

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS
DE LA CUENCA RÍO QUITO, PRESIONADA POR ACTIVIDAD MINERA**



**UNIVERSIDAD DE
MANIZALES**

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES**

2019

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS
DE LA CUENCA RÍO QUITO PRESIONADA POR ACTIVIDAD MINERA**

**Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar
al título de Especialista en Información Geográfica**

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES
2019**

GLOSARIO

Aluvión: Sedimento arrastrado por las lluvias o las corrientes. (RAE, 2018).

Cuenca hidrográfica: Unidad fundamental de análisis para el desarrollo de los procesos de planificación y administración (MADS, 2016).

DEM: Es la sigla de “Modelo Digital de Elevaciones”, hace referencia al ráster que contiene los datos de altura de la superficie terrestre o topografía.

Geomorfología: Estudio de las características propias de la corteza terrestre (RAE, 2018).

Pendiente del terreno: Es la inclinación que hay de una superficie con respecto a la horizontal (suelo). Suele medirse como ángulo o como porcentaje (Villarroel, 2016).

Raster: Un raster es una matriz de celdas, también denominadas píxeles, organizadas en filas y columnas que cubren alguna región del mundo (o incluso el mundo entero) (ESRI, 2016).

SAR: Acrónimo SAR, del inglés Synthetic Aperture Radar (Radar de Apertura Sintética), hace referencia a un tipo de sistema de radar. Consiste en procesar mediante algoritmos la información capturada por la antena del radar (INGEOEXPERT, 2018).

SRTM: Modelo de elevación del terreno obtenido por la misión de la NASA y otros organismos como la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial de nombre Misión Topográfica Shuttle Radar SRTM y tiene resolución de 1 y 3 segundos (NASA, 2015).

Resumen

El objetivo del presente trabajo es realizar un análisis multitemporal de las características geomorfológicas de la cuenca del río Quito en el departamento del Chocó, a partir de la evaluación de la dinámica minera en imágenes de radar Alos Palsar y Sentinel 1 procesadas con el software SNAP, la delimitación de la cuenca y la detección de las posibles alteraciones generadas por la actividad minera a la red fluvial en diferentes sectores con las herramientas del módulo Hydrology y Detect Features Changes de ArcGIS 10.5. Donde encontramos que en la cuenca se presenta una alta presión sobre la vegetación ribereña del cauce principal y sus afluentes, especialmente desde la comunidad de San Isidro hasta Villa Conto. Los registros del área de la cuenca muestran que su extensión pasó de 1702.1 km² en 2007 a 1702.58 Km² en 2018, donde su perímetro sufrió una reducción de cerca de 2 km, al igual que la pendiente media que 7.57 grados en 2007, bajó a 6.42 y luego a 6.27, disminuyendo gradualmente entre 2010 y 2018 respectivamente. Lo anterior deriva en alteraciones que se observan en el perfil altimétrico del cauce principal, lo cual puede ser generado por la acumulación de sedimentos por la remoción del material aluvial durante el desarrollo de extracción minera y en los segmentos fluviales de la red de drenaje evaluados, donde el 44% se cruza con las áreas degradadas en 2010, de los cuales 19 fueron eliminados, 15 son nuevos, 56 sufrieron cambios espaciales y 434 no sufrieron cambios significativos. En consecuencia, se observa que el deterioro por la continuidad de la actividad minera en la cuenca, las alteraciones en la anchura, estructura, naturalidad y conectividad del corredor ribereño, produce también efectos negativos sobre la geomorfología de los cauces de la red de drenaje.

Palabras clave: Cuenca, Geomorfología, DEM Alos Palsar, Río Quito, Minería, Imágenes de Radar SAR.

Abstract

The objective of this work is to perform a multitemporal analysis of the geomorphological characteristics of the Quito river basin in the Department of Chocó, based on the evaluation of the mining dynamics in Alos Palsar and Sentinel 1 radar images, processed with the SNAP software. , the delimitation of the basin and the detection of the possible alterations generated by the mining activity to the fluvial network in different sectors, with the tools of the Hydrology module and Detect Features Changes of ArcGIS 10.5. Where it was found that in the basin there is a high pressure on the riparian vegetation of the main channel and its tributaries, especially from the community of San Isidro to Villa Conto. The records of the area of the basin show that its extension went from 1702.1 km² in 2007 to 1702.58 km² in 2018, and the perimeter suffered a reduction of about 2 km, as did the average slope that went from 7.57 degrees in 2007, to 6.42 and then to 6.27, decreasing gradually between 2010 and 2018 respectively. The above derives in alterations that are observed in the altimetric profile of the main channel, which can be generated by the accumulation of sediments generated with the removal of the alluvial material during the development of mining extraction and in the fluvial segments of the drainage network evaluated. , where 44% intersect with degraded areas in 2010; 19 of these were eliminated, 15 are new, 56 suffered spatial changes and 434 did not undergo significant changes. Consequently, it is observed that the deterioration due to the continuity of the mining activity in the basin, the alterations in the width, structure, naturalness and connectivity of the riparian corridor, also produces negative effects on the geomorphology of the channels of the drainage network.

Key words: Basin, Geomorphology, DEM Alos Palsar, Río Quito, Mining, Radar SAR Images

Contenido

Introducción	11
1 Área Problemática.....	12
2 Objetivos	14
2.1 Objetivo General.....	14
2.2 Objetivos Específicos.....	14
3 Justificación	15
4 Marco Teórico.....	17
4.1 Marco conceptual.....	17
4.1.1 Características geomorfológicas de una cuenca.	17
4.2 Marco Referencial.....	30
4.2.1 La actividad minera y su afectación al medio ambiente	30
4.2.2 La minería en la subcuenca del río Quito	31
4.3 Marco Normativo.....	34
5 Metodología	37
5.1 Tipo de Trabajo	37
5.2 Área de Estudio.....	37
5.3 Método	38
5.3.1 Fase I. Análisis de la actividad minera en la cuenca del Río Quito.	39

5.3.2	Fase II. Delimitación de cuenca hídrica.....	46
5.3.3	Fase III. Cálculo de las características geomorfológicas	50
6	Resultados.....	55
6.1	Dinámica minera en la cuenca del río Quito.....	55
6.2	Características Geomorfológicas de la cuenca para los años 2007, 2010 y 2018 60	
6.3	Detección de cambios generados por la actividad minera	63
7	Conclusiones.....	66
8	Recomendaciones	68
	Referencias Bibliográficas.....	69

LISTA DE FIGURAS	Pág.
Figura 1. Componentes en una cuenca	18
<i>Figura 2.</i> Relación morfología - caudal, para eventos de precipitación	19
Figura 3. Hidrógramas según forma de la cuenca.....	20
Figura 4. Hidrógrafas según el perfil altimétrico del cauce principal.....	22
Figura 5. Métodos de ordenación de los segmentos y cursos fluviales	24
Figura 6. Funcionamiento de la herramienta detección de cambio de entidades.....	29
Figura 7. Áreas degradadas en cauce principal de la cuenca del río Quito.	32
Figura 8. Cuenca del río Quito.....	38
Figura 9. Diagrama de proceso metodológico	39
Figura 10. Plataforma de descarga de imágenes de radar	41
Figura 11. Estructura de la carpeta de una imagen de alta resolución de Alos Palsar	43
Figura 12. Imagen con detección de cambio 2007-2010 (izquierda), segmentada (centro) y reclasificada (derecha)	45
Figura 13. Herramienta para generar el mosaico del DEM	46
Figura 14. Proceso de cálculo de acumulación de flujo (Flow Accumulation)	48
Figura 15. Modelo de delimitación de cuenca hidrográfica	49
Figura 16. Procesos para adicionar columnas y calcular parámetros en ArcGIS	53
Figura 17. Herramienta para detección de cambio en la entidad	54
Figura 18. Mapa de Geología de la Cuenca Río Quito	55
Figura 19. Mapas de entables mineros presentes en la cuenca entre 2010 y 2012	56
Figura 20. Mapa de ecosistemas generales	57
Figura 21. Mapas de Bosque-No Bosque	58

Figura 22. Áreas degradadas en Alos Palsar entre 2007-2010 (izquierda) y Sentinel 1 entre 2015 – 2018 (derecha).	58
Figura 23. Modificaciones al cauce por actividad minera cerca a cabecera municipal (Paimadó)	59
<i>Figura 24.</i> Perfil altimétrico del cauce principal	62
Figura 25. Detección de cambio en la red de drenaje entre 2007 y 2010	64
Figura 26. Cambio en la red de drenaje entre 2010 y 2018	65

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Rangos aproximados del Factor de Forma.....	21
Tabla 2. Rangos aproximados de la pendiente media de la cuenca	22
Tabla 3. Rangos aproximados de la pendiente media del cauce principal	23
Tabla 4. Rangos aproximados de la Densidad de Drenaje.....	25
Tabla 5. Fuentes de información secundaria.....	40
Tabla 6. Imágenes descargadas del sensor Alos Palsar	41
Tabla 7. Pre-procesamiento de imágenes Alos Palsar.....	43
Tabla 8. Mosaico del Modelo Digital de Elevaciones	47
Tabla 9 Proceso metodológico de delimitación de la cuenca	50
Tabla 10. Procesos para el cálculo de parámetros generales de la cuenca.....	53
Tabla 11. Parámetros geomorfológicos de la cuenca en los años 2007, 2010 y 2018	61
Tabla 12. Clasificación de grados de pendientes	63

Introducción

La evolución geomorfológica de los cauces responde a reajustes frente a las perturbaciones de los procesos y funciones del sistema, siendo clave entre ellos la alteración de los flujos sedimentarios. Los ríos y corredores ribereños son, para muchos autores, los espacios más dañados y amenazados del planeta. Todos los impactos sobre el sistema fluvial, sean directos sobre el cauce o indirectos sobre cuencas y vertientes o diferidos en el tiempo, cuentan con respuesta en el funcionamiento hidrológico y geomorfológico del sistema y en sus propias morfologías de cauce y riberas. Los cursos de agua han jugado siempre un importante papel en el desarrollo de las actividades humanas (Ollero et al., 2007). Y la cuenca del río Quito, no es ajena a esta afirmación, pues aproximadamente desde el año 2000, ha sido presionada por la actividad minera, intensificándose fuertemente desde 2007 con técnicas de extracción mecanizada. El Consejo Comunitario de Paimadó (2011), manifiesta que a pesar de las medidas tomadas por la autoridad ambiental CODECHOCO, va en aumento la presencia de entables mineros y las presiones sobre el cauce principal y sus afluentes, afectando fuertemente la fauna, flora, el paisaje y la geomorfología de la cuenca. Una de las principales limitantes que se tiene en la región es la falta de información e instrumentos orientadores para la toma de decisiones (GEF, PNUD, WWF, & MADS, 2014). Teniendo en cuenta que la teledetección y los sistemas de información geográfica, brindan herramientas de análisis que permiten no sólo modelar las cuencas hídricas e identificar las posibles alteraciones, sino que también generan insumos para la ordenación, manejo de las cuencas y entre otros aspectos para establecer protocolos de monitoreo que sirvan de apoyo a estrategias de restauración, se considera necesario el desarrollo de este tipo de proyectos con los cuales se creen nuevos conocimientos de las características biofísicas de la cuenca y sobre los efectos que las dinámicas socioeconómicas y culturales ocasionan en

ellas. En concordancia con lo anterior, el documento da cuenta del ejercicio de modelación de la cuenca del río Quito, departamento del Chocó en Colombia, a partir de imágenes Alos Palsar de 12.5 metros de resolución, realizado en el software de análisis espacial ArcGIS 10.5 y SNAP 6.0 para el procesamiento de las imágenes de radar, mediante un proceso metodológico que contempla tres fases: I. Análisis espacial de la actividad minera y su afectación al medio ambiente, II. Delimitación de la cuenca hídrica y III. Cálculo de las características geomorfológicas, identificación de las posibles alteraciones y una aproximación a la cuantificación de las áreas degradadas.

1 Área Problemática

La principal actividad económica en el departamento del Chocó por tradición y ancestralidad es la minería, antes realizada con responsabilidad ambiental, social y productiva, usando técnicas como el barequeo, entendido como el “lavado de arenas por medios manuales sin ninguna ayuda de maquinaria o medios mecánicos y con el objeto de separar y recoger el oro contenido en dichas arenas” realizado principalmente por miembros de una misma familia (Blanco, 2017). Sin embargo, desde los años 80’s con el ingreso de actores que disponían de maquinarias que facilitan la extracción del mineral a gran escala, se fomentó la adopción de técnicas mecanizadas que derivan en impactos negativos sobre el territorio. La cuenca del Río Quito, afluente del Atrato, en el departamento del Chocó, tiene áreas en los sectores de Quibdó, Soledad, Guayabalito, Loma de Barranca, San Isidro, Bocas de Paimadó, Lomas Pueblo Nuevo, Río Pató, Villa Conto y Paimadó; donde actualmente se evidencia el impacto generado por el desarrollo indiscriminado e irracional de la actividad minera; en gran parte por actores ilegales, usando máquinas (dragas, dragones y retroexcavadoras) que están afectando seriamente el medio

ambiente . adicionalmente las comunidades dependen directamente del uso y aprovechamiento de los recursos naturales que les provee la cuenca, agravando la situación socioambiental, tal como se expresa en la Sentencia T622 de 2016, expedido por la corte constitucional, donde se reconoce al río Atrato como sujeto de derechos a la protección, conservación, mantenimiento y restauración a cargo del Estado, fallo proferido gracias a la acción de tutela interpuesta por el Centro de Estudios para la Justicia Social “Tierra Digna” en representación de los Territorios Colectivos y algunas organizaciones de base.

En concordancia con lo anterior se evidencia la ausencia de delimitación y cuantificación de los impactos generados sobre la cuenca del río Quito, tanto en su cobertura vegetal, como en sus características geomorfológicas, como insumos para el cumplimiento de lo establecido por la Sentencia T622 de 2016, donde se especifican focos de acción como: vertimiento de mercurio y otras sustancias químicas tóxicas, contaminación del río Atrato, sus afluentes, los bosques y las fuentes de alimento producida por el desarrollo de actividades de explotación minera ilegal, vulneración de los derechos fundamentales al territorio y a la cultura de las comunidades étnicas y consideraciones en materia de política pública minero-energética.

Por ello nace la pregunta de investigación: **¿Cómo es posible identificar las alteraciones geomorfológicas de la cuenca del río Quito, como consecuencia de las presiones sobre el cauce generadas por la extracción minera de oro de aluvión a cielo abierto?**

2 Objetivos

2.1 Objetivo General

Identificar las alteraciones geomorfológicas de la cuenca del río Quito, como consecuencia de las presiones sobre el cauce principal y sus afluentes, generadas por la extracción minera de oro de aluvión a cielo abierto.

2.2 Objetivos Específicos

- Analizar la dinámica ambiental y minera de la cuenca del Río Quito.
- Evaluar en diferentes temporalidades las características geomorfológicas de la Cuenca del río Quito, afectada por la actividad minera de oro de aluvión a cielo abierto.
- Identificar las alteraciones geomorfológicas de la cuenca del Río Quito.

3 Justificación

La cuenca del río Quito, es uno de los afluentes del río Atrato donde la actividad minera ha generado mayor impacto no sólo a nivel departamental, sino también a nivel nacional, como se resalta en los hallazgos de las Naciones Unidas en 2016, reportado en la publicación “Explotación de oro de aluvión” en donde se manifiesta que *“el 51% del área nacional de EVOA se concentra en las subcuencas de los ríos Quito (con 12.137 ha (15%)), Bajo Nechí (14%) y Directos al Bajo Nechí (12%) -de la Cuenca Nechí y Tamaná (9%) - Directos SanJuan”*(UNODC, 2016)

Los ejercicios de monitoreo de coberturas en Colombia, se realizan a partir del procesamiento digital de imágenes satelitales ópticas, lo que resulta ser una limitante en el departamento del Chocó. Según Rueda & Poveda (2006), este departamento se encuentra localizado geográficamente en una zona con altos niveles de nubosidad, como consecuencia de los vientos trans-ecuatoriales que soplan sobre el océano Pacífico, donde adquieren una trayectoria del oeste hacia el este y penetran al interior de Colombia en forma de una corriente superficial (Rueda & Poveda, 2006). Los sistemas fluviales y la dinámica fluvial, sugieren una integración de los ciclos del agua con la materia sólida y biogeoquímica, que se traducen en un complejo mecanismo hidrológico, geomorfológico y ecológico de movilización o conducción superficial de las aguas continentales, los cuales son elementos claves en la dinámica ecológica, garante de la riqueza y diversidad de estos sistemas naturales. Según Ollero *et al.* (2007), las actividades antrópicas como la extracción minera, son una de las principales causantes de la modificación del funcionamiento hidrológico y de la dinámica fluvial. Las intervenciones indiscriminadas a los cauces y las riberas, ha acarreado en las últimas décadas graves

consecuencias ambientales, como se presenta actualmente en diferentes zonas del departamento del Chocó, especialmente en la cuenca del Río Quito.

Adicionalmente, el gobierno carece de un sistema de información articulado entre autoridades ambientales y mineras, existe un bajo nivel de acceso a la información y a su vez un número limitado de servicios web dispuestos para usar datos alfanuméricos y geográficos de forma automática. Este problema se ve agravado por el hecho de que el MADS, el MME las CARs y los municipios no cuentan con la capacidad suficiente para supervisar las licencias ambientales y para lograr el cumplimiento de las medidas de mitigación y prevención. Este es un problema particularmente crítico en la región del Chocó. (GEF et al., 2014)

En el año 2016 los Territorios Colectivos y las organizaciones de Base de la cuenca del Atrato, apoyados en la organización Tierra Digna, instauraron una acción de tutela que derivó en la creación de la Sentencia T 622-16, donde se deja en manifiesto que: *“El impacto de la minería ilegal en el río es tan fuerte, que hoy es prácticamente imposible determinar el cauce original que alguna vez tuvo el río, sus brazos y sus afluentes, junto a lo que se puede apreciar un crecimiento considerable de zonas deforestadas, dado que la minería ilegal se desarrolla tanto en los ríos -minería aluvial- como en tierra - minería de veta a cielo abierto-, explotaciones que sumadas producen graves procesos de deforestación (...)”*, a lo cual, uno de los mandatos de la Corte Constitucional, es construir un plan para descontaminar las fuentes hídricas del Chocó, comenzando por la cuenca del río Atrato y sus afluentes (de los cuales hace parte el río Quito), recuperar sus ecosistemas y evitar daños adicionales al ambiente en la región. Dicho plan incluirá medidas como: (i) el restablecimiento del cauce del río Atrato, (ii) la eliminación de los bancos de área formados por las actividades mineras y (iii) la reforestación de zonas afectadas

por minería legal e ilegal. Las herramientas de Sistemas de Información Geográfica, son un medio por el cual se podrían generar insumos para la construcción de dicho plan.

