

DETERMINACIÓN DE MODELOS LLUVIA ESCORRENTÍA

Proyecto

Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa, en el marco de las declaratorias de calamidad pública y desastre del Municipio de Mocoa - Putumayo, debidas al evento presentado el 31 de marzo de 2017.





**UNIDAD NACIONAL PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES – INSTITUTO GEOFÍSICO
– UNIVERSIDAD JAVERIANA
Bogotá D.C., 2017**



	<i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i>	
	Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía	

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	6
2	ANÁLISIS DE LA DINÁMICA FLUVIAL DE LA ZONA DE ESTUDIO	6
3	EVALUACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS	8
3.1	Marco conceptual	8
3.2	Modelos meteorológicos	10
3.2.1	Condiciones iniciales y de frontera (IC/BC).....	11
3.2.2	Análisis de sensibilidad del modelo meteorológico	11
3.2.3	Modelos imperfectos	12
3.3	Modelos hidrológicos.....	12
3.3.1	Modelo hidrológico agregado GR4J.....	12
3.3.2	Modelo hidrológico HBV.....	17
3.3.3	Modelo hidrológico HEC-HMS	20
3.4	Modelo hidrológico multi-lineal discreto.....	23
3.4.1	Parámetros del modelo MDLC	24
3.5	Modelo de optimización paramétrica.....	26
3.5.1	Búsqueda dimensional dinámica (DDS)	26
4	PREPARACIÓN DE LA INFORMACIÓN	28
4.1	Modelo digital de terreno	28
4.1.1	Modelos de elevación digital existentes	28
4.1.2	Análisis y procesamiento	31
4.2	Geotecnia	38
4.2.1	Fuentes de material	38
4.2.2	Manto de meteorización.....	40
4.2.3	Caracterización del lecho.....	41
4.2.4	Procesos de erosión en bancas.....	47
4.2.5	Análisis multitemporal	51
4.3	Consideraciones hidrodinámicas para el tránsito de caudales en ríos de montaña.....	57
4.4	Resistencia al flujo en ríos de montaña.....	58
5	DATOS DE CAMPO.....	59
6	MODELOS HIDRODINÁMICOS Y PARÁMETROS DE TRÁNSITO HIDRÁULICO.....	61
6.1	Puntos de Calibración	61

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
<p>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</p>		

6.2	Modelos hidrodinámicos a considerar	65
6.2.1	FLO 2D	65
6.2.2	RAMMS.....	68
6.2.3	AVAFLOW	71
6.2.4	OPEN TELEMAC.....	73
7	BIBLIOGRAFÍA	77
8	ANEXOS	80
8.1	Perfil Río Mulato.....	80
8.2	Perfil Río Sangoyaco.....	80
8.3	Perfil Quebrada La Taruca.....	80
8.4	Perfil Quebrada Taruquita	80

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
	<p>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</p>	



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Perfiles longitudinales de los cauces principales de la zona de estudio	7
Figura 2-2. Sistemas de pozas y rápidas (a) Esquemático y (b) Observado en la parte alta de la Quebrada Taruca.	7
Figura 3-1. Subdivisión del área del proyecto en microcuencas.	9
Figura 3-2. Diagrama del modelo lluvia-escorrentía GR4J.	14
Figura 3-3. Esquema conceptual del modelo HBV.....	20
Figura 3-4. Modelo conceptual del MDLC.	24
Figura 4-1. Modelo de elevación digital de 1m de resolución espacial.	29
Figura 4-2. Modelo de elevación digital de 2m de resolución espacial – sólo cabecera municipal.	29
Figura 4-3. Modelo de elevación digital de 2m de resolución espacial.	30
Figura 4-4. <i>Modelo de elevación digital de 3m de resolución espacial.</i>	31
Figura 4-5. <i>Modelo de elevación digital de 5m de resolución espacial.</i>	31
Figura 4-6. Perfil altitudinal de la parte baja del río Mulato – Cabecera municipal.	32
Figura 4-7. Perfil altitudinal de la parte baja de la quebrada Taruca - cabecera municipal.....	32
Figura 4-8. Histograma y curva de errores de la unión del DEM de 5m y el de 2m.	33
Figura 4-9. Batimetría de la quebrada Taruca.	34
Figura 4-10. Cauces desviados en color amarillo y drenajes de la cartografía 1:25000 en color azul.....	35
Figura 4-11. Cauces generados después de la corrección del DEM en color rojo y drenajes de la cartografía 1:25000 en color azul.	35
Figura 4-12. Perfil altitudinal de la parte media de la quebrada Taruca.	36
Figura 4-13. Ejemplo de resultados de modelos hidráulicos preliminares, donde, por presuntos errores en el modelo de elevación digital, el agua no fluye por los cauces de las quebradas existentes.	36
Figura 4-14. Ejemplo de diferencias en la formación de los cauces según el lugar donde se introduzca la masa de agua. En el fondo se presenta la mancha de inundación del evento y en colores azul y morado, los resultados de las modelaciones preliminares.	37
Figura 4-15. Ejemplo tramos en los que no se observa el vaso por el que debería ir el cauce según las ortofotos.	38
Figura 4-16. Fuentes de material observadas en la Quebrada Taruca en (a) La zona alta y en (b) La confluencia con la Quebrada Taruquita.	39
Figura 4-17. Quebradas que promueven la infiltración rápida en los mantos de meteorización de la zona de estudio.....	41
Figura 4-18. Localización muestras SGC. (SGC, 2017) y zonificación.....	42
Figura 4-19. <i>Mapa geológico escala 1:100000 (SGC, 2017).</i>	45
Figura 4-20. <i>Marsh Funnel Standard. (ASTM, 2010).</i>	46
Figura 4-21. <i>Estimación de ángulo de rozamiento interno y basal.</i>	47
Figura 4-22. <i>Monzogranito de Mocoa, fotografía tomada en la parte alta de La Taruca. (Fuente: El autor).</i>	48
Figura 4-23. <i>Fotografía tomada de informe de SGC (2017).</i>	49
Figura 4-24. <i>Fotografía Formación Pepino, tomada de informe de SGC (2017).</i>	50
Figura 4-25. <i>Análisis para localización de procesos de erosión en bancas. (Elaboración propia).</i>	51
Figura 4-26. <i>Aerofotografías de Mocoa, (Izquierda) 1962, (Derecha) 2017.</i>	52
Figura 4-27. <i>Ortofoto de Mocoa, 1962. (Corpoamazonia).</i>	53
Figura 4-28. <i>Imagen satelital Mocoa, 2001. GOOGLE EARTH.</i>	54
Figura 4-29. <i>Ortofoto Mocoa, 2017 antes del evento del 31-03-17.</i>	55
Figura 4-30. <i>Ortofoto de Mocoa, después del evento de 31-03-17. Corpoamazonia.</i>	56
Figura 4-31. <i>Análisis multitemporal, inventario de deslizamientos por fecha observados en imágenes de 1962, 2001 y abril 2017. (Corpoamazonia y elaboración propia).</i>	57
Figura 5-1. Localización de los puntos de control de la campaña de monitoreo a realizar en la zona de estudio. Las coordenadas de los puntos indicados se presentan en la Tabla 5-1.	60
Figura 6-1. Fotografía tomada después del evento y localización de alturas de flujo tomadas por el SGC. Fuente: (GeoSpatial SAS, 2017) y (Servicio Geológico Colombiano, 2017).	62
Figura 6-2. Puente en el que se presentó taponamiento. Ubicado sobre el río Sangoyaco antes de su desembocadura en el río Mocoa.	63
Figura 6-3. Lugar de la desembocadura actual de la quebrada Taruca sobre el río Sangoyaco.....	63
Figura 6-4. Localización de puente sobre el río Mulato destruido por la avalancha. Se encuentra ubicado aguas abajo de puente metálico provisional de uso peatonal.	64
Figura 6-5. Localización de puente sobre el río Sangoyaco destruido por la avalancha. Se ubica aguas debajo de la desembocadura de la quebrada Taruca.....	65
Figura 6-6. Esquema del cálculo multidireccional de la velocidad que realiza FLO-2D. Tomado y adaptado de (FLO 2D Inc., 2015)	66

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
<p><i>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</i></p>		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Parámetros del modelo GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier) Fuente: Autores, 2017	12
Tabla 4-1 Resumen de resultados de ensayos de laboratorio. (SGC, 2017).	44
Tabla 5-1. Puntos del plan de monitoreo a realizar en la zona de estudio. Fuente: El Autor.	60

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
<p>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</p>		

1 INTRODUCCIÓN

La adecuada descripción matemática de los procesos hidrológicos, geotécnicos e hidrodinámicos que afectan un sistema fluvial es de vital importancia en el diseño de un sistema de alerta temprana. Dado que éste es el objetivo principal de la presente consultoría, es primordial revisar, analizar y seleccionar los modelos hidrológicos, geotécnicos e hidrodinámicos que permitan entender, describir, y predecir la ocurrencia de avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato y Sangoyaco, y las quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.

De acuerdo con lo anterior, en este documento se condensan las principales características de la morfología de los sistemas a estudiar, los modelos que serán considerados en su descripción matemática, la información recopilada para tal efecto y la información de campo que será levantada durante la visita de campo, actividad a ejecutar en las fases siguientes del proyecto.

La correcta articulación de la información secundaria, la información que será recopilada en campo y las características de los modelos a emplear, asegurará un proceso de modelación juicioso, que permita describir el sistema de estudio, pronosticar su respuesta y planear actividades de manejo orientadas a la preparación ante la ocurrencia de avenidas futuras.

2 ANÁLISIS DE LA DINÁMICA FLUVIAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

La dinámica del sistema fluvial de la zona objeto de estudio responde a las características geológicas, topográficas y climáticas que ésta presenta. Los perfiles de los cuatro cauces principales de la zona de estudio (quebradas Taruca y Taruquita, ríos Sangoyaco y Mulato) se presentan en la Figura 2-1. Los detalles de estos perfiles y sus abscisados se presentan en el Anexo 1. De acuerdo con los perfiles presentados en el Anexo 1 y la Figura 2-1, los cauces de este sistema fluvial presentan pendientes bastante elevadas (hasta del 45%) lo cual nos permite caracterizarlos como ríos de montaña que, por estar localizados en el piedemonte amazónico de la Cordillera Oriental Colombiana, están adicionalmente expuestos a una alta pluviosidad. Esta combinación de factores hace que el régimen de caudales sea altamente variable y que los volúmenes de sedimento que ellos transportan estén compuestos principalmente por material de lecho. La carga de sedimentos está controlada principalmente por la disponibilidad del material a transportar, el cual es altamente irregular en cuanto a su forma y tamaño (Schmidt y Ergenzinger, 1994).

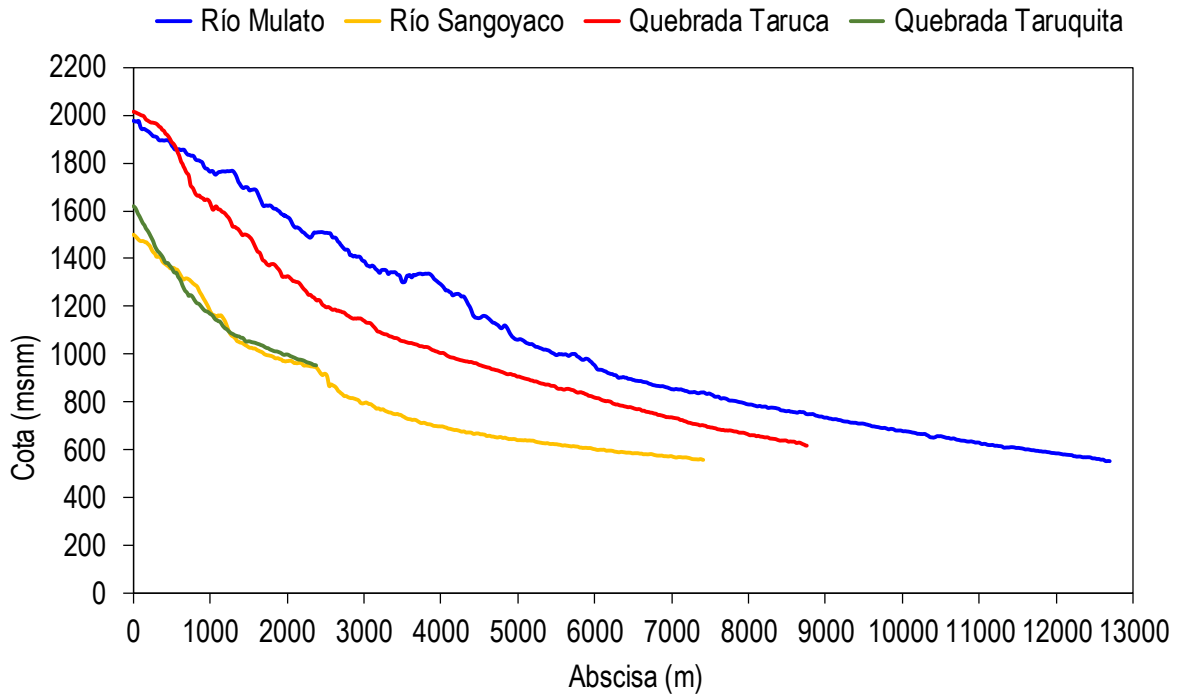


Figura 2-1. Perfiles longitudinales de los cauces principales de la zona de estudio

En las zonas más altas de estos cauces se presentan sistemas de rápidas y pozas, secuencias en forma de escalones de tramos con pendientes empinadas a muy empinadas (rápidas), con segmentos intermedios con pendientes moderadamente empinadas a suaves (pozas), que en algunas ocasiones pueden inclusive presentar pendientes negativas, véase Figura 2-2. Sin embargo, esta secuencia de rápidas y pozas sólo es estable durante flujos normales o crecientes de baja magnitud, pero pueden destruirse por completo ante el paso de una creciente de importante magnitud, tal como se indica esquemáticamente en la Figura 2-2 (a).

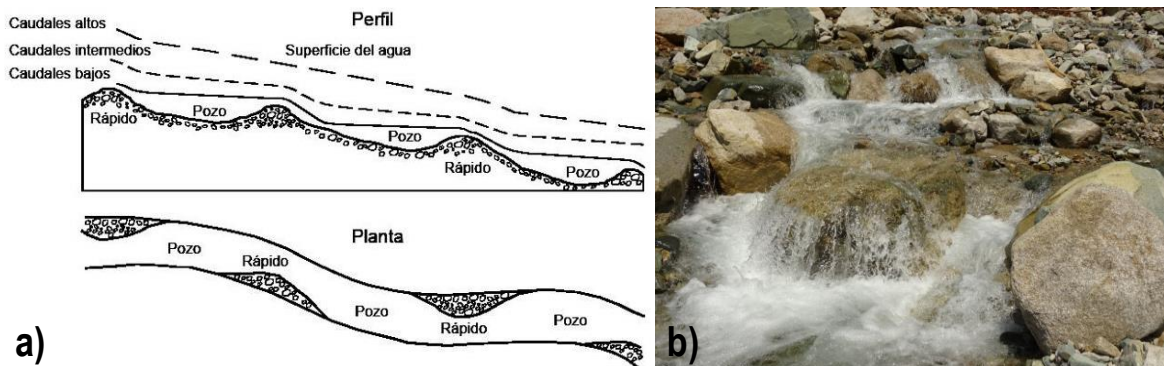


Figura 2-2. Sistemas de pozas y rápidas (a) Esquemático y (b) Observado en la parte alta de la Quebrada Taruca.

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
<p>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</p>		

Los arreglos irregulares y no sistemáticos de los atributos topográficos y sedimentológicos observados en los ríos de montaña hacen que realizar estimaciones hidráulicas de detalle sea extremadamente complejo. Este aspecto dificulta las tareas de manejo del recurso hídrico y del control de inundaciones, así como el monitoreo y predicción de caudales, cargas de sedimento y las amenazas inherentes a estos flujos. Adicionalmente, es importante mencionar que las crecientes actividades antrópicas, como la minería y la deforestación, disminuyen la resiliencia de estos sistemas, aumentando su variabilidad y complicando su caracterización. Todas estas características hacen que los ríos de montaña sean fundamentalmente diferentes de los cauces de planicie, impidiendo la utilización de formulaciones típicas de estos sistemas.

3 EVALUACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS

3.1 Marco conceptual

La modelación hidrológica propuesta para el Sistema de Alerta Temprana (SAT) por avenidas torrenciales en Mocoa es de tipo semidistribuido, es decir, basado en la respuesta de unidades hidrológicas de respuesta homogénea (UHRH) delimitadas por atributos globales como el relieve y el tipo de cobertura entre otros.

En este caso las UHRH corresponden a las microcuencas y zonas de transición que se presentan en la Figura 3-1 donde la respuesta de las unidades se conceptualiza como altamente dependiente del tipo de relieve o en el caso de las zonas de transición (zonas TC3, ML2, SG2) como elementos claves de la hidrodinámica de este tipo de eventos torrenciales dado que se constituyen como las zonas de amortiguamiento.

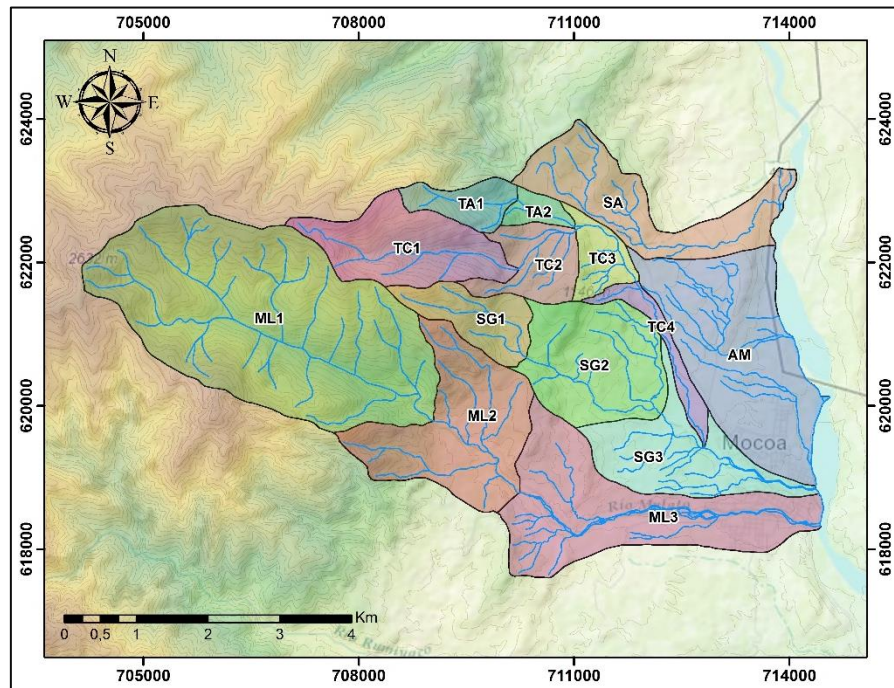




Figura 3-1. Subdivisión del área del proyecto en microcuencas.

Fuente: Elaboración propia

La elección del tipo de modelación obedece en mayor parte a la disponibilidad de información espacio temporal en la zona de estudio. Puede resultar inoficioso, e incluso contraproducente, discretizar el área del proyecto en unidades de análisis de alta resolución cuando no se tiene información con un alto nivel de detalle, por ejemplo en el caso de Mocoