrazas, que antes de la intervención estaban preservados de los agentes externos dentro de la zona saturada de agua en suelos y sedimentos.

Silicatos ferro-magnesianos, plagioclasas cálcicas, hornblenda y cuarzo, junto con clorita (IC<0,35) y biotita (IK<0,35) constituyen el material detrítico procedente de fuentes ígneas y metamórficas de la cuenca. La exposición de los sedimentos aluviales por acción mecánica de la minería informal, desordena la secuencia natural en las terrazas y expone los minerales a la meteorización. Los índices de cristalinidad de cloritas (IC) y biotitas (IK) son mayores de 0,35 reflejando degradación de las estructuras, y se convierten en geoindicadores de interés para el seguimiento de la actividad.

Caolinita heredada de suelos de la cuenca, junto con illita, vermiculita, inter-estratificados illita-vermiculita y gibsita que asocian aluminio liberado por la alteración actual, coexisten con los detritos ricos en minerales alterables por efecto de la mezcla mecánica de materiales. La destrucción de los suelos protectores, expone los sedimentos finos de las terrazas a la erosión y al transporte. El río Quito carga en suspensión una mezcla de partículas finas de minerales primarios, junto con los productos arcillosos de alteración geoquímica asociados en pseudo-partículas tamaño limo fino.

La liberación de  $\text{Fe}^{2+}$  soluble y la precipitación de óxidos insolubles, goethita y hematita, es otro de los efectos de la alteración geoquímica de los suelos y sedimentos de las terrazas. Refleja cambios en las condiciones redox del medio por exposición de los materiales al medio externo.

Las aguas del río Quito con menos de  $15 \text{ mg L}^{-1}$  de iones solubles, reflejan dilución por efecto del aporte de las lluvias en una cuenca de alta pluvio-metría. El pH de 6,5 que resulta de la suma de los factores naturales y de la actividad antrópica, no está reflejando el aporte de aguas ácidas procedente del lavado de los escombros en las terrazas, debido entre otros factores, a la dilución antes mencionada.

Las aguas del río Atrato con cerca de  $40 \text{ mg L}^{-1}$  de iones en solución y pH 7.5, muestran diferencias en la cuenca de aporte respecto a la de su afluente, el río Quito. Las aguas transportan partículas de minerales primarios y pseudo-partículas de minerales arcillosos tamaño limo grueso y fino. Clorita y biotita tienen índices de cristalinidad alrededor a 3,5 lo que indica predominio de productos de meteorización de suelos provenientes de una cuenca menos afectada por el disturbio de la extracción mecánica.

Las dragas o “dragones” que han adquirido progresivamente mayor envergadura, succionan los sedimentos del fondo en el cauce y avanzan abriendo canales en el valle aluvial alejándose varios kilómetros a lado y lado del río. Estas máquinas afectan decenas de miles de hectáreas de bosques y suelos aluviales, dejando pozos y lagunas que se forman por inundación con aguas del río. El ambiente en estas aguas de circulación restringida, es reductor por la presencia de material orgánico en descomposición procedente de la destrucción del bosque aledaño.

La destrucción del cauce natural del río que invade el valle aluvial, contribuye a la profundización de los niveles freáticos en las terrazas adyacentes. El abatimiento de los niveles freáticos en época de menor pluviosidad expone un mayor volumen de suelo a la acción agresiva de los agentes meteóricos oxidantes y los minerales alterables se degradan.

Al contrario, las lagunas en el valle aluvial quedan aisladas y sin circulación en época de aguas bajas, lo que incrementa el ambiente reductor por falta de oxígeno. Los minerales quedan preservados de la acción degradante de los procesos de meteorización. En época de aguas altas estos pozos se pueden conectar al río y cambian las condiciones de reacción en ambiente más oxidante. Estos procesos redox deben ser tenidos en cuenta para reconocer la posibilidad de liberación de metales pesados y la contaminación de las aguas desde el antiguo valle aluvial. Las reacciones de oxidación producen la acidificación de los sulfuros que acompañan geoquímicamente a los metales preciosos y liberan sus metales pesados, tema que debe ser abordado en un estudio amplio de las áreas de minería activa.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen a WWF Colombia por la financiación del presente trabajo mediante el convenio GB18, sobre procesos y ambientes geoquímicos, y distribución de mercurio en zonas impactadas por minería de oro aluvial en Chocó, en particular a Mauricio Cabrera y a Paula Rodríguez, quienes supervisaron y enriquecieron el trabajo.

Agradecimiento especial a Jesús Oliveros y Yuber Torres de la Universidad de Cartagena, quienes desarrollaron el componente de toxicología del mercurio en las mismas muestras, y a Rafael Sierra, quien formuló el modelo hidrológico del Río Quito.

De igual forma, agradecemos a los revisores anónimos por sus comentarios y sugerencias.

#### Bibliografía

- Álvarez, J., Sotero, V., Brack Egg, A., Ipenza Peralta, C., 2011. Minería aurífera en Madre de Dios y contaminación con mercurio. Una bomba de tiempo. Instituto de la Amazonia Peruana y Ministerio de Ambiente (IIAP-MINAM), Lima.
- Ángel-Amaya, J., Ordoñez, M., Olivero, J., Echavarría, C., Ayala, H., Cabrera, M., 2019. Consideraciones sobre la minería en el departamento del Chocó y recomendaciones para mejorar la gestión. Geopatrimonio; Universidad de Cartagena; IIAP; WWF, Cali, Colombia.

- Appleton, J., Weeks, J., Calvez, J., Beinhoff, C., 2006. Impacts of mercury contaminated mining waste on soil quality, crops, bivalves and fish in the Naboc River area, Mindanao, Philippines. *Sci. Total Environ.* 354(2-3), 198-211. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2005.01.042
- Berger, A., 1997. Assessing rapid environmental change using geoindicators. *Environ. Geol.* 32(1), 36-44. DOI: 10.1007/s002540050191
- Berger, A., 1998. Environmental change, geoindicators, and the autonomy of nature. *GSA TODAY* 8(1), 3-8.
- Berger, A., 2002. Tracking rapid geological change. *Episodes* 25(3), 154-159. DOI: 10.18814/epiugs/2002/v25i3/001
- Besoain, E., 1985. Mineralogía de arcillas en suelos. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), San José.
- Bonilla, G., Sarmiento, G., Gaviria, S., 2011. Proveniencia y transformación diagenética de minerales arcillosos del Maastrichtiano-Paleoceno al norte de Bogotá, Cordillera Oriental de Colombia. *Geol. Colomb.* 36(1), 179-195.
- Bonneau, M., Souchier, B., 1979. *Pédologie 2. Constituants et propriétés du sol.* Masson, Paris.
- Boyd, C., 2017. El fitoplancton y su impacto en la calidad del agua. Global Aquaculture Alliance, disponible en: <https://www.aquaculturealliance.org/advocate/el-fitoplancton-y-su-impacto-en-la-calidad-del-agua/>; consultado: enero de 2018.
- Brown, G., Calas, G., 2013. Mineral-aqueous solution interfaces and their impact on the environment. *Geochem. Perspect.* 1(4), 483-742. DOI: 10.7185/geochempersp.1.4
- Campbell, L., Dixon, D., Hecky, R., 2003. A review of mercury in Lake Victoria, East Africa: implications for human and ecosystemic health. *J. Toxicol Environ Health B Crit Rev.* 6(4), 325-56. DOI: 10.1080/10937400306474
- Campuzano, R., 1993. Bibliografía de la historia minera colombiana: Balance y perspectivas. En: *Memorias, III Reunión de Historiadores de la Minería Latinoamericana*, Taxco, México.
- Corte Constitucional de Colombia, 2016. Sentencia T-622/16, acción de tutela interpuesta por el Centro de Estudios para la Justicia Social "Tierra Digna", en representación del Consejo Comunitario Mayor de la Organización Popular Campesina del Alto Atrato (Cocomopoca), el Consejo Comunitario Mayor de la Asociación Campesina Integral del Atrato (Cocomacia), la Asociación de Consejos Comunitarios del Bajo Atrato (Asocoba), el Foro Inter-étnico Solidaridad Chocó (FISCH) y otros, contra la Presidencia de la República y otros. Bogotá, DC.
- Diringer, S., Feingold, B., Ortíz, E., Gallis, J., Araújo-Flores, J., Berky, A., Pan, W., Hsu-Kim, H., 2015. River transport of mercury from artisanal and small-scale gold mining and risks for dietary mercury exposure in Madre de Dios, Peru. *Environ Sci-Proc. Imp.* 17(2), 478-87. DOI: 10.1039/C4EM00567H
- Gaviria, S., 2015. *Química para geología: Aplicaciones en laboratorio y campo.* Colección Yu Takeuchi Notas de Clase, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, DC.
- Gaviria, S., Angel-Amaya, J., Cabrera, M., 2019. Formulación de geoindicadores ambientales de oro aluvial: Caso de estudio Cuenca del río Quito, Departamento del Chocó. En: *Mem. XVII Congreso Colombiano de Geología; IV Simposio de Exploradores*, Santa Marta, Colombia.
- Goni, E., Sabogal, A., Asmat, R., 2014. *Minería informal aurífera en Colombia. Principales resultados del levantamiento de la línea base.* Fedesarrollo, Bogotá, DC.
- Ikingura, J., Akagi, H., Mujumba, J., Messo, C., 2006. Environmental assessment of mercury dispersion, transformation and bioavailability in the Lake Victoria Goldfields, Tanzania. *J. Environ Manage* 81(2), 167-73. DOI: 10.1016/j.jenvman.2005.09.026
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 2006. *Métodos analíticos del laboratorio de suelos.* Bogotá.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 2011. *Estudio general de suelos y zonificación de tierras Escala 1:100.000 Departamento del Chocó.* Bogotá.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras (INGEOMINAS), 2001. *Investigación integrada del Andén Pacífico Colombiano. Tomo 1: Geología.* Bogotá, DC.
- Instituto de Investigaciones ambientales del Pacífico (IIAP), 2012. *Protocolo de restauración ecológica de áreas degradadas por minería a cielo abierto de oro y platino en el Chocó Biogeográfico.* Convenio 182. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), Bogotá, DC.
- Instituto de Investigaciones ambientales del Pacífico (IIAP), 2015. *Impactos de las actividades antrópicas sobre los ecosistemas y la biodiversidad en el Chocó biogeográfico: minería en río Quito.* En: *Informe del estado del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables 2012, 2013 y 2014. Tomo II: Estado de los ecosistemas y de los servicios ecosistémicos.* El Sistema Nacional Ambiental (SINA), Bogotá, DC. pp. 130-176.
- Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras (INGEOMINAS), 2003. *Memoria explicativa de las planchas 163 Nuquí, 164 Quibdó, 183 Coquí y 184 Lloró.* Escala 1:100.000. Bogotá, DC.
- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES), 2019. *Documento de investigación científica y sociológica respecto a los impactos de la actividad minera y la explotación ilícita de minerales, en los ecosistemas del territorio colombiano: Sentencia T 445 de agosto de 2016.* Bogotá, DC.

- Kubler, B., 1967. La cristallinité de l'illite et les zones tout à fait supérieures du métamorphisme. En: *Étages Tectoniques*, Colloque Neuchâtel 1966. Suisse, Baconnière, Francia. pp. 105-121.
- Langmuir, D., 1997. *Aqueous environmental geochemistry*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Malvern Analytical, s.f. Técnica de difracción láser para medición de tamaño de partícula. Disponible en: <https://www.malvernanalytical.com/es/products/technology/light-scattering/laser-diffraction>; consultado: septiembre de 2018.
- Marrugo, J., Benitez, L., Olivero, J., 2008. Distribution of mercury in several environmental compartments in an aquatic ecosystem impacted by gold mining in Northern Colombia. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 55,305-316. DOI: 10.1007/s00244-007-9129-7
- Marrugo, J., Pinedo-Hernández, J., Diez, S., 2015. Geochemistry of mercury in tropical swamps impacted by gold mining. *Chemosphere* 134, 44-51. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.03.012
- Mc Bride, M., 1989. Surface chemistry of soil minerals. En: Dixon, J., Weed, S. (Eds.), *Minerals in soil environments*. Book Series 1. 2a ed. Soil Science Society of America, Wisconsin, WI pp. 35-88. DOI: 10.2136/sssabookser1.2ed.c2
- Moore, D., Reynolds, R., 1997. *X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals*. 2a ed. Oxford University Press, New York, YN.
- Norstrom, D., 2011. Mine waters: acidic to circumneutral. *Elements* 7(6), 393-398. DOI: 10.2113/gselements.7.6.393
- Olivero, J., 2016. Conservación de la biodiversidad en paisajes impactados por la minería en la región del Chocó biogeográfico. Estado de la contaminación por mercurio en diversas matrices ambientales. Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia.
- Palacios, Y., Caballero, K., Olivero, J., 2018. Mercury pollution by gold mining in a global biodiversity hotspot, the Choco biogeographic region, Colombia. *Chemosphere* 193, 421-430. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.10.160
- Pinedo-Hernández, J., Marrugo J., Diez S., 2015. Speciation and bioavailability of mercury in sediments impacted by gold mining in Colombia. *Chemosphere* 119, 1289-95. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.09.044
- Poveda, G., 2002. *La minería colonial y republicana*. Banco de la República, Bogotá, DC.
- Ramírez, M., Ramos, J., Angélica, R., Brabo, E., 2002. Assessment of Hg-contamination in soils and stream sediments in the mineral district of Namibia, Ecuadorian Amazon (example of an impacted area affected by artisanal gold mining). *Appl. Geochem.* 18, 371-381. DOI: 10.1016/S0883-2927(02)00088-4
- Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2015. *Mapa Geológico de Colombia escala 1:1.000.000*. Bogotá, DC.
- Skinner, H., Berger, A., 2003. *Geology and health: Closing the gap*. Oxford University Press, Nueva York, NY.
- Thorez, J., 1976. *Practical identification of clay minerals: a handbook for teachers and students in clay mineralogy*. Ed. G. Lelotte, Dison, Bélgica.
- United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC), 2016. *Colombia explotación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota*. Junio 2016. Ministerio de Justicia y del Derecho. Bogotá, DC.
- United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC), 2018. *Informe Colombia Explotación de oro de aluvión: evidencias a partir de percepción remota 2018, y los hallazgos preliminares para 2019*. Ministerio de Minas y Energía, Bogotá, DC.
- United States Agency for International Development (USAID), 2016. Programa de Minería Artesanal, "Oro Legal". Disponible en: [https://www.usaid.gov/sites/default/files/documents/1862/OROLEGAL\\_FactSheet\\_March\\_2016\\_ES.pdf](https://www.usaid.gov/sites/default/files/documents/1862/OROLEGAL_FactSheet_March_2016_ES.pdf); consultado: enero de 2018.
- Valencia, J., 2002. Indicadores de sustentabilidad para la industria minera extractiva. Propuesta para la minería aurífera de Colombia. En: Bôas, R., Beinhoff, C. (Eds.), *Indicadores de Sostenibilidad para la Industria extractiva mineral*. CNPq; CYTED, Río de Janeiro, pp. 263-281.
- Velde, B., Meunier, A., 2008. *The origin of clay minerals in soils and weathered rocks*. Springer, Berlin. DOI: 10.1007/978-3-540-75634-7
- Warr, L., Rice, A., 1994. Interlaboratory standardization and calibration of clay mineral crystallinity and crystallite size data. *J. Metamorphic Geol.* 12, 141-152. DOI: 10.1111/j.1525-1314.1994.tb00010.x
- World Wide Foundation (WWF); Corporación Geopartrimonio, 2018. *Estudio de los procesos y ambientes geoquímicos, y distribución de mercurio en las áreas afectadas por minería muestreadas en las cuencas del río Quito y San Juan alto*. Informe Interno. Bogotá, DC.