4 Marco Teórico

4.1 Marco conceptual

El marco conceptual recoge la información relacionada con las características geomorfológicas de una cuenca, las imágenes de radar y su aplicación en el estudio de cuencas hídricas (Londoño, K. Zambrano, 2009).

4.1.1 Características geomorfológicas de una cuenca.

Según Negret, R. (1982), la cuenca hidrográfica es una unidad natural, claramente delimitada por los divisores topográficos, y definida territorialmente por una superficie común de drenaje, donde interactúan los factores físicos, biológicos y humanos, para conformar un megasistema socio-ecológico. Por su parte, al estar los tributarios conectados el uno al otro y a la corriente principal como parte de los sistemas hidrográficos o patrones de drenaje, describen las formas de las cuencas (Londoño, 2001). Este entramado fluvial posee influencias heredadas de controles estructurales y litológicos que influyen en el grado de disección del paisaje resultante (Ver Figura 1). Las cuencas hidrográficas son sensibles a la deformación tectónica y el patrón de drenajes se ve afectado en mayor o en menor medida según la intensidad de la deformación. Para calcular esta cantidad de deformación existen índices geomorfológicos como el de asimetría y simetría de cuencas (Quijano, 2014). De acuerdo con Gutiérrez (2008), un sistema se puede definir como una combinación significativa de cosas que forman un conjunto complejo, con conexiones, interrelaciones y transferencias de energía y materia entre ellos. En el caso de sistema fluvial no solo implica a los canales fluviales, sino también al conjunto redes de drenaje, zonas de sedimentación de abanicos aluviales, deltas, escorrentías y sedimentos de ladera.

Existen parámetros calculables que consideran la importancia de los procesos del sistema fluvial, para establecer comparaciones y establecer cuencas afines de una forma preliminar. Las propiedades geomorfológicas de una cuenca contienen parámetros generales, de forma, de relieve y las características de la red de drenaje (Ver Figura 1).

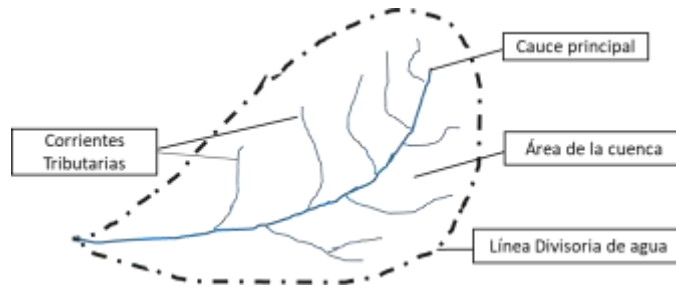


Figura 1. Componentes en una cuenca. Fuente: Elaboración propia

Parámetros generales. Es la información mínima que describe la naturaleza y comportamiento de una cuenca. Datos como: área, longitud, perímetro, ancho y desnivel altitudinal.

El área de la cuenca. es el principal parámetro y es la base para la determinación de otros elementos; por lo general, los caudales crecen a medida que aumenta el área de la cuenca; el crecimiento del área actúa como un factor de compensación de modo que es más común detectar crecientes instantáneos y de respuesta inmediata en cuencas pequeñas que en las grandes cuencas.

La longitud, L. de la cuenca puede estar definida como la distancia horizontal del río principal entre un punto aguas abajo (estación de aforo) y otro punto aguas arriba, donde la tendencia general del río principal corte la línea de contorno de la cuenca.

El ancho, se define como la relación entre el área (A) y la longitud de la cuenca (L), y se designa por la letra W. De forma que:

$$W = \frac{A}{L} \quad (\text{Ecuación 1})$$

El desnivel altitudinal (DA), es el valor de la diferencia entre la cota más alta de la cuenca y la más baja ($DA = H_{Max} - H_{min}$).

4.1.1.1 **Parámetros de forma.** La forma de una cuenca es determinante de su comportamiento hidrológico (cuencas con la misma área, pero de diferentes formas presentan diferentes respuestas hidrológicas – hidrogramas diferentes, por tanto, ante una lámina precipitada de igual magnitud y desarrollo), de ahí que algunos parámetros traten de cuantificar las características morfológicas por medio de índices o coeficientes. Los parámetros de forma principales son: Coeficiente de Gravelius, rectángulo equivalente y coeficiente de Horton, (Ver Figura 2).

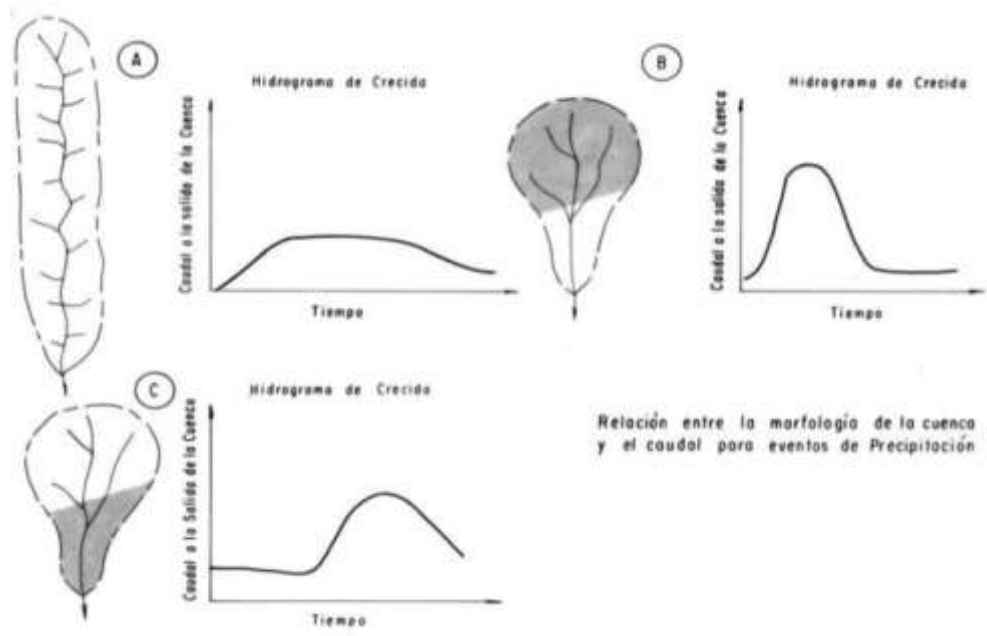


Figura 2. Relación morfología - caudal, para eventos de precipitación Fuente: (Cardona, 2012)

Índice de Compacidad o de GRAVELIUS.

Está definido como la relación entre el perímetro P y el perímetro de un círculo que contenga la misma área A de la cuenca hidrográfica:

$$K = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

La razón para usar la relación del área equivalente a la ocupada por un círculo es porque una cuenca circular tiene mayores posibilidades de producir avenidas superiores dada su simetría. Sin embargo, este índice de forma ha sido criticado, pues las cuencas en general tienden a tener forma de pera.

Factor de forma adimensional de HORTON

Horton ha sugerido un factor adimensional de forma designado como “Rf” que puede deducirse a partir de la ecuación siguiente:

$$Rf = \frac{A}{Lb^2} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Rf factor adimensional de forma de Horton

A área de la cuenca

Lb longitud de la cuenca, medida desde la salida hasta el límite, cerca de la cabecera del cauce principal, a lo largo de una línea recta

Este índice de Horton ha sido usado frecuentemente como indicador de la forma del Hidrograma Unitario (Ver Figura 3).

De acuerdo a los factores de forma, se pueden clasificar las cuencas como:

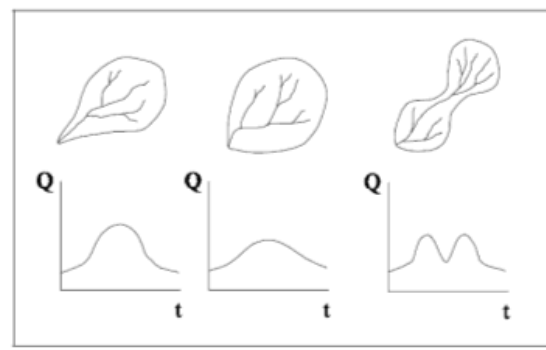


Figura 3. Hidrógramas según forma de la cuenca. Fuente: (Osorio, 2010)

Para entender la forma de la cuenca a partir del factor, existen unos rangos que permiten identificar si es muy alargada o si rodea el desagüe, como se aprecia en la

Tabla 1.

Tabla 1. Rangos aproximados del Factor de Forma

Factor de forma (valores aproximados)	Forma de la cuenca
<0.22	Muy alargada
0.22 a 0.30	Alargada
0.30 a 0.37	Ligeramente alargada
0.37 a 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 a 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 a 0.80	Ensanchada
0.80 a 1.20	Muy ensanchada
>1.20	Rodeando el desagüe

Fuente: Pérez, 1979

4.1.1.2 *Parámetros de relieve*

Altura media de la cuenca (H)

La altura media, H, es la elevación promedia referida al nivel de la estación de aforo de la boca de la cuenca.

Pendiente media de la cuenca.

La pendiente media constituye un elemento importante en el efecto del agua al caer a la superficie, por la velocidad que adquiere y la erosión que produce. Se calcula como media ponderada de las pendientes de todas las superficies elementales de la cuenca en las que la línea de máxima pendiente se mantiene constante. En la tabla 2, se presentan los rangos aproximados de la pendiente media de la cuenca.

$$S = \frac{DA}{L} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Tabla 2. Rangos aproximados de la pendiente media de la cuenca

Pendiente media (%)	Terrenos
0 a 2	Llano
2 a 5	Suave
5 a 10	Accidentado medio
10 a 15	Accidentado
15 a 25	Fuertemente accidentado
25 a 50	Escarpado
>50	Muy escarpado

Fuente: (Pérez, 1979)

Perfil altimétrico del cauce principal

El perfil altimétrico es simplemente el gráfico de altura en función de la longitud a lo largo del río principal. Con base en la forma del perfil altimétrico del río, se pueden inferir rasgos generales de la respuesta hidrológica de la cuenca en su expresión de la hidrógrafa, o sea, la variación del caudal con el tiempo. Generalmente, cuencas con pendientes altas en el cauce principal tienden a tener hidrógrafas más picudas y más cortas que cuencas con pendientes menores, como se indica en la Figura 4.

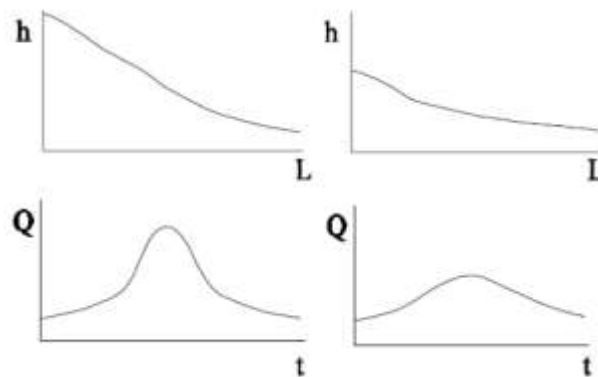


Figura 4. Hidrógrafas según el perfil altimétrico del cauce principal. Fuente: (Osorio, 2010)

Pendiente media del cauce principal

La influencia de la configuración topográfica en el proceso de erosión de una cuenca y en la formación de descargas altas, se presenta de acuerdo a los mayores o menores grados de pendiente (López Cárdenas de Llano, 1998), como lo indica la Tabla 3. Existen varios criterios para definir este parámetro (Córdova, 2016). A continuación, se muestra la relación del criterio asumido:

$$lc = \frac{HM - Hm}{L} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Lc: Pendiente media del cauce en %

HM y Hm: Altitud máxima y mínima del cauce en msnm

L: Longitud del cauce en Km

Tabla 3. Rangos aproximados de la pendiente media del cauce principal

Pendiente media del cauce principal (%)	Clases
1 a 5	Suave
6 a 11	Moderado
12 a 17	Fuerte

Fuente: IBAL S.A., 2009

Coefficiente de Torrencialidad

Este parámetro resulta de la relación entre el número de cauces de agua de orden uno y el área de la cuenca. A mayor número de cauces de orden uno y menor área, la torrencialidad de la cuenca será mayor (Romero & López, 1987). Este resultado significa que el agua recorre muy poco para dirigirse a los cauces y la velocidad de descarga es mayor (Córdova, 2016). Su relación es la siguiente:

$$Ct = \frac{Hmed}{A} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Cm: Coeficiente de torrencialidad
Hmed: Altitud media de la cuenca en msnm
A: área de la cuenca en Km²

4.1.1.3 Caracterización de la red de canales

Jerarquización de la red fluvial

La jerarquización permite tener un mejor conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca. El orden se relaciona con el caudal relativo del segmento de un canal. Hay varios sistemas de jerarquización, siendo los más utilizados el de Horton (1945) y el de Strahler (1952), (Ver Figura 5)

ϕ.

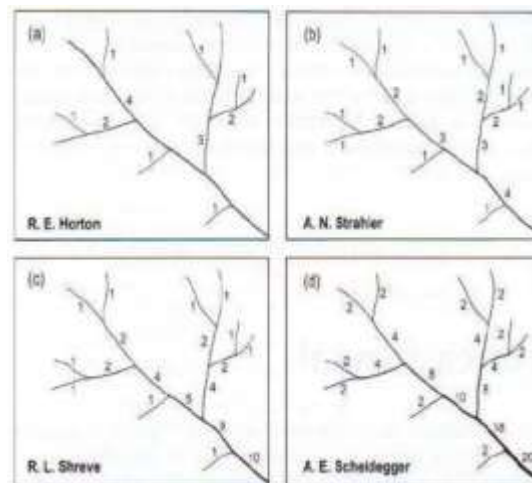


Figura 5. Métodos de ordenación de los segmentos y cursos fluviales. Fuente: (Gutiérrez, 2008)

Densidad de drenaje

Se calcula dividiendo la longitud total de las corrientes de la cuenca por el área total

$$Dd = \frac{\sum li}{A} \quad (\text{Ecuación 7})$$

L: \sum longitud de las corrientes efímeras, intermitentes y perennes de la cuenca en km.

A: superficie de la cuenca en km²

Valores bajos de Dd , por lo común, están asociados con regiones de alta resistencia a la erosión, muy permeables, y de bajo relieve. Valores altos son encontrados en regiones de suelos impermeables, con poca vegetación, de relieve montañoso. Los patrones de drenaje también son fuente importante de información sobre la cuenca.

Tabla 4. Rangos aproximados de la Densidad de Drenaje

Densidad de drenaje (valores aproximados)	Clases
0.1 a 1.8	Baja
1.9 a 3.6	Moderada
3.7 a 5.6	Alta

Fuente: IBAL, 2009

4.1.1.4 Modelación hidrográfica a partir de imágenes SAR

Conceptualmente, un modelo digital de elevaciones es una estructura de datos numérica que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. Existen diferentes sensores que mediante técnicas de teledetección permiten describir la superficie de la tierra.

Entre los sensores remotos que ofrecen datos de elevación de la superficie terrestre, con plataforma de acceso gratuito y cobertura global, están el sistema de radar Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM), uno de los más ampliamente utilizados, y el sistema ASTER (Advance Space Borne Thermal Emisión and Reflection Radiometer), que destacan por su alta resolución espacial y disponibilidad global (Burgos, 2012).

Del mismo modo se encuentran los productos de Alos Palsar, con corrección radiométrica y geométrica, (RTC, por sus siglas en inglés), resultantes de un proyecto de Alaska Satellite Facility que hace que los datos SAR sean accesibles para una comunidad más amplia de usuarios. El proyecto corrige la geometría del radar de apertura sintética (SAR) y la radiometría, y presenta los datos en el formato GeoTIFF compatible con GIS. El lanzamiento de los nuevos

productos ALOS PALSAR RTC comenzó en octubre de 2014 y se completó un año después. Los datos incluidos en el proyecto RTC son escenas Fine Beam y Polarimétricas, en todas las áreas terrestres globales, excepto la Antártida, Groenlandia, Islandia y el norte de Eurasia (ASF, 2014). Los DEM utilizados en éste proyecto son de 12.5 metros derivados de las imágenes Alos Palsar de alta de resolución.

4.1.1.5 Aplicaciones de los sensores de radar de apertura sintética en el estudio de impactos por minería

Para ejercicios o aplicaciones derivados de topografía, es útil el uso del modelo de elevación digital DEM elaborado a partir de imágenes de radar de apertura sintética a través de técnicas interferométricas (InSAR), con una resolución vertical adecuada de 5 m, se puede utilizar como datos suplementarios para proporcionar información sobre las depresiones de la superficie del suelo presentes en las minas de pequeña escala. Además, el DEM puede usarse para generar una curva hipsométrica de cada subcuenca, así como desarrollar mapas de variables que afectan los rendimientos de los sedimentos, como la pendiente, el área de captación y la hidrología. La curva hipsométrica y / o la integral hipsométrica proporciona información sobre la edad de una cuenca de drenaje. En términos generales, es clave en el campo de la geomorfometría. Adicionalmente, ayudan a identificar los movimientos litológicos dominantes en la cuenca de drenaje que determinan su configuración y se pueden usar para evaluar el potencial de una cuenca hidrográfica para producir sedimentos e identificar el factor topográfico dominante en función de su edad que causa dicha cantidad de sedimentos. (Celso, 2017).

Por otro lado, la aplicación de InSAR en la ciencia de la Tierra y los problemas relacionados con el medio ambiente, ha recibido mucha atención gracias a los espectaculares resultados logrados en varios campos, algunos de los cuales incluyen: el monitoreo del hundimiento de la tierra, la construcción de modelos digitales de elevación de alta precisión

(DEM) de la superficie de la Tierra y estudios de impacto ambiental de subsidencia minera. Aunque la mayoría de las aplicaciones publicadas hasta la fecha han sido campos de deformación de alta velocidad en períodos cortos, recientemente se ha demostrado que los campos de deformación a baja velocidad como los originados por las actividades de desagüe en las operaciones mineras, se pueden obtener imágenes a lo largo de períodos de uno o más años, según las distancias de referencia orbitales, la cobertura vegetal y el clima de la región fotografiada (Woldai & Taranik, 2008).

4.1.1.6 Herramienta SIG para la modelación hidrológica

El software ArcGIS tiene unas herramientas de Hidrología, la cuales se utilizan para modelar el flujo de agua a través de una superficie. El principal insumo para su aplicación es el modelo digital de elevaciones DEM.

Basin (Cuenca): Crea un ráster que delinea todas las cuencas de drenaje.

Fill (Relleno): Rellena sumideros en un ráster de superficie para quitar pequeñas imperfecciones en los datos.

Flow Accumulation (Acumulación de flujo): Crea un ráster de flujo acumulado para cada celda. Opcionalmente, puede aplicar un factor de peso.

Flow Direction (Dirección del flujo): Crea un ráster de dirección de flujo desde cada celda hasta su vecina con la pendiente descendente más empinada.

Flow Length (Longitud de flujo): Calcula la distancia aguas arriba o aguas abajo o la distancia ponderada a lo largo de la ruta de flujo para cada celda.

Sink (Sumidero): Crea un ráster que identifica todos los sumideros o áreas de drenaje interno.

Stream Order (Clasificación de arroyos): Asigna un orden numérico a los segmentos de un ráster que representan las ramas de una red lineal.

Stream to feature (Red de drenaje raster a vectorial): Convierte un ráster que representa una red lineal a entidades que representan la red lineal.

Watershed (Cuenca hidrográfica): Determina el área de contribución por sobre un conjunto de celdas de un ráster.

4.1.1.7 Herramienta de detección de cambio de la red de drenaje

Teniendo en cuenta que la red de drenaje espacialmente tiene una estructura lineal, para el análisis multitemporal, se tendrá en cuenta la herramienta de detección de cambio de entidades, la cual encuentra dónde coinciden espacialmente las capas vectoriales comparadas, y detecta los cambios espaciales, los cambios en atributos o ambas, así como la inexistencia de cambios, y genera una clase de entidad de salida que contiene entidades de actualización coincidentes con información sobre los cambios, las entidades de actualización sin coincidencia y las entidades de base sin coincidencia.

El proceso de comparación se hace primero según la *distancia* de búsqueda y la *coincidencia* de atributos en este caso el orden de drenaje (ver Figura 6). El atributo de salida *Change_type* incluye el tipo de cambio de cada segmento y puede tener las siguientes opciones:

- ✓ **S** para espacial, indica una entidad de actualización coincidente con un cambio espacial.
- ✓ **A** para atributo, indica una entidad de actualización coincidente con un cambio en atributos.
- ✓ **SA** para espacial y atributo, indica una entidad de actualización coincidente con cambios espaciales y en atributos.

- ✓ **S_LD** para el cambio espacial, así como para direcciones de líneas opuestas.
- ✓ **SA_LD** para cambios espaciales y de atributo, así como para direcciones de líneas opuestas.
- ✓ **NC** indica que no hay cambios; una entidad de actualización coincidente sin cambios.
- ✓ **N** para nuevo; indica una entidad de actualización sin coincidencia nueva en los datos de base.
- ✓ **D** para eliminación; indica una entidad de base sin coincidencia que tal vez deba eliminarse de los datos de base.



Figura 6. Funcionamiento de la herramienta detección de cambio de entidades. Fuente: Adaptado de Arcgis 10.5

4.2 Marco Referencial

4.2.1 La actividad minera y su afectación al medio ambiente

Cuando las áreas afectadas por minería a cielo abierto son adecuadas geomorfológicamente en términos de estabilidad, rugosidad de los taludes, y manejo de las aguas de escorrentía superficial, la posibilidad de un restablecimiento natural será mayor, así como el éxito de cualquier proceso de restauración ecológica. Dado que las áreas disturbadas son más susceptibles a los efectos de los factores limitantes y tensionantes, una vez ha concluido el proceso de explotación de materiales a cielo abierto, deben ser neutralizados para asegurar éxito del proyecto de restauración ecológica (Barrera, y otros, 2009).

Los efectos de las respuestas morfológicas inducidas por la minería incluyen la sedimentación, que constituye un evento geomórfico, hidrológico y de calidad del agua. El gran volumen de sedimento depositado en los ríos, puede causar una degradación en los canales. La respuesta morfológica a procesos como la degradación, puede persistir durante períodos mucho más prolongados de lo que suponen los ingenieros fluviales, en particular, quienes a menudo planifican esquemas de desarrollo basados en el supuesto de que los canales fluviales se han estabilizado. Aproximadamente, el 70% de todo el material excavado en empresas mineras en todo el mundo son desechos de roca y relaves, y la minería de superficie es la mayor parte de los desechos (Akiwumi & Butler, 2007).

El suelo es el compartimento clave para conseguir la sostenibilidad del ecosistema restaurado. Pero también el compartimento geomorfológico condiciona notablemente el auto-mantenimiento de los ecosistemas restaurados, por influir en el suministro de agua y nutrientes a las plantas y determinar la intensidad de la erosión, mecanismo de explotación abiótica que puede afectar negativamente al establecimiento y desarrollo de la vegetación. En efecto, la

erosión hídrica superficial disminuye la disponibilidad de agua para las plantas (al reducir el espesor de suelo, formarse costras y redes de regueros) y extrae nutrientes, propágulos (rizomas, semillas) e incluso organismos (microorganismos, principalmente; Young, 1992). El modelo de erosión RUSLE 1.06, puede ser aplicado para diseñar la topografía de laderas (pendiente, longitud; terrazas, surcos) compatible con el desarrollo del suelo y la vegetación (Barrera, y otros, 2009). Por tanto, el establecimiento de planes de manejo ambiental asociados a la actividad minera, es necesario para conservar el equilibrio natural de las cuencas hídricas.

4.2.2 La minería en la subcuenca del río Quito

A partir de 1980, se precipitó un proceso de transformación social en las comunidades asentadas en la cuenca del río Quito y en el resto de la región, motivado por el elevado precio de los metales en el mercado internacional, que ameritó la apertura de diversas minas. Con ello se alteró la estructura de sostenimiento familiar, pues la minería pasó a ocupar un lugar central como actividad productiva de las comunidades negras. La extracción aurífera a lo largo del cauce del río Quito, se desarrolló por medio de dragas de succión de gran tamaño, que arribaron a la zona de manera progresiva desde 1999 hasta el día de hoy. En el periodo comprendido entre 2004 y 2009, la explotación por medio de dragas tuvo su período más intenso, a tal punto que miembros de la comunidad han señalado que aproximadamente 27 dragas explotaron las aguas del río al mismo tiempo. Cada draga extrae un promedio de 300 gramos de oro diarios, con 20 horas diarias de actividad de succión (Tierra Digna, 2011).

Dentro de las áreas identificadas como críticas se encuentran dos sectores: San Isidro y Paimadó, que presentan las siguientes condiciones:

- a. Sector de San Isidro: Se resaltan los daños ambientales como la activación de los procesos de erosión de orilla aguas abajo, al igual que entre las poblaciones de la Loma y Paimadó;

adicionalmente, con el desvío del cauce, no sólo se altera la dinámica fluvial de la fuente hídrica por el cambio de la pendiente de manera abrupta, sino que también se dejan aisladas viviendas de los pobladores del área por el no tránsito del transporte fluvial normal en los cursos alterados (Ver Figura 7).



Figura 7. Áreas degradadas en cauce principal de la cuenca del río Quito. Fuente: Kienyke y minuto30

- b. Sector de Paimadó: Hay reporte de destrucción de cerca de 186 viviendas en el sector de la cabecera de la población de Paimadó, causados por procesos activos de erosión de orilla debido al desvío del cauce del río originado en la destrucción de tres meandros que controlaban la energía de las aguas del río Quito antes de llegar a la población de Paimadó. La explotación minera realizada aguas arriba de la población de Paimadó, alteró de manera grave el paisaje por la pérdida total del suelo y la vegetación de aproximadamente 19 hectáreas de bosque natural en los meandros existentes entre la desembocadura de la quebrada Manuel Marín y 1.5 Km aguas arriba de la desembocadura de la quebrada Chigorodó.

La autoridad ambiental de la región CODECHOCO y el IIAP, han evaluado la problemática minera y han identificado que los impactos generados, tienen una serie de causas principales. Entre los que se encuentran: Carencia total de estudios de prospección y exploración

minera que permitan una adecuada evaluación del depósito y planeación de la explotación y la falta de estudios que permitan identificar áreas de alta fragilidad, así como el desconocimiento generalizado de las técnicas de explotación y beneficio, aplicados a las actividades de minería aluvial, que permitan la sostenibilidad de las explotaciones mineras, debilidad de la autoridad ambiental para hacer cumplir la regulación vigente, falta de apoyo a las autoridades municipales para hacer cumplir las medidas de prevención impuesta por ellas y la suspensión de la minería ilegal de acuerdo al artículo 306 del código de Minas (ley 685/01). Para estas entidades desde la ilegalidad de la actividad se imposibilita la implementación de planes de manejo que consideren medidas de prevención, mitigación y corrección de la degradación ambiental como son: laguna de sedimentación, uso de destiladores de mercurio (retorta), preservación del suelo y capa vegetal y adelanto de programas de revegetalización, silvopastoriles y piscícolas.

Adicionalmente, existe un desconocimiento por parte de las comunidades locales sobre la importancia de la preservación del medio ambiente, para el mejoramiento de las condiciones de vida a los habitantes del área (WWF, 2014).

En este sentido, el Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico, ha señalado que: “El aprovechamiento de los metales preciosos (Oro y Platino), han sido el sustento socio-económico de un significativo número de las familias afrocolombianas (situación que aún persiste), no obstante la gran presión que hoy desarrollan entables mineros mecanizados de neocolonos, atentan lesivamente con el equilibrio socio ambiental y económico de los pueblos negros mineros en el Chocó Biogeográfico” (Tierra Digna, 2011). En tal medida, urgen decisiones para la conservación y recuperación ecosistémica, pero principalmente para suspender toda actividad extractiva sin regulación y manejo ambiental.

4.3 Marco Normativo

Con la expedición de la Ley 99 de 1993 (la cual crea el Ministerio del Medio Ambiente y organiza el SINA), concede al Ministerio del Medio Ambiente, entre una de sus funciones, la expedición y actualización del estatuto de zonificación del uso adecuado del territorio para su apropiado ordenamiento, las regulaciones nacionales sobre uso del suelo en lo concerniente a los aspectos ambientales, pautas para el ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas y demás áreas de manejo especial. (Art. 5º numeral 12). En concordancia con lo anterior, el Decreto 1277 del 21 de junio de 1994 y el Decreto 2241 de 1995 le asignan al IDEAM la función de “establecer las bases técnicas para clasificar y zonificar el uso del territorio nacional para los fines de la planificación y el ordenamiento ambiental del territorio”. Dentro de otras funciones asignadas al IDEAM se constituye en “ser fuente oficial de información científica en las áreas de su competencia y autoridad máxima en las áreas de hidrología y meteorología; además de suministrar al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), a las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) y entidades ambientales territoriales, los criterios para clasificar y zonificar el uso del territorio nacional para los fines de planificación ambiental”.

A su vez, en el decreto 1729 de 2002. Se establece a través del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM la “Guía técnico científica para la ordenación y manejo de cuencas hidrográficas en Colombia”, con el objetivo de orientar la ordenación de cuencas entendida esta como la planificación del uso y manejo sostenible de los recursos naturales renovables, de manera que se consiga mantener o restablecer un adecuado equilibrio

entre el aprovechamiento social y económico de tales recursos y la conservación de la estructura físico-biótica de la cuenca y particularmente de sus recursos hídricos (IDEAM, 2004).

Así mismo, en el Decreto 291 de 2004, por el cual se modifica la estructura del IDEAM, se define como función de la Subdirección de Hidrología “aportar los conocimientos del estado y evolución del recurso hídrico como base para zonificación y ordenamiento ambiental del territorio”, también la de investigar y determinar el origen, distribución, oferta, demanda y calidad del recurso hídrico del país. A su vez, la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) de 2010 del MADVT (hoy MADS) orienta las acciones encaminadas al ordenamiento territorial y la planificación ambiental del país soportada en la estructura hidrográfica de las cuencas definida por el IDEAM. Más recientemente, el artículo 4º del Decreto 1640 del 2012 adopta la zonificación hidrográfica del IDEAM para la “planificación, ordenación y manejo de cuencas hidrográficas y acuíferos” (IDEAM, 2013).

En materia minera, Código de Minas -ley 685 de 2001- en esta disposición, se establece que el Ministerio de Minas y Energía (MME) es la máxima autoridad minera en el país y su responsabilidad está enmarcada en la administración de los recursos naturales no renovables, en la cual se asegure su mejor y mayor utilización; por lo tanto el MME debe garantizar la protección de los recursos naturales y del medio ambiente, velando por su conservación y restauración, en concordancia con los principios del desarrollo sostenible y de las políticas ambientales emanadas de la autoridad ambiental competente.

Con relación a la explotación minera en la subcuenca del río Quito, vertiente del río Atrato, el 19 de noviembre de 2015, el Tribunal Administrativo de Cundinamarca falló una acción popular a favor de varias comunidades étnicas de la cuenca del río Quito (afluente del Atrato), con el fin de lograr la protección de sus derechos colectivos al medio ambiente, al agua

y a los recursos naturales. Esta sentencia, fue clave para el proceso de la Sentencia T-622/16, de la corte constitucional, donde se reconoce al río Atrato (Chocó), su cuenca y afluentes como una entidad sujeta de derechos, pues la Sala Sexta de Revisión de la Corte Constitucional, consideró necesario el amparo a los derechos fundamentales a la vida, a la salud, al agua, a la seguridad alimentaria, al medio ambiente sano, a la cultura y al territorio de las comunidades étnicas (negras e indígenas) que habitan la cuenca del río Atrato y sus afluentes, que vienen siendo víctimas de la explotación minera ilegal en el departamento de Chocó. Asimismo, declaró que tal vulneración es imputable a las entidades del Estado colombiano accionadas por su conducta omisiva al no proveer una respuesta institucional idónea, articulada, coordinada y efectiva para enfrentar los múltiples problemas históricos, socioculturales, ambientales y humanitarios que aquejan a la región y que en los últimos años se han visto agravados por la realización de actividades intensivas de minería ilegal -cuyos efectos- terminan impactando la política minero-energética estatal. Uno de los objetivos de esta declaratoria no es sólo proteger a la entidad natural sino a las presentes y futuras generaciones de colombianos cuya existencia física, cultural y espiritual también depende del buen estado del río y de los recursos naturales en general (Sentencia T 622, 2016).

5 Metodología

5.1 Tipo de Trabajo

Este proyecto, contiene un conjunto de aplicaciones de herramientas de análisis espacial, el cual se adelantará en 3 fases encaminadas a la descripción de la dinámica minera, la delimitación de la cuenca del río Quito y el análisis de las características geomorfológicas. Para evaluar las áreas degradadas se utilizaron imágenes de radar Alos Palsar FBS y Sentinel 1 en formato Single Look Complex, con las cuales se generó una capa de áreas degradadas entre 2015 y 2018.

Las imágenes de radar fueron procesadas en el software SNAP 6, desarrollado por la Agencia Espacial Europea ESA, donde se realizó una calibración, corrección radiométrica y geométrica, así como la aplicación del filtro speckle o de eliminación del moteado para luego generar la composición RGB con las imágenes de las dos temporalidades como entrada. El análisis espacial se realizó en ArcGIS 10.5, donde se utilizaron las herramientas del módulo Hydrology y la herramienta de detección de cambio de entidades.

5.2 Área de Estudio

La cuenca del río Quito, tiene por cauce principal una vertiente del río Atrato en el departamento del Chocó, su corriente principal va de sur a norte, hasta llegar a su desembocadura en el costado occidental de la capital departamental (Quibdó), en las coordenadas (76°39'58.585"W, 5°41'11.872"N). Cuenta con un gradiente altitudinal entre 41 msnm y 537 msnm, con un área estimada de 1672.41 Km², de acuerdo a la zonificación realizada por el IDEAM en 2013, a escala 1:500.000 (Ver Figura 8).

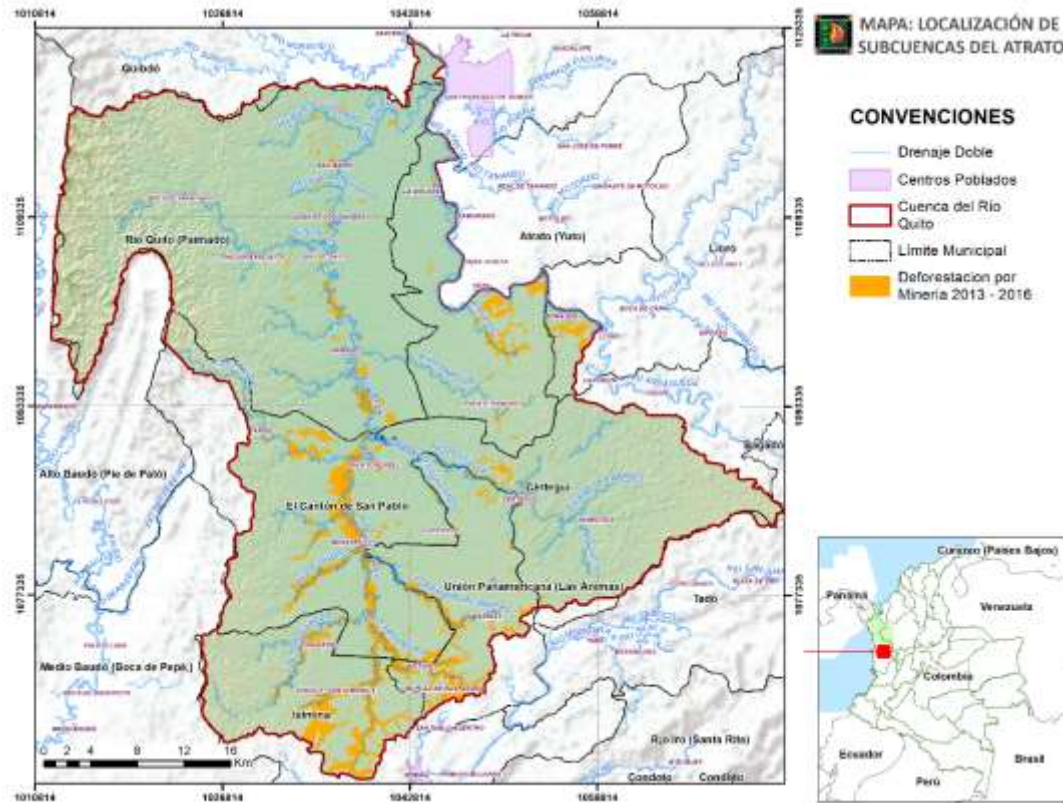


Figura 8. Cuenca del río Quito. Fuente: Elaboración propia

5.3 Método

La metodología aplicada, contiene tres fases fundamentales, las cuales permiten comprender la dinámica minera de la cuenca, así como su delimitación y cálculo de los parámetros geomorfológicos, para finalmente hacer un análisis del cambio generados entre los años 2007, 2010 y 2018 (Ver Figura 9).

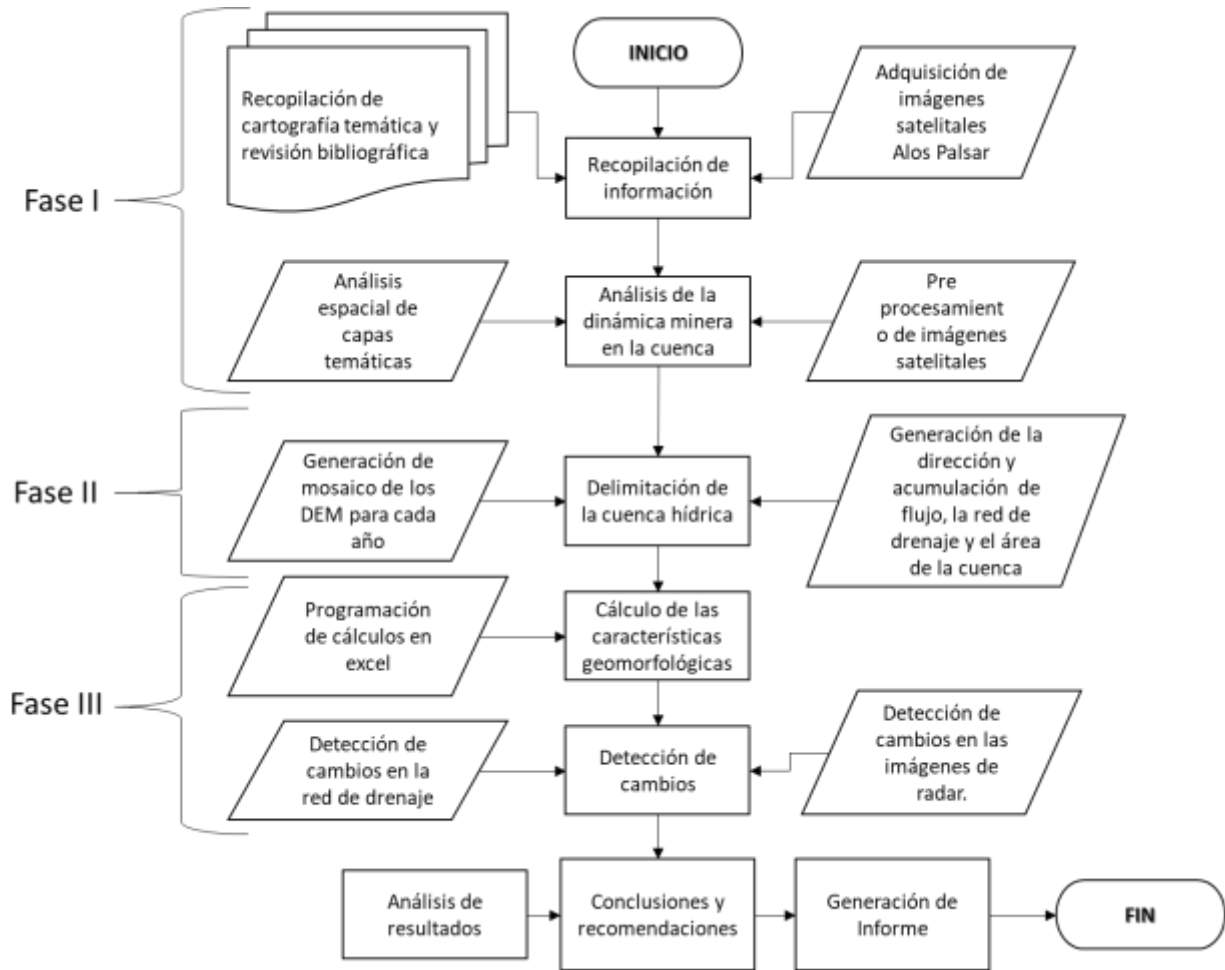


Figura 9. Diagrama de proceso metodológico. Fuente: Elaboración propia

5.3.1 Fase I. Análisis de la actividad minera en la cuenca del Río Quito.

5.3.1.1 Recopilación de información cartográfica de la degradación de la cuenca por minería

Para el análisis de la actividad minera en la cuenca del Río Quito, se dispuso de capas temáticas de Geología, Mapa de Bosques, Coberturas y Entables Mineros, descargados de diferentes fuentes oficiales en Colombia, como el Servicio Geológico Colombiano - SGC, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico - IIAP y el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt - IAVH (Ver Tabla 5).

Tabla 5. Fuentes de información secundaria

Capa temática	Fuente
Geología	SGC, 2015.
Cartografía Base (escala 1:100.000)	IGAC, 2017
Zonificación Hidrográfica	IDEAM, 2013
Mapa de Bosque	IDEAM, 2016
Ecosistemas Generales de Colombia	IAVH, 2017
Entables Mineros	IIAP, 2015

Fuente: Elaboración propia

Las anteriores capas fueron superpuestas entre sí en el programa ArcGIS 10.5, para comprender la distribución espacial de las coberturas presentes en la imagen y para entender las presiones que se generan sobre el cauce y los afluentes del río Quito.

5.3.1.2 Pre-procesamiento de imágenes de radar Alos Palsar del área de estudio

Las imágenes utilizadas, se descargaron de la página de Alaska Satellite Facility¹, en la cual hay disponibles imágenes de sensores remotos de radar de apertura sintética como Alos Palsar y Sentinel (Ver Figura 10). Para la descarga se ingresa en la página y con un recuadro se dibuja el área de interés, se especifica la fecha y el sensor del cual se quiere obtener las imágenes, las cuales se pueden pre visualizar, una vez identificadas las imágenes se descarga un archivo ejecutable en Python que realiza la descarga del lote de imágenes.

¹ El enlace de la página es: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>, la cual requiere de un registro para descarga de imágenes, el acceso a la información es gratuita, salvo algunas imágenes que requieren de una solicitud especial, que incluye una propuesta de investigación.

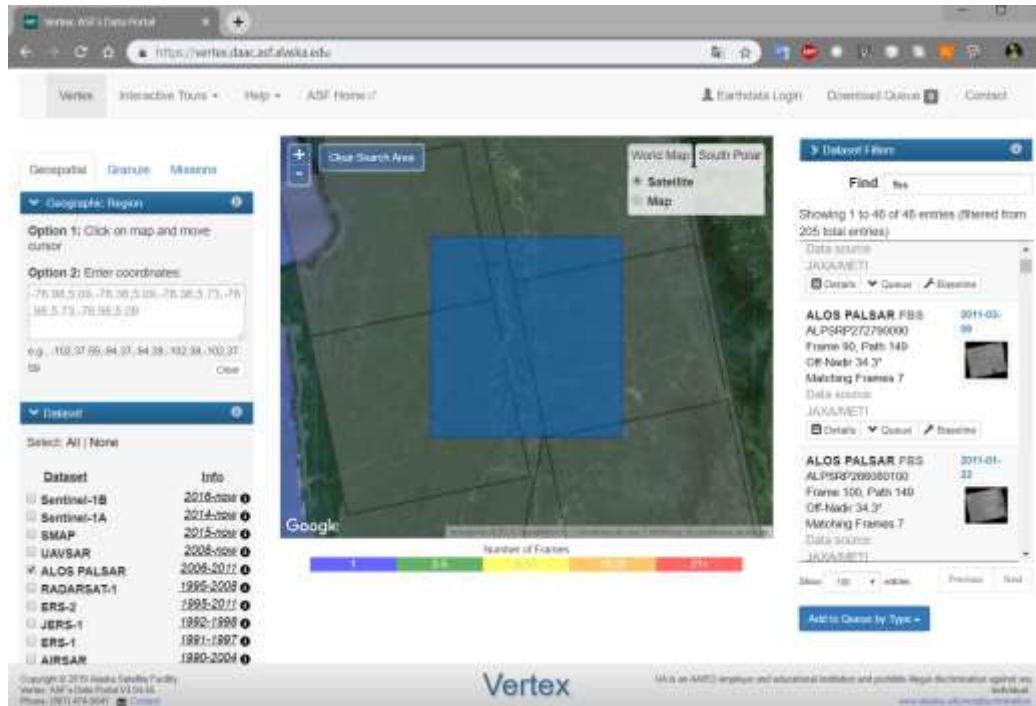


Figura 10. Plataforma de descarga de imágenes de radar. Fuente: Propia

Se descargaron en total 8 imágenes, con las cuales se generaron los mosaicos tanto del DEM, como de las imágenes a ser interpretadas, las cuales cuentan con **polarización HH**, forma de **captura ascendente** y **frecuencia de onda L**, como se ve en la Tabla 6. Para la selección de las imágenes se tuvo en cuenta que en la fecha de captura fuera temporada de poca lluvia y coincidiera en las dos temporalidades, las cuales corresponden a períodos entre diciembre y enero, que es cuando menos lluvias se reportan en las estaciones meteorológicas próximas a la cuenca.

Tabla 6. Imágenes descargadas del sensor Alos Palsar

Imagen	Frame	Path	Fecha	Sensor
AP_10081_FBS_F0080_RT1	80	150	24-12-2010	Alos
AP_10081_FBS_F0090_RT1	90	150	24-12-2010	Palsar
AP_10081_FBS_F0100_RT1	100	150	24-12-2010	
AP_10504_FBS_F0090_RT1	90	149	14-01-2011	
AP_10081_FBS_F0080_RT1	80	150	16-12-2007	
AP_10081_FBS_F0090_RT1	90	150	16-12-2007	
AP_10081_FBS_F0100_RT1	100	150	16-12-2007	

Imagen	Frame	Path	Fecha	Sensor
AP_10504_FBS_F0090_RT1	90	149	14-01-2008	
S1A_IW_GRDH_1SDV_20150512T232150_20150512T232215_005895_00797F_37B9	1196	48	2015-05-12	Sentinel 1A
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180503T105054_20180503T105124_021739_02581F_9E82	574	142	2018-05-03	

Fuente: Propia

La imagen es presentada en diferentes niveles de procesamiento, para el ejercicio se utilizaron el **nivel 1.5** de Alos Palsar para identificar las áreas degradadas y el estado del cauce de las fuentes hídricas, para la delimitación de la cuenca y el cálculo de características geomorfológicas se usaron en el **nivel de alta resolución (Hi-Res Terrain Corrected)**, pues éstas incluyen un modelo de elevación del terreno de 12.5m de resolución (archivo .dem) como se aprecia en la Figura 11, en el caso de las Sentinel 1A el nivel GRD que es de alta resolución .

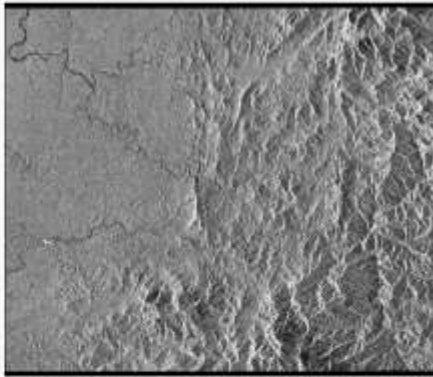
Dataset: ALOS
Granule: ALPSRP272790090

Granule Details
ALOS PALSAR

- Acquisition Date: 2011-03-09
- Beam mode: FBS
- Path: 149
- Frame: 90
- Ascending/Descending: Ascending
- Polarization: HH
- Off Nadir Angle: 34.3°
- Faraday rotation: 4.14°
- Absolute Orbit: 27279
- Frequency: L-Band

ⓘ Accessing this data requires you to log in. Some datasets also require a proposal or agreement with a ESA which is presented after log in.

Products	Download
Level 1.0 (459.00 MB)	+ Queue Download
Level 1.1 Complex (1.20 GB)	+ Queue Download
Level 1.5 Image (1811.98 MB)	+ Queue Download
Hi-Res Terrain Corrected (260.34 MB)	+ Queue Download
Low-Res Terrain Corrected (52.84 MB)	+ Queue Download
GoogleEarth KMZ (6.67 MB)	+ Queue Download



Full Resolution Browse Image

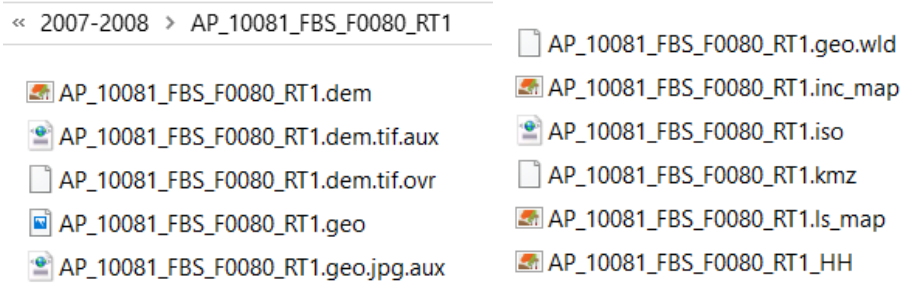


Figura 11. Estructura de la carpeta de una imagen de alta resolución de Alos Palsar

Una vez descargadas las imágenes Alos Palsar, se procede a procesarlas en el software snap, para poder interpretar las áreas degradadas en una imagen con composición a color, en función de las dos temporalidades (Ver Tabla 7).

Tabla 7. Pre-procesamiento de imágenes Alos Palsar

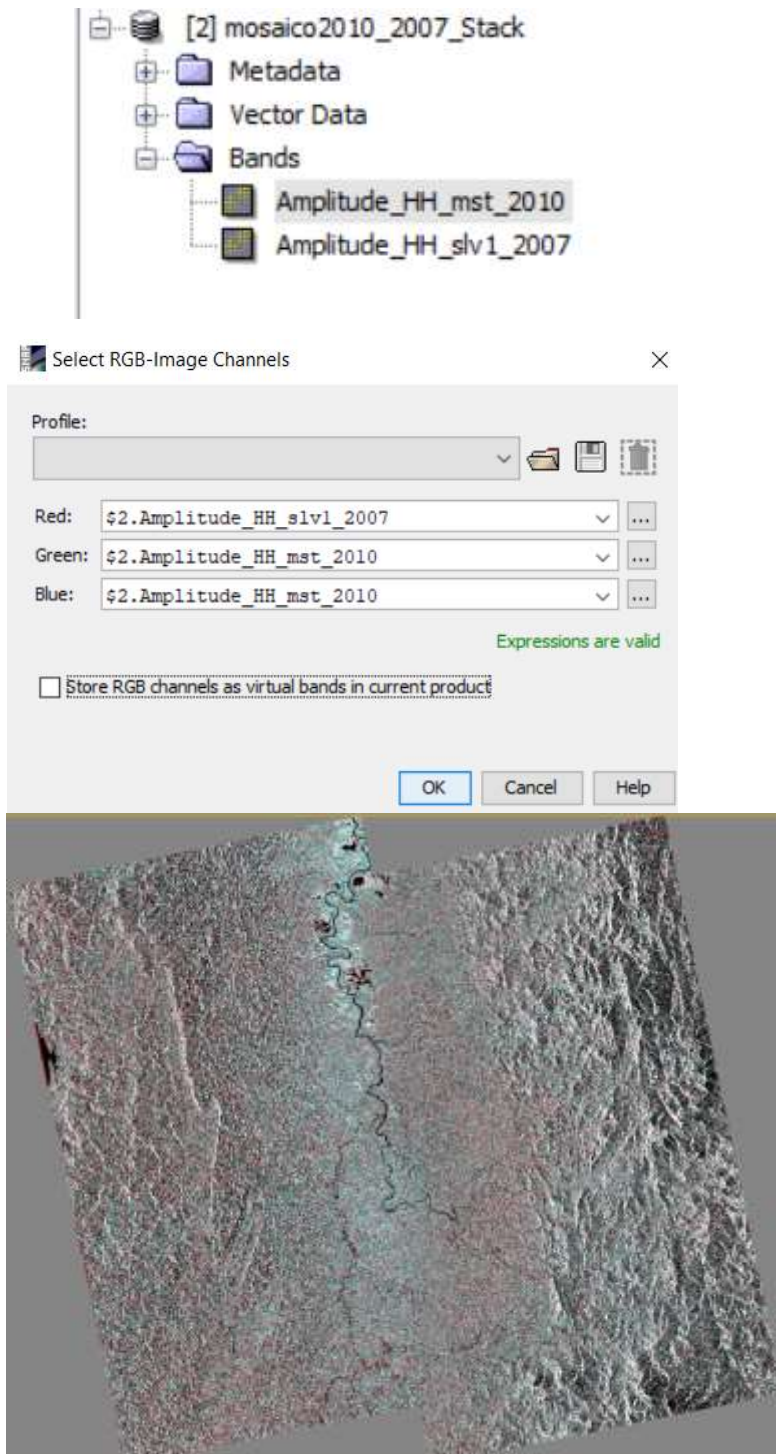
Proceso	Salida gráfica
Se importaron las imágenes descargadas	
Se realizó una calibración radiométrica	
Se realizó el mosaico de las imágenes de cada año	

Proceso

Se creó un stack o apilamiento de las imágenes en mosaico para los años 2007 y 2010, para obtener una detección de cambio por el método de coherencia SAR. Se realizó una composición a color RGB, para visualizar los cambios, teniendo en cuenta que se deja en el canal rojo la imagen esclava, que es la de la primera fecha.

La composición a color RGB es la imagen que permite identificar con cambios de la cuenca entre 2007 y 2010. En color rojo se pueden apreciar los cambios de la cobertura.

Salida gráfica



5.3.1.3 Identificación de áreas degradadas por la actividad minera en la cuenca del río Quito

Una vez obtenida la imagen de detección de cambio 2007 – 2010, fue importada en ArcGIS, donde se segmentó con la herramienta **segmentación**. Se generó una imagen donde los

píxeles adyacentes que tienen características espectrales similares son agrupados, ésta fue reclasificada usando **reclassify**, teniendo en cuenta los niveles digitales adoptados por los píxeles de cada grupo creado, con el objetivo de identificar o discriminar las coberturas de interés principalmente, como los son las áreas degradadas y los cuerpos de agua (Ver Figura 12).

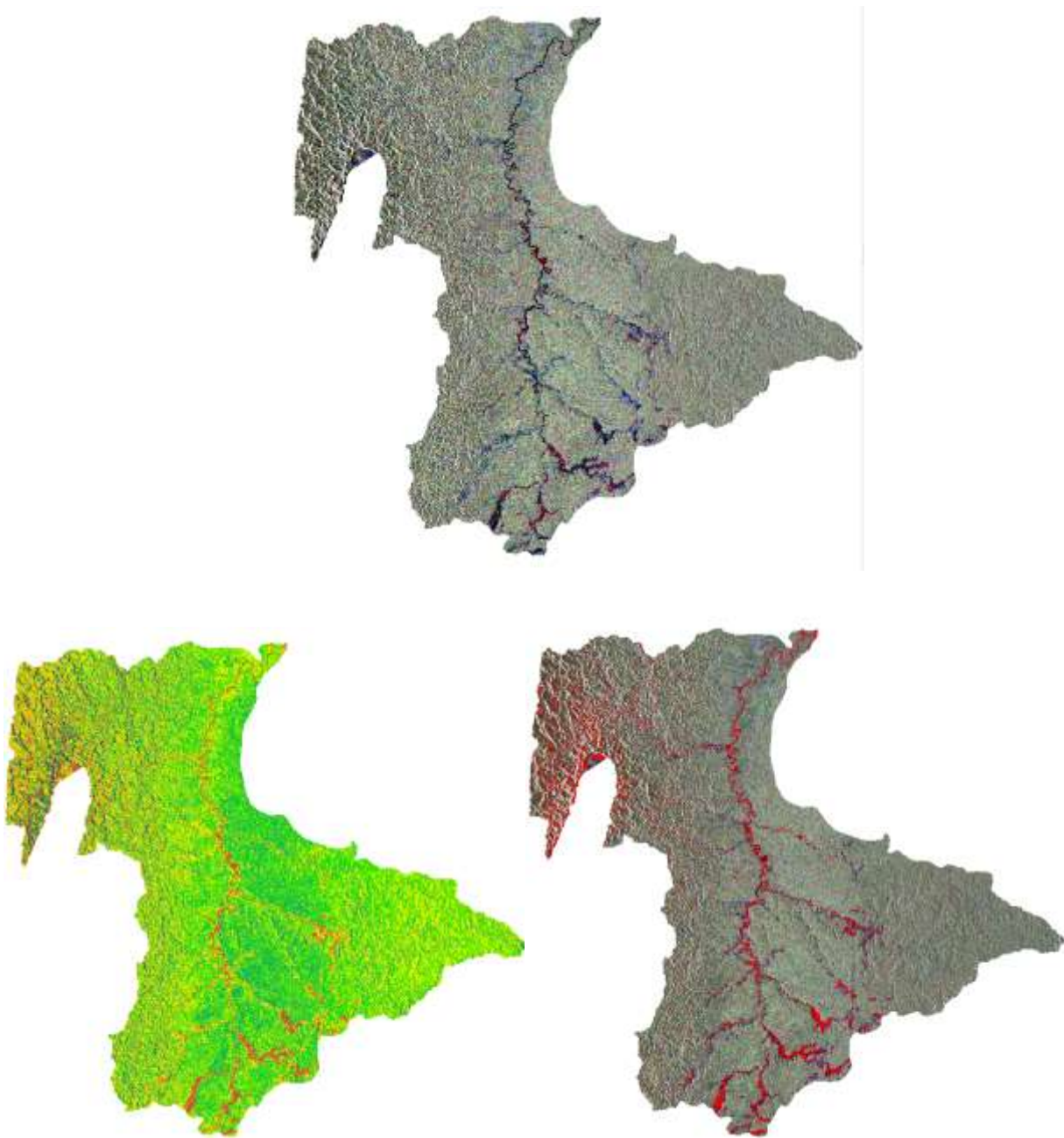


Figura 12. Imagen con detección de cambio 2007-2010 (superior), segmentada (inferior izquierda) y reclasificada (inferior derecha)

5.3.2 Fase II. Delimitación de cuenca hídrica.

5.3.2.1 Generación del mosaico del Modelo Digital de Elevaciones para los años 2007 y 2010

Para delimitar la cuenca para ambos años, se utilizó como insumo base un modelo de elevación del terreno DEM disponibles en las imágenes del sensor Alos Palsar (Ver Figura 13 y Tabla 8), descargadas para los años 2007 y 2010. Se usaron las imágenes con frame 90 y Path 150 y 149 para ambos años.

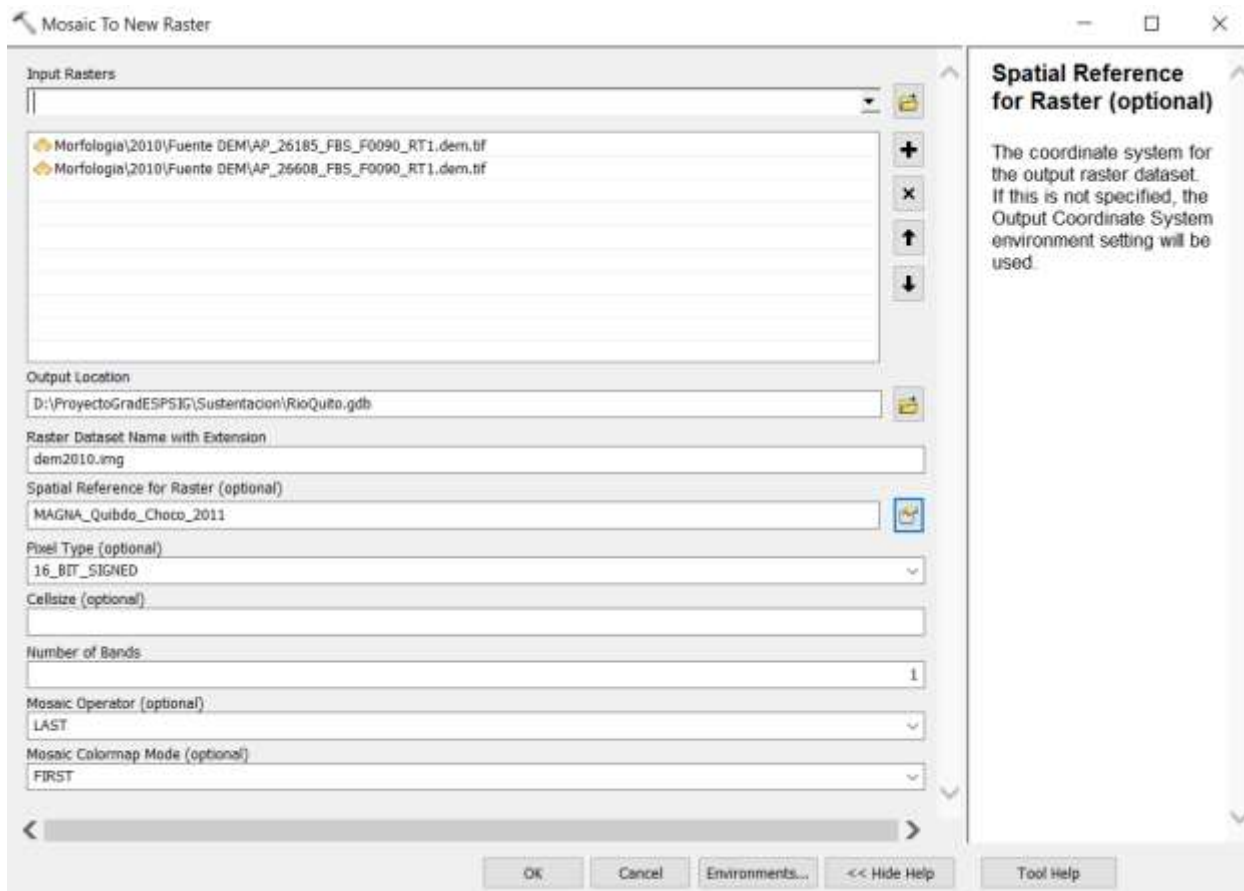


Figura 13. Herramienta para generar el mosaico del DEM

Los modelos obtenidos, muestran alturas entre -32 y 4.019 para 2010 y

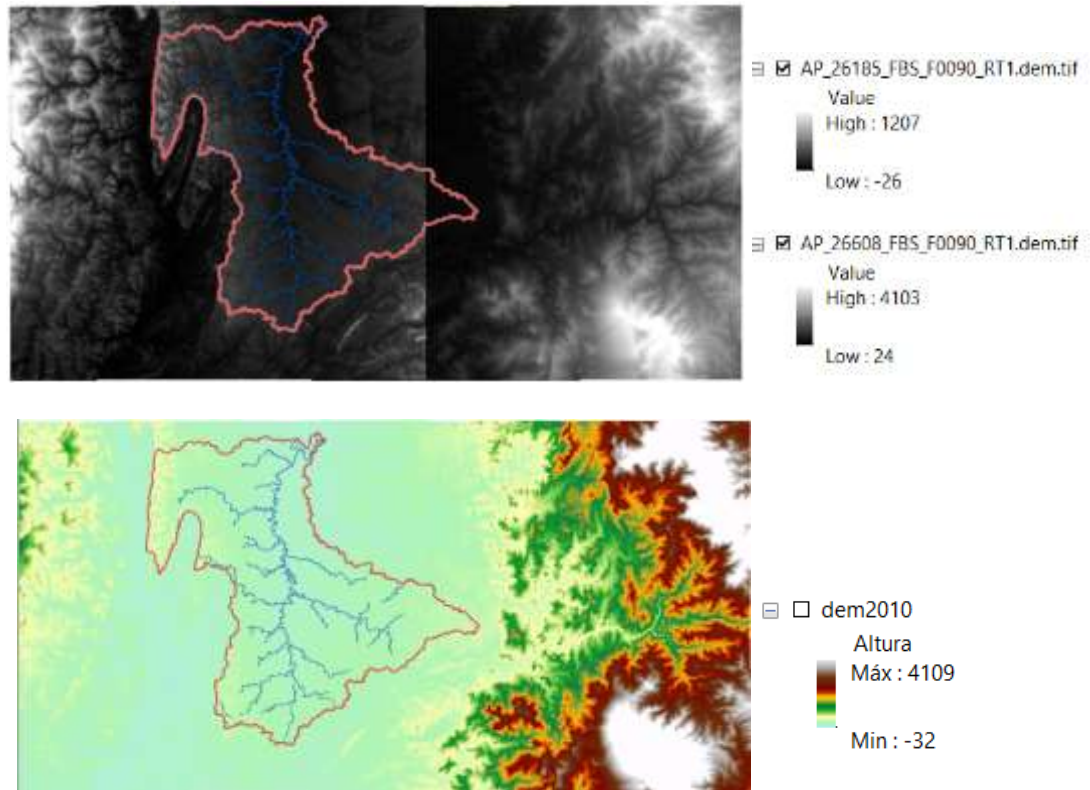


Tabla 8. Mosaico del Modelo Digital de Elevaciones

5.3.2.2 Proceso metodológico para delimitar la cuenca del Río Quito

El ejercicio de delimitación, se realiza en ArcGIS 10.5, el cual permitirán modelar el flujo de agua a través de la superficie, para posteriormente calcular las características geomorfológicas de la cuenca. Los modelos matemáticos de elevación se proyectaron en el sistema MAGNA Quibdó, Chocó 2011, por la cercanía al Datum de referencia. Como primera medida con la herramienta **Sink**, se verifica si hay sumideros o vacíos de información y luego se realiza el llenado del DEM con la herramienta **Fill**, para evitar errores de vacíos de información. Posteriormente, se calcula la dirección de flujo con **Flow Dirección**, donde el sistema analiza los valores de la vecindad de cada celda, para luego definir el flujo con las celdas de menor para darle la dirección en el sentido descendente por la pendiente (Harold, 2015).

Seguido, se define la acumulación de flujo hídrico con **Flow Accumulation**, herramienta que usa el peso acumulado de todas las celdas que fluyen en cada celda de pendiente descendente en el raster de salida como se aprecia en la Figura 14. Al mismo tiempo se puede generar el perímetro de la cuenca con la herramienta **Watershed** la cual usa el raster de dirección de flujo como archivo de entrada para identificar las divisorias de las aguas y un punto localizado en la desembocadura del cauce principal.

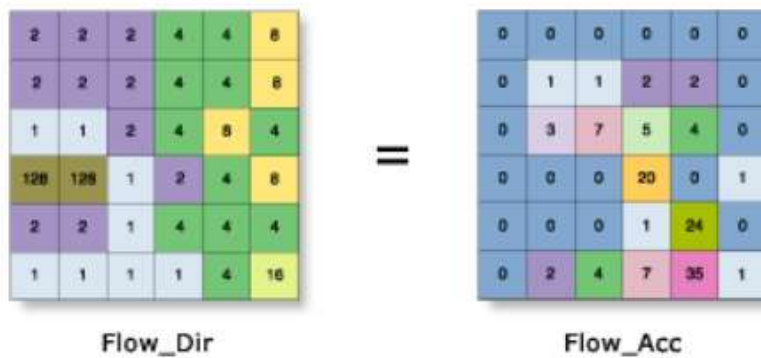


Figura 14. Proceso de cálculo de acumulación de flujo (Flow Accumulation)

Fuente: ArcGIS.com

Para la generación de la red de drenaje se usa la herramienta **raster calculator**, que con la operación $a=Con("%FlowAcc2010%">12000,1)$, genera un raster de salida donde a los píxeles con valores de flujo mayores a 12000 les asigna el valor de 1 (Ver Figura 16).

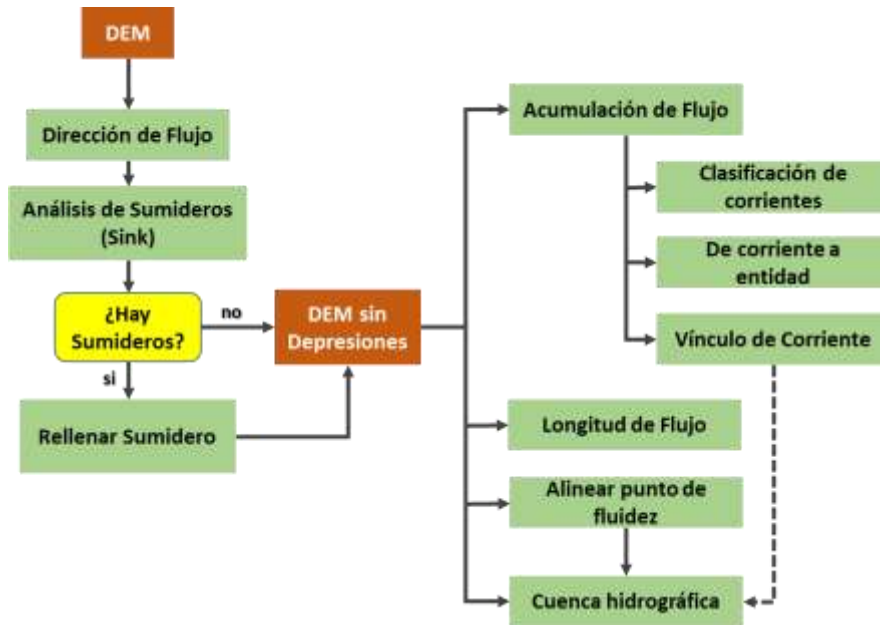


Figura 15. Modelo de delimitación de cuenca hidrográfica. Fuente: Adaptado de ArcGIS.com

Finalmente, se tienen las dos cuencas delimitadas y se generan la red de drenaje con **stream order**, con la cual se clasifican las corrientes y se le asigna un valor a cada segmento de la red de acuerdo al vínculo de los arroyos. Este orden es un método para identificar y clasificar los tipos de arroyos basado en la cantidad de afluentes. Esta red es la capa de entrada para crear la capa vectorial con la herramienta **stream to feature** (Ver Figura 17).

Tabla 9 Proceso metodológico de delimitación de la cuenca

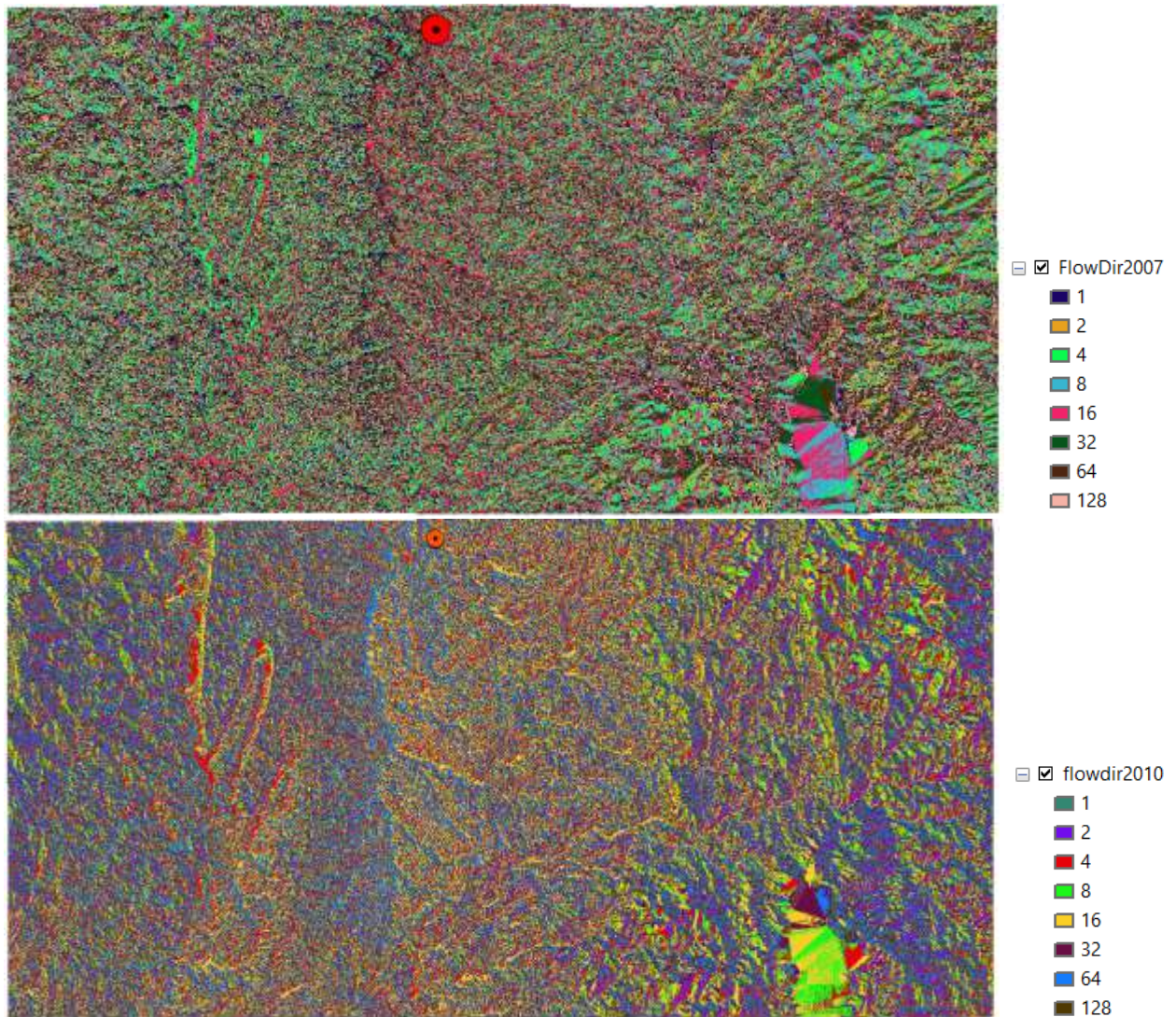


Figura 16. Dirección de Flujo. (Se debe rellenar-fill- el DEM previo a este paso, pues tiene sumideros)



Figura 17. Conversión de la red de drenaje a vectorial con la herramienta **stream to feature**

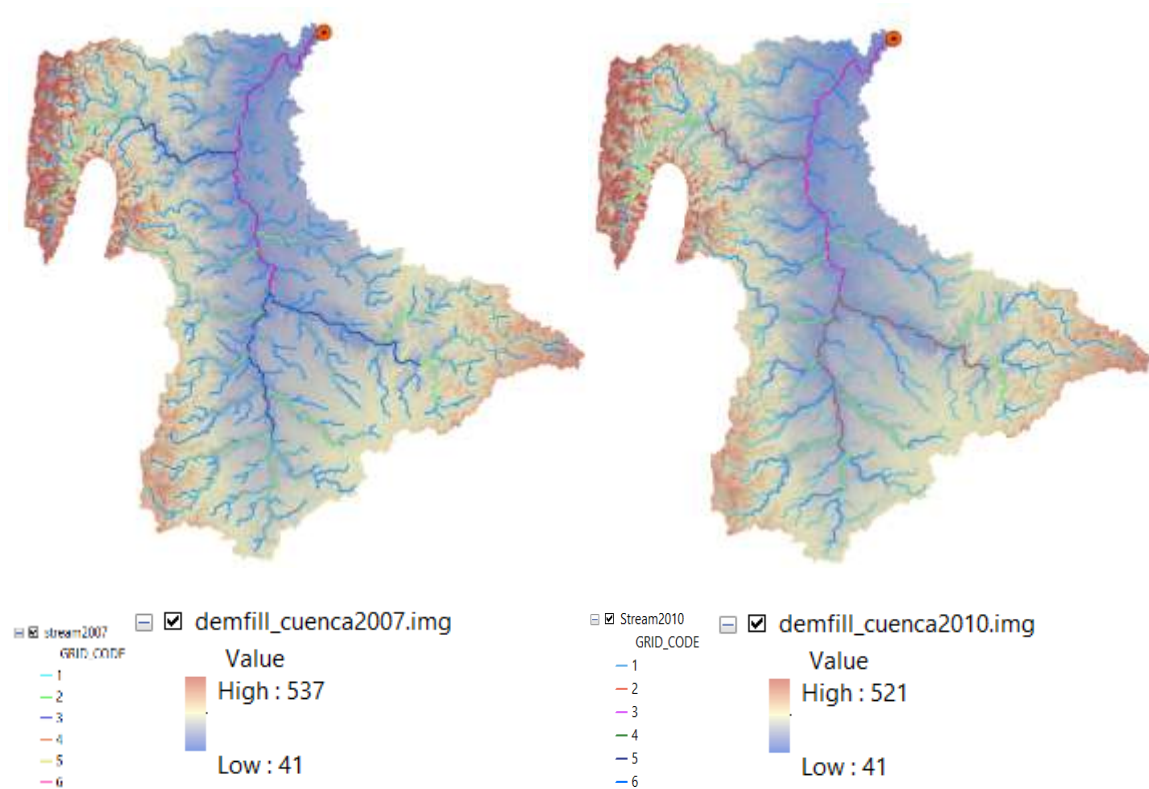


Figura 18. Cuenca Hídrica con su red de drenaje y orden con el método STRAHLER. Fuente: Elaboración propia.

5.3.3 Fase III. Cálculo de las características geomorfológicas

Con los insumos generados ya se puede proceder a realizar el cálculo de los parámetros generales como: área, perímetro, altura máxima, altura mínima, índice de Compacidad o de

Gravelius, entre otros. El primer paso es agregarle la distribución de la altura sobre la superficie a la cuenca que se delimitó previamente, en este se usa la herramienta **Interpolate Shape** del módulo Functional Surface de 3D Analyst, con esto ya se obtiene el perímetro y el área para cada cuenca (Ver Tabla 10). Seguido, se adicionaron columnas con **Add Field** en la tabla de atributos para los cálculos restantes: Cota mínima, Cota Máxima, Centroide en X, Centroide en Y y Centroide en Z, los cuales son calculados con la opción que se despliega al hacer clic sobre la comuna a calcular, **Calculate Geometry** (Ver Figura 19). El cálculo del desnivel altitudinal *DA* es la diferencia entre la cota mínima y la cota máxima, se estima con Field Calculator.

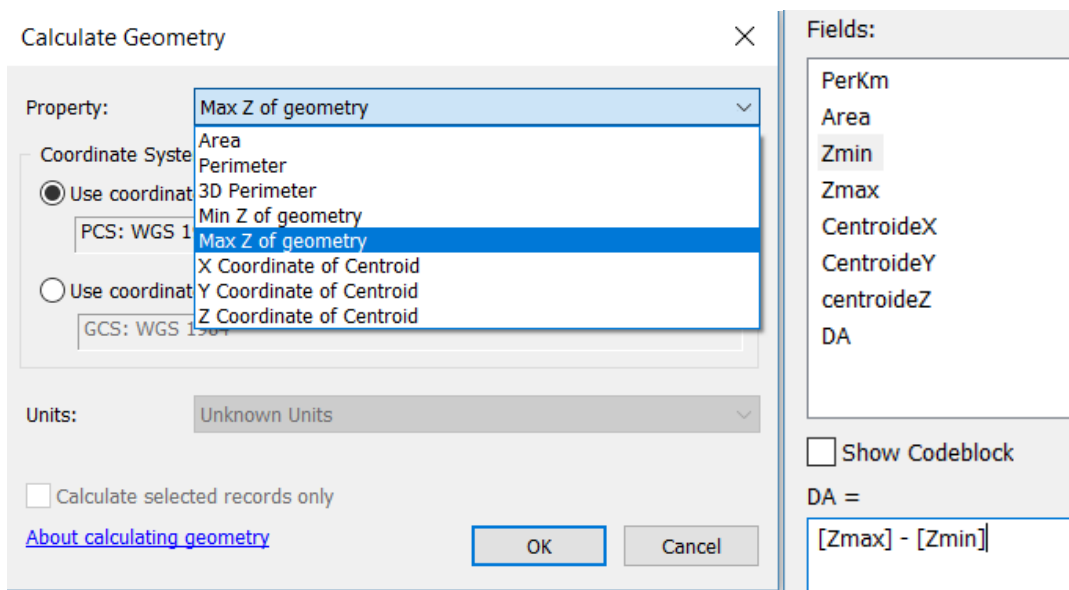
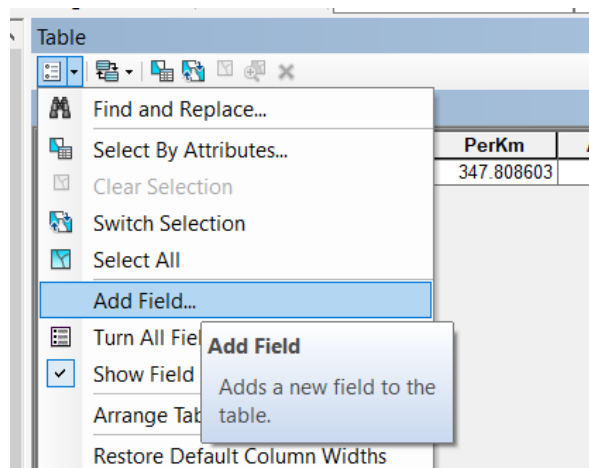


Figura 19. Procesos para adicionar columnas y calcular parámetros en ArcGIS

Con lo anterior se construyen los atributos de la cuenca, correspondiente a los parámetros generales (Ver Tabla 10).

Tabla 10. Procesos para el cálculo de parámetros generales de la cuenca

Proceso	Resultado															
Distribucion de alturas a la cuenca (Interpolate Shape)	CuencalInterpol2007															
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FID</th> <th>Shape *</th> <th>Id</th> <th>gridcode</th> <th>PerKm</th> <th>Area</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>Polygon ZM</td> <td>3</td> <td>0</td> <td>347.220915</td> <td>1702.185272</td> </tr> </tbody> </table>	FID	Shape *	Id	gridcode	PerKm	Area	0	Polygon ZM	3	0	347.220915	1702.185272			
FID	Shape *	Id	gridcode	PerKm	Area											
0	Polygon ZM	3	0	347.220915	1702.185272											
Parámetros calculados con Calculate Geometry	CuencalInterpol2007															
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>PerKm</th> <th>Area</th> <th>Zmax</th> <th>Zmin</th> <th>CentroideX</th> <th>CentroideY</th> <th>CentroideZ</th> <th>DA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>347.220915</td> <td>1702.185272</td> <td>485.576686</td> <td>41</td> <td>1040784.338</td> <td>1092071.187</td> <td>209.541294</td> <td>444.576686</td> </tr> </tbody> </table>	PerKm	Area	Zmax	Zmin	CentroideX	CentroideY	CentroideZ	DA	347.220915	1702.185272	485.576686	41	1040784.338	1092071.187	209.541294
PerKm	Area	Zmax	Zmin	CentroideX	CentroideY	CentroideZ	DA									
347.220915	1702.185272	485.576686	41	1040784.338	1092071.187	209.541294	444.576686									

El cálculo de la longitud del cauce principal, se realiza y la altitud mayor del Río Quito se obtiene con la interpolación del shape de cauce principal, para luego calcular la longitud y la cota máxima con la opción calculate geometry en la tabla de atributos.

Por su parte, la altitud media del río se obtiene de las estadísticas del DEM las cuales se visualizan en las *propiedades*, luego en *classified* y **Classify**. Para caracterizar la red de drenaje, como primera medida se extrae el número de ríos de primer orden, se realiza una selección por atributos y se realiza una consulta para discriminar los valores de GRID_CODE=1 que corresponde al orden de drenaje. Seleccionamos el cauce principal, se interpola para genera el perfil y se suma el valor de cada segmento en kilómetros para conocer la longitud del mismo.

En este punto ya se cuenta con las características base de la cuenca con las cuales se pueden calcular los demás parámetros de forma, relieve y la caracterización de la red de drenaje, para los cuales se programó una hoja de Excel con las ecuaciones descritas en el marco teórico.

Adicional a las características geomorfológicas, se realizó la detección de cambio de la red de drenaje con la herramienta **Detect Feature Changes**, la cual asigna en la columna CHANGE_TYP, valores que determinan el tipo de cambio generado, los cuales pueden ser: S

para espacial, A para atributo, SA para espacial y atributo, S_LD para el cambio espacial, SA_LD para cambios espaciales y de atributo, NC indica que no hay cambios, N para nuevo y D para eliminación, para la aplicación de la herramienta se utilizó la red de drenaje de 2007 como la capa base que será actualizada con la capa de 2010 y una distancia de 20 metros teniendo en cuenta el margen de desplazamiento que se puede presentar debido al caudal del río, se usa el campo GRID_CODE para validar cambios de atributos en el orden de drenaje (Ver Figura 20).

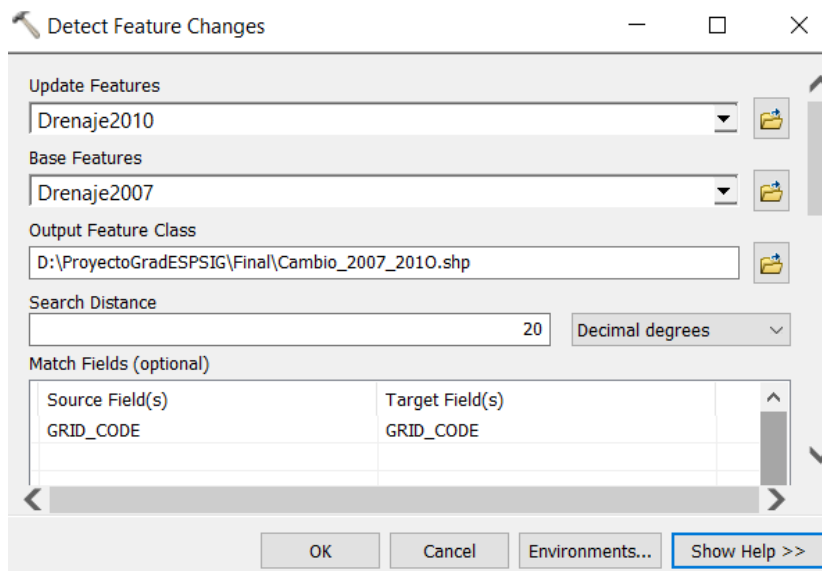


Figura 20. Herramienta para detección de cambio en la entidad

6 Resultados

6.1 Dinámica minera en la cuenca del río Quito

La composición geológica para la cuenca del río Quito, de acuerdo al mapa del Servicio Geológico Colombiano para el 2015 (Ver Tabla 11), muestra la existencia de cinco (5) unidades cronoestratigráficas, de las cuales llama la atención el área de los depósitos aluviales y llanuras aluviales **Q-al**, equivalente al 15% y que junto a las terrazas aluviales **Q-t** suman 43.46% , lo que permite inferir que cerca del 50% del área de la cuenca es potencial para la extracción de oro (ver Figura 21) ,

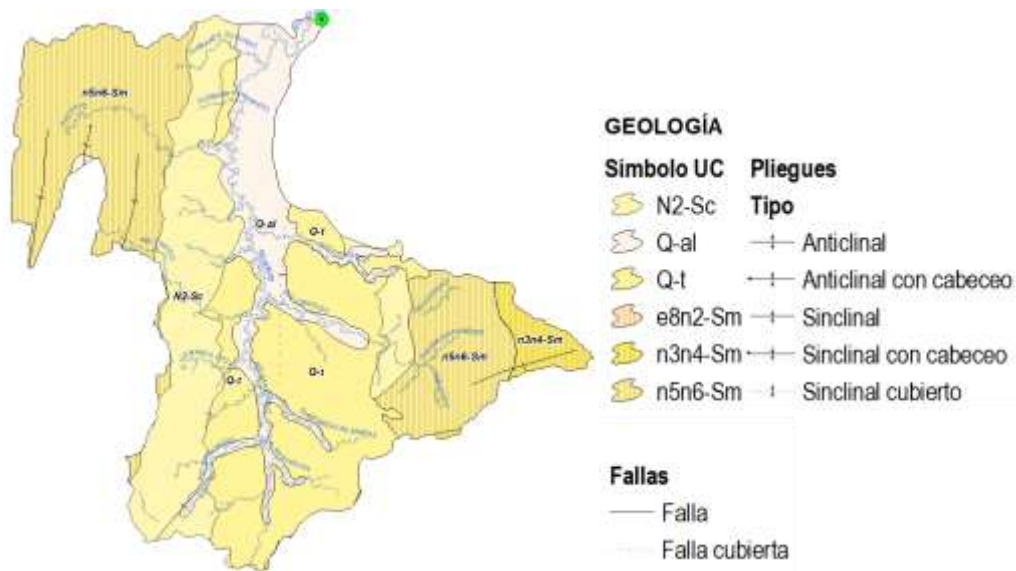


Figura 21. Mapa de Geología de la Cuenca Río Quito. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 11. Estadísticas de unidades cronoestratigráficas

Unidad	Descripción	Área (km ²)	% Áreas
Q-al	Depósitos aluviales y de llanuras aluviales	251.93	15.10%
n5n6-Sm	Arenitas líticas de grano fino con concreciones calcáreas intercaladas con limolitas y arcillolitas	520.1	31.16%
Q-t	Terrazas aluviales	473.44	28.37%

Unidad	Descripción	Área (km ²)	% Áreas
e8n2-Sm	Calizas, arenitas y lodolitas calcáreas.	0.46	0.03%
N2-Sc	Conglomerados, y arenitas líticas conglomeráticas intercaladas con arcillolitas, limolitas y turbas.	375.44	22.50%
n3n4-Sm	Lodolitas, algunas calcáreas y nodulares, intercaladas con lentes de calizas y esporádicamente capas de arenitas de grano fino a muy fino.	47.52	2.85%
Total		1668.89	

Fuente: Elaboración propia.

Por su parte la presencia de entables mineros en la cuenca a lo largo del cauce principal y sus afluentes, deja ver el nivel de intensidad de presiones que se ejerce sobre la cuenca con esta actividad, pues entre 2010 y 2012 se identificaron en el proceso de formalización minera cerca de 166 entables mineros, distribuidos principalmente sobre el cauce del río Quito (ver Figura 22), siendo los responsables de las alteraciones que se presentan y por las cuales a la fecha es difícil saber cuál es el cauce principal como manifiestan las comunidades (Consejo Comunitario de Paimadó, 2011).



Figura 22. Mapas de entables mineros presentes en la cuenca entre 2010 y 2012. Fuente: Propia

El mapa de coberturas de la cuenca, refleja la existencia de trece (13) tipo de ecosistemas generales, donde la mayor área corresponde a bosque basal húmedo con una extensión del 71.31%, sin embargo llama la atención las áreas de territorio artificializado y transicional transformado, que suman 12545.8 hectáreas, que coinciden con las áreas degradadas por la actividad minera identificadas en la cuenca (Figura 23).

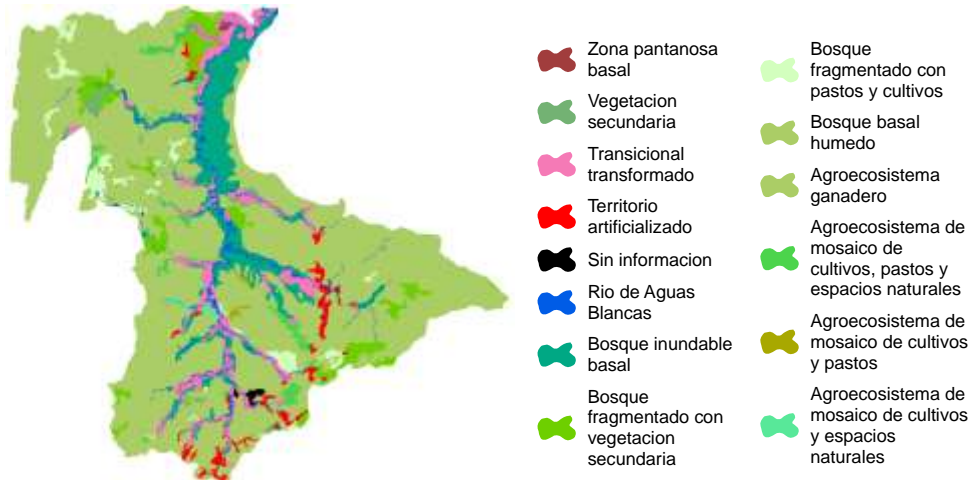


Figura 23. Mapa de ecosistemas generales. Fuente: Propia

Las coberturas del área de la cuenca del río Quito, sugiere que hay una alta presión en la vegetación en la ribera del cauce principal y sus afluentes, especialmente por la minería indiscriminada que se realiza en la zona, llevando al deterioro no sólo de la red de drenaje al modificar sus cauces, sino también a la fauna y la flora al disturbar sus ecosistemas, y por supuesto a la calidad de vida de las poblaciones aquí asentadas que requieren de los servicios ecosistémicos ofrecidos por las fuentes hídricas (Ver Figura 24)

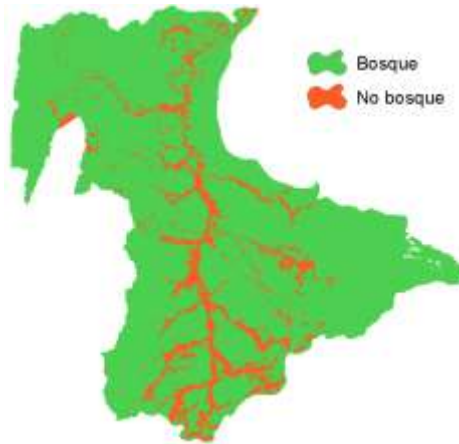


Figura 24. Mapas de Bosque-No Bosque

De los insumos cartográficos disponibles, se realizó un cruce de capas, para poder entender mejor la correlación de las áreas degradadas entre 2007 - 2010 y luego 2015 - 2018, evidenciando una intensificación de la explotación minera, principalmente en la parte alta y media de la cuenca (Ver Figura 25).

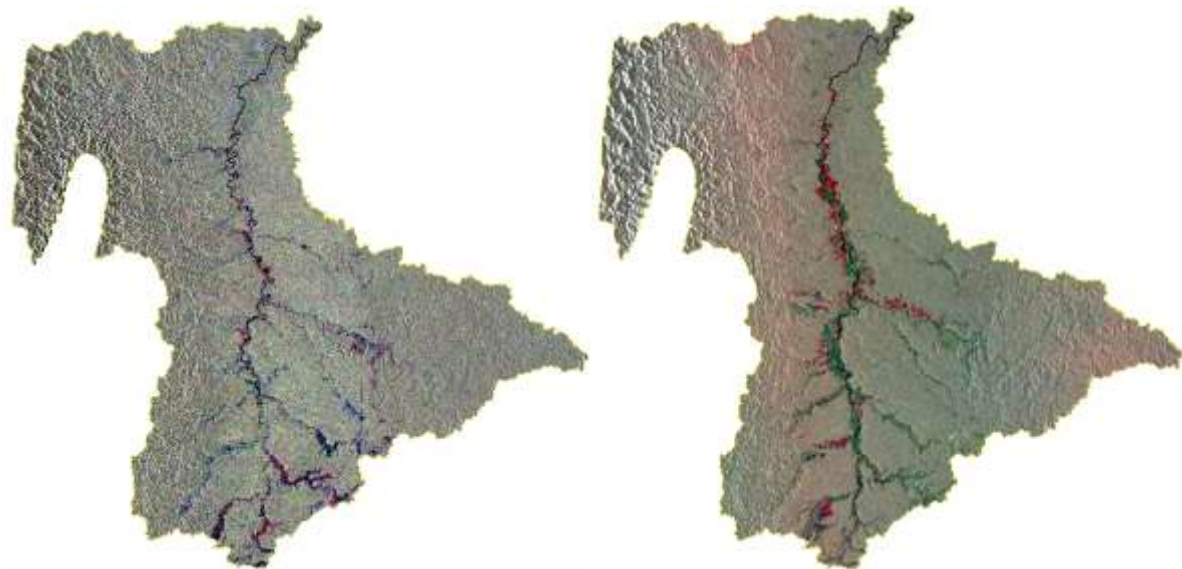


Figura 25. Áreas degradadas en Alos Palsar entre 2007-2010 (izquierda) y Sentinel 1 entre 2015 – 2018 (derecha).

Los resultados encontrados, dejan ver las fuertes presiones presentadas sobre la red de drenaje, donde su cauce principal pese a que hay leves diferencias hasta el kilómetro 18 aguas arriba, en la comunidad de San Isidro se empiezan a ver alteraciones considerables, las cuales se intensifican en Villa Conto, las que tienen una correlación con la presencia de entables mineros en la zona, de acuerdo a la imagen de 2018 con la extracción del material se ha ampliado, lo que puede afectar drásticamente la dinámica fluvial y el desarrollo de algunas especies, pues afecta la velocidad del agua y es una de las variables que controlan la presencia de numerosas especies acuáticas. (Ollero et al., 2007); hay presencia de numerosos meandros, producto de las alteraciones al cauce (Ver Figura 26)

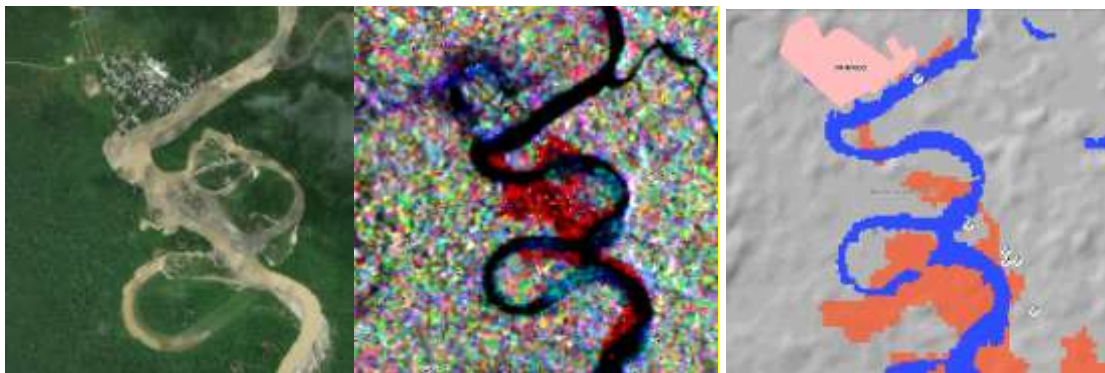


Figura 26. Modificaciones al cauce por actividad minera cerca a cabecera municipal (Paimadó), imagen óptica (*izquierda*), imagen de radar (*centro*), capa vectorial (*derecha*).

De la interpretación de las imágenes de radar Alos Palsar (2007 – 2010) y Sentinel 1B de 2018, podemos inferir que: Las alteraciones geomorfológicas que presenta el cauce principal y sus afluentes, probablemente se debe a procesos de afectación no sólo en las formas, sino también a los procesos de funcionalidad de la cuenca y responden tanto a impactos directos en el cauce como a presiones indirectas sobre la cuenca o el sistema fluvial aguas arriba. En este sentido, se considera que el papel hidrogeomorfológico de las llanuras de inundación es alterado por los usos del suelo que modifican su funcionalidad, situación que presenta el río Quito por la

presencia desmesurada de la actividad minera presente tanto en el lecho, como en las riveras del cauce principal de la cuenca como de sus afluentes principales. Por otro lado, se evidencian alteraciones en los procesos geomorfológicos longitudinales, como consecuencia de rupturas de continuidad en el sistema, al igual que se identificaron afectaciones en las márgenes del cauce y de los procesos laterales. Desde Villa Conto, hasta Bocas de Raspadura, se presentan alteraciones geomorfológicas de todo tipo que afectan la integralidad de la cuenca, lo que deriva en modificaciones en los ecosistemas, pero también acarrea problemas económicos y sociales, al poner en condición de vulnerabilidad a las comunidades ribereñas de la cuenca.

6.2 Características Geomorfológicas de la cuenca para los años 2007, 2010 y 2018

El resultado de los parámetros base de las características geomorfológicas presentados en la Tabla 12, donde se muestra que la cuenca tiene un extensión superficial promedio de 1702.2 km² y un perímetro de 346.7 km, siendo considerada de 6° orden de magnitud, conformada por 567 canales de 1er orden en 2007 y 2010; sin embargo, en 2018 se encontraron 562, lo que sugiere una disminución de afluentes en la cuenca.

Partiendo del análisis de los valores de densidad de drenaje, los cuales muestran una media de 0.867, se puede asumir que aun cuando la cuenca ha recibido fuertes presiones en sus cauces, presenta una alta resistencia a la erosión, gracias a su bajo relieve, como se aprecia en la Tabla 132, donde la pendiente media en 2007 presentaba valores de 7.57 grados, correspondiente a pendientes moderadas y una disminución para los años 2010 y 2018 de 6.42 y 6.27 respectivamente, las cuales muy posiblemente se deben a los volúmenes de sedimento que se vierten diariamente y de manera directa sobre las fuentes hídricas superficiales. Dichos vertimientos podrían alcanzar hasta 1.350.292 galones diarios por unidad minera mecanizada,

con una carga contaminante relacionada con Sólidos Suspendidos y Sólidos Totales de 509760kg/día para ambos casos, el equivalente a 186.062.400 kg/año (IIAP, 2012).

De acuerdo al valor promedio registrado para el índice de compacidad de Gravelius de 2.37, la forma de la cuenca responde a una geometría entre oval oblonga a rectangular oblonga, la cual tiene bajos niveles de torrencialidad (Londoño, 2001). Por su parte, el factor de Horton de 0.27, sugiere que la forma de la cuenca es alargada; sin embargo, este valor muestra una disminución gradual para los años 2010 y 2018. Lo anterior, indica que la forma de la cuenca puede estar sufriendo modificaciones por las alteraciones o presiones antrópicas sobre el cauce principal y sus afluentes.

Tabla 12. Parámetros geomorfológicos de la cuenca en los años 2007, 2010 y 2018

Parámetros generales de la cuenca				
PARÁMETRO	Unidad	Valor 2007	Valor 2010	Valor 2018
Área Cuenca (A)	Km2	1702.185272	1701.850831	1702.580104
Perímetro (P)	Km	347.220915	347.808603	345.193958
Cota máxima de la cuenca (Hmax)	msnm	537	521	512
Cota de salida (Hmin)	msnm	41	41	41
Xcentroide cuenca	m	1040784.338	1040779.036	1040769.316
Ycentroide cuenca	m	1092071.187	1092062.573	1092073.474
Zcentroide cuenca	msnm	209.541294	212.284	212.120635
DA (cota máx. – cota min)	m	496	480	471
Longitud (L)	Km	78.41612	78.41612	79.073167
Ancho (W=A/L)	Km	21.7070836	21.7028186	21.53170498
Altitud mayor del Río Quito	msnm	127.787996	128	128.5
Altitud media de la cuenca	msnm	125.02	125.77	125.73
Parámetros de forma				
PARÁMETRO		2007	2010	2018
Índice de Compacidad o de GRAVELIUS ($K = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$)	Un	2.3741358	2.3783878	2.3600027
Factor de forma adimensional de HORTON ($k_f = A/L^2$)	Un	0.276819149	0.27676476	0.272301032
Caracterización de la red de drenaje				

PARÁMETRO	Unidad	2007	2010	2018
Longitud total de ríos	Km	1477.69	1476.84091	1475.049076
Número Total de ríos	Un	189	179	175
Jerarquización (Orden según Strahler)	Un	6	6	6
Densidad de drenaje $Dd = \frac{\sum li}{A}$		0.868113492	0.867785168	0.866361044
Ríos de primer orden	Un	567	567	562

Parámetros de relieve

PARÁMETRO	Unidad	2007	2010	2018
Altura media de la cuenca (H)	msnm	125.02	125.77	125.73
Pendiente media de la cuenca $S=DA/L$	Grados	7.57	6.42	6.27
Pendiente media del cauce principal $Lc=(Hmax-Hmin)/L$	Grados	6.325	6.121	5.957
Altitud mayor del Río Quito	msnm	127.787996	128	128.5
Ancho de la cuenca	Km	21.70708359	21.70281864	21.53170498
Tiempo de concentración $tc = \left(\frac{4\sqrt{A}+1.5L}{0.8\sqrt{L}} \right)$	Horas	31.5991917	31.50302648	31.62184805
Coefficiente de torrencialidad $(Ct=Hmed/A)$	m/Km2	0.073446764	0.073901894	0.073846746

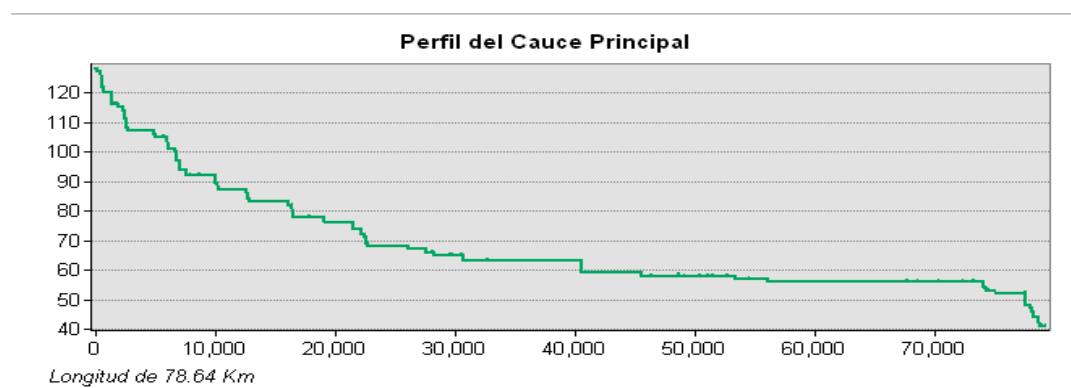
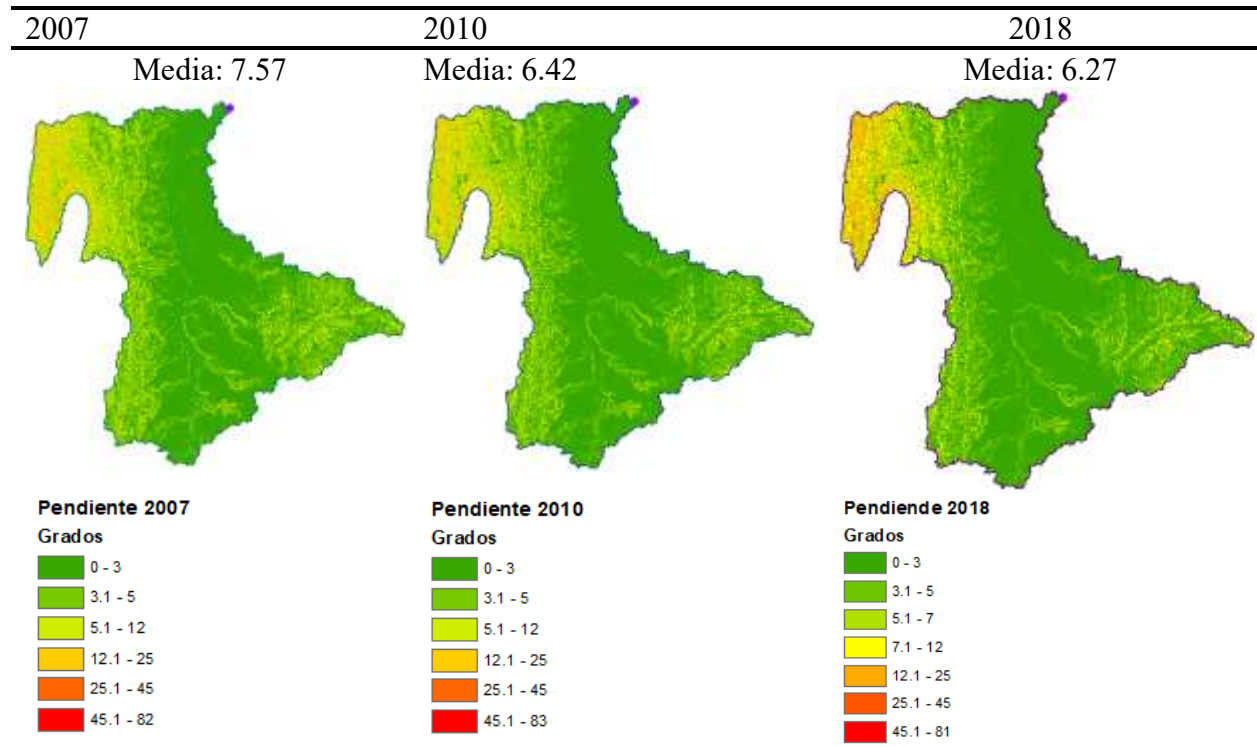


Figura 27. Perfil altimétrico del cauce principal

Se puede identificar en el perfil del cauce principal, las zonas bajas de la cuenca presentan menos variación de la pendiente, lo que sugiere en primera medida que existen una alteración en la dinámica de sedimentos que puede ser ocasionada por la remoción del material aluvial en la actividad minera (González, Javier, & Jaramillo, 2010).

Tabla 132. Clasificación de grados de pendientes



6.3 Detección de cambios generados por la actividad minera

La detección de cambios en la red de drenaje para los años 2007 y 2010, arrojó que, de 1181 segmentos evaluados como resultado, 48 fueron eliminados, 80 tienen modificaciones espaciales y se encuentran en zonas donde hay áreas degradadas por la actividad minera y hay 38 nuevas entidades o segmentos dentro de la red de drenaje. Probablemente, lo anterior sea producto de las modificaciones a los cauces. Finalmente, 1.015 entidades no sufrieron cambios en éste período de tiempo y se encuentran principalmente en zonas alejadas de la dinámica minera de la cuenca (Ver Figura 28).

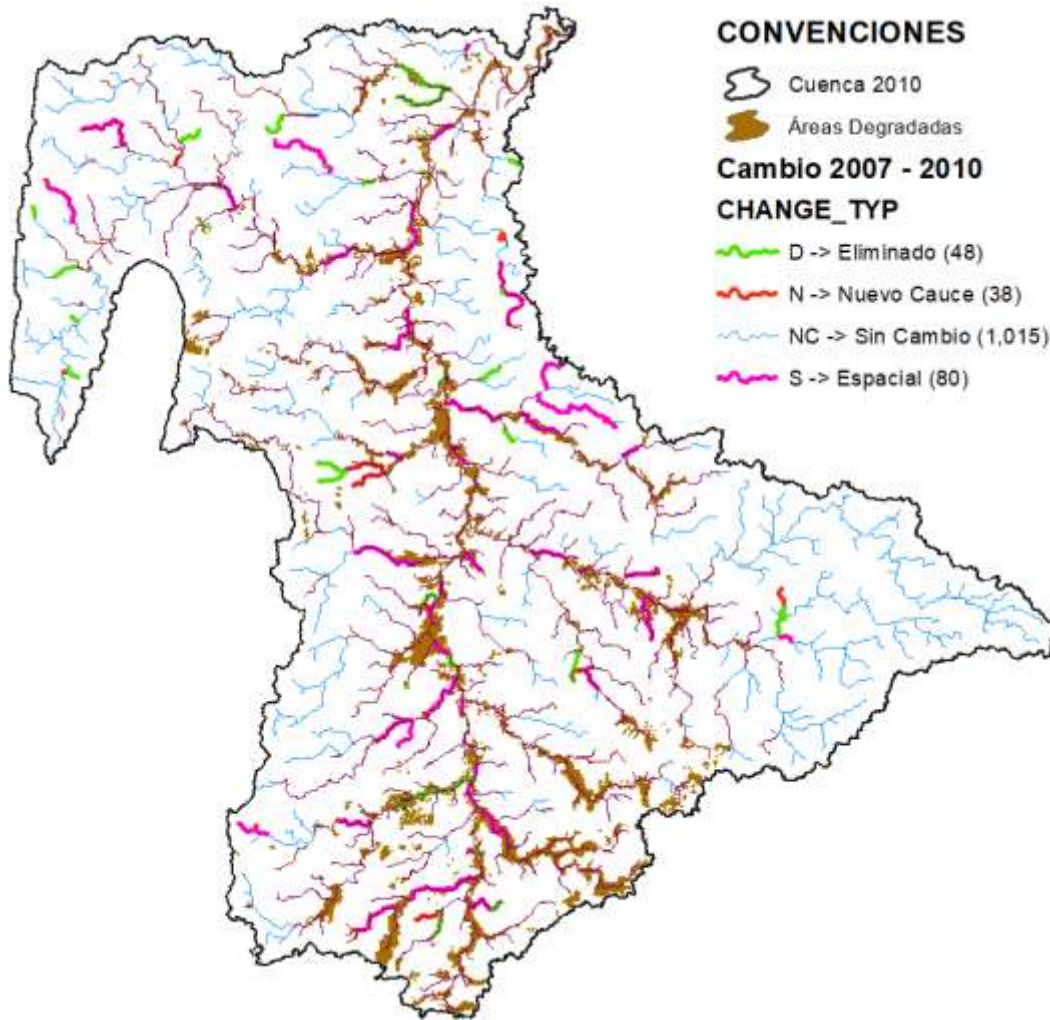


Figura 28. Detección de cambio en la red de drenaje entre 2007 y 2010. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 29, vemos que la detección para el periodo comprendido entre 2010 y 2018, presentó una disminución en las entidades que no sufrieron cambios, pues se presentan 995 de 1188 evaluadas. A diferencia de las entidades eliminadas que tuvo un aumento de poco más del 37%, los segmentos nuevos pasaron de 38 a 56, dejando ver la intensificación de la extracción minera en la cuenca. Por su parte, los segmentos fluviales con modificaciones espaciales

disminuyeron, pero siguen teniendo una presencia alta y una estrecha relación con las áreas degradadas que para 2018 tuvo un incremento del 64%.

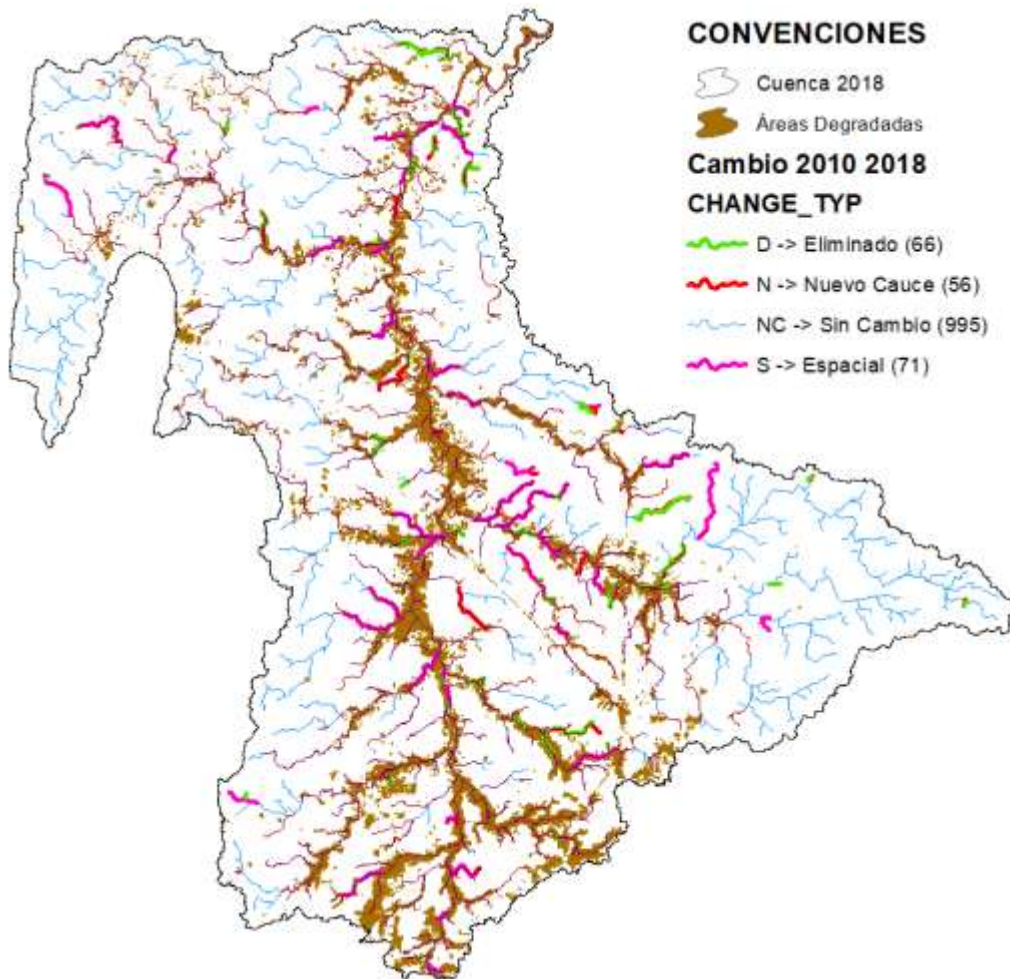


Figura 29. Cambio en la red de drenaje entre 2010 y 2018. Fuente: Elaboración propia

7 Conclusiones

1. Cerca del 50% del área que hace parte de la cuenca del río Quito presenta un alto potencial minero. La dinámica minera en la zona indica que los sectores de mayor intervención se encuentran comprendidos por las comunidades de San Isidro, Villa Conto y Paimadó, zona donde se logró la identificación de aproximadamente 166 unidades mineras entre 2010 y 2012. Así mismo, se logró la identificación y cuantificación de 113.67 Km² de áreas degradadas en 2010 y 186.73 Km² en 2018, mostrando un aumento significativo pese a las acciones de las autoridades.

2. La morfometría de la red de drenaje responde a una estructura dentrítica de orden 6, con tiempo de concentración variable de aproximadamente 31.6 horas y una baja densidad de drenaje con valor promedio de 0.87; el coeficiente de compacidad de Gravelius (0.275) indica que es oblonga a rectangular, con un factor de forma adimensional de Horton que ha presentado variaciones en el tiempo, disminuyendo de 2.374 en 2007 hasta llegar a 2.371 en 2018, lo que sugiere que la cuenca efectivamente se está alargando.

3. Los valores de los parámetros geomorfológicos registrados, muestran que en la actualidad la cuenca tiene un área promedio de 1702.58 Km², un perímetro de 345.19 Km, con un gradiente altitudinal que varía entre 41 y 512 msnm, con unos niveles de densidad de drenaje (0.86) y de las pendientes (6.27) en 2018, llevan a suponer que la cuenca del río Quito y sus subcuencas, presentan bajos volúmenes de escurrimiento y bajas velocidades de desplazamiento del agua, lo que pudiera generar un moderado ascenso en las corrientes.

4. El análisis multitemporal, arrojó que la cuenca ha sufrido modificaciones estructurales evidenciadas por los cambios detectados, donde vemos que en el período de 2007 a 2018, de 1181 segmentos evaluados, 48 fueron eliminados, 38 son nuevos, 80

mostraron cambios espaciales y 1015 no tuvieron ningún cambio, a diferencia del período 2010-2018, en el cual el 56% de los segmentos analizados coincide con áreas degradadas, donde se eliminaron 66, 56 son nuevos, 71 afectados espacialmente y 995 se conservaron igual. Con lo anterior, se puede concluir que el deterioro por la continuidad de la actividad minera, las alteraciones en la anchura, naturalidad, estructura y conectividad del corredor ribereño produce también efectos negativos sobre la geomorfología de los cauces de la red de drenaje.

5. Dado que el área de la cuenca, al igual que el perímetro y la longitud presentan aumento y por su parte el ancho disminuye, se puede inferir que la cuenca se está alargando por las presiones de la actividad minera en la parte alta de la cuenca, lo que genera que en la parte media y baja se presenten grandes depósitos de sedimentos; lo anterior puede estar relacionado con el hecho de que la cota máxima de la cuenca esté disminuyendo.

6. Los segmentos que muestran que fueron eliminados, coinciden con áreas degradadas, lo que sugiere que al ser modificados los cauces, se pierde el nodo de conexión con la fuente hídrica como lo evidencia en la Figura 29 de detección de cambio, afectando el flujo natural de la red de drenaje.

8 Recomendaciones

En una siguiente etapa del proyecto se puede realizar estudios relacionados con la sedimentación, áreas de inundación, procesos de erosión y modificación de cauces, generados por la actividad minera en la cuenca del río Quito, como insumos claves no sólo para los tomadores de decisión, sino también para sensibilizar a los habitantes de la cuenca con relación a los efectos ambientales, económicos y sociales que conlleva el impacto de la minería en la cuenca.

Las imágenes del sensor Alos Palsar están disponibles sólo para los períodos 2007 – 2011, con las cuales se puede crear una línea base para ejercicios de monitoreo de cuencas hídricas y para la creación de planes de manejo y ordenación, especialmente en la región del Pacífico colombiano, donde las condiciones climáticas y el acceso al territorio dificultan la adquisición de información.

Vale la pena realizar otros ejercicios con la herramienta de detección de cambio de entidades, pues, aunque es sencilla de aplicar, resulta potente al analizar las redes de drenaje en las diferentes temporalidades, siempre y cuando las capas geográficas conserven su integridad topológica y los atributos.

Referencias Bibliográficas

- Akiwumi, F. A., & Butler, D. R. (2007). Mining and environmental change in Sierra Leone, West Africa: A remote sensing and hydrogeomorphological study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 310-318. doi:10.1007/s10661-007-9930-9
- ASF. (2014). *Alaska Satellite Facility*. Obtenido de Alos Palsar: <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/>
- Barrera, J., Contreras, S., Ochoa, A., Perilla, S., Garzón, N., & Rondón, D. (2009). El papel de las caracterizaciones diagnósticas en la restauración ecológica de áreas degradadas por minería a cielo abierto. En P. U. Javeriana, & S. C.-R.-C. Barrera-Cataño J.I (Ed.), *Restauración Ecológica de Áreas Afectadas por Minería a Cielo Abierto en Colombia* (1 ed., págs. 127-137-716-243-1). Bogotá D.C.
- Blanco, D. (2017). Análisis socio jurídico del Barequeo con enfoque étnico – territorial. Caso Suárez Cauca. 110.
- Burgos, V. (2012). *Evaluación de ASTER GDEM y SRTM-C/X para modelación hidráulica de la rotura de presa El Carrizal, Mendoza*. Mendoza, Argentina: Instituto Nacional del Agua – Centro Regional Andino.
- Cardona, B. L. (2012). *Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas*. Recuperado de [http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas.pdf](http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos_básicos_de_Morfometría_de_Cuencas_Hidrográficas.pdf)
- Celso, I. (2017). *Remote sensing of land use changes and impacts on river turbidity in a small-scale mining region*. Queensland: University of Queensland.
- Consejo Comunitario de Paimadó. (2011). *Acción Popular Río Quito* (p. 44). p. 44.
- Córdova, M. (30 de Abril de 2016). *Parámetros geomorfológicos de cuencas hidrográficas*.

- ESRI. (2016). ¿Qué son los datos ráster? Recuperado el 10 de mayo de 2019, de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>
- GEF, PNUD, WWF, & MADS. (2014). Conservación de la biodiversidad en paisajes impactados por la minería en la región del Chocó Biogeográfico.
- González, J. E., Javier, L., & Jaramillo, M. (2010). Propuesta metodológica para el análisis morfo-sedimentológico en cuencas altamente urbanizadas. Caso de estudio quebrada Doña María (Colombia). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 9(16), 13–24.
- Gutiérrez, M. (2008). Geomorfología (Universidad de Zaragoza, Ed.). Recuperado de http://geografiafisica.org/geo112/material_examen_final/bibliografia/geomorfologia_mateo_gutierrez_elorza_temas_4_y_8.pdf
- Harold, H. (2015). Zonificación de susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa mediante geoprocesamiento con herramientas SIG en la cuenca del Río Azufral (Universidad Militar). Recuperado de [https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/11588/Trabajo de Grado.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/11588/Trabajo_de_Grado.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- IDEAM. (2004). *Guía técnico científica para la ordenación y manejo de cuencas*. Bogotá D.C.: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial .
- IDEAM. (2013). *Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia*. Bogotá D.C.: Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM.
- IIAP. (2012). Protocolo de restauración ecológica de áreas degradadas por minería a cielo abierto de oro y platino en el Chocó Biogeográfico. Recuperado de https://siatpc.iiap.org.co/docs/avances/protocolo_de_restauracion_ecologico.pdf
- INGEOEXPERT. (2018). Configuración, estructura y características de las imágenes en

teledetección | Ingeoexpert. Recuperado de <https://ingeoexpert.com/articulo/21969/?v=42983b05e2f2>

Londoño, K. Zambrano, L. (2009). Propuesta de un modelo de gestión ambiental para pequeñas y medianas empresas basados en el Decreto 1836/93 de la Unión Europea. 115. Recuperado de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/2210/1/333715C569.pdf>

Londoño, C. (2001). Cuencas hidrográficas: Bases Conceptuales-Caracterización-Planificación-Administración. Recuperado de http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwff/mdez/~edisp/inea_013115.pdf

López Cárdenas de Llano. (1998). *Restauración Hidrológica Forestal de Cuencas y Control de Erosión*. Madrid, España: Mundi Prensa.

NASA. (2015). *Acceso y Aplicaciones del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*. Recuperado de http://www.cazalac.org/mwar_lac/fileadmin/imagenes2/Remote_Sensing/span_S8P1.pdf

Ollero, A., Ballarín, D., Díaz, E., Mora, D., Sánchez, M., Acín, V., ... Sánchez, N. (2007). Un Índice Hidrogeomorfológico (Ihg) Para La Evaluación Del Estado Ecológico De Sistemas Fluviales. *Geographicalia*, (52), 113–141.

Osorio, S. (2010). Apuntes de Geotecnia con Énfasis en Laderas. Recuperado de http://geotecnia-sor.blogspot.com/2010_10_31_archive.html

Pérez, J. (1979). *Fundamentos del ciclo hidrológico*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería Departamento de Meteorología e Hidrología.

Quijano, J. E. (2014). *Parámetros morfométricos, geomorfológicos y correlación estructural de cinco cuencas hidrográficas de la cuenca Amagá*. 78.

RAE. (2018). Diccionario de la lengua española - Edición del Tricentenario. Recuperado el 10 de

mayo de 2019, de <https://dle.rae.es/?w=diccionario>

- Romero, M., & López, F. (1987). Morfometría de Redes Fluviales: Revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al Alto Guadalquivir. *Papeles de Geografía (Física)*(12), 47-62. Obtenido de <http://revistas.um.es/geografia/article/view/42391/40741>
- Rueda, Ó. A., & Poveda, G. (2006). Variabilidad espacial y temporal del Chorro del Chocó y su efecto en la hidroclimatología de la región del Pacífico Colombiano. *Meteorología Colombiana W*, 10(April), 132–145. Recuperado de http://ciencias.bogota.unal.edu.co/fileadmin/content/geociencias/revista_meteorologia_colombiana/numero10/10_12.pdf
- Sentencia T 622, Expediente T-5.016.242 (Sala Sexta de Revisión 10 de Noviembre de 2016)
- Tierra Digna. (Septiembre de 2011). Acción popular Río Quito. 31. Bogotá D.C.: Consejo Comunitario de Paimadó.
- UNODC. (2016). *Explotación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota. Evidencias a partir de percepción remota*. Naciones Unidas Contra la Droga y el Delito., Bogotá D. C.
- UNODC. (2017). *Proyecto Sistema de Monitoreo de Cultivos Ilícitos SIMCI*. Informe de Evaluación Independiente Intermedia, Bogotá D.C.
- Villarroel, A. (2016). Pendiente Topográfica. Recuperado el 10 de mayo de 2019, de <https://es.slideshare.net/AIDAVILLARROEL1/pendiente-topografica>
- Woldai, T., & Taranik, J. (2008). Environmental impact assessment of mining related dewatering activities using integrated insar, optical remote sensing and pumping data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVII. Part B7.*, 191-197.

WWF. (2014). *Conservación de la biodiversidad en paisajes impactados por la minería en la región del Chocó Biogeográfico*. Bogotá D.C.: Naciones Unidas para el Desarrollo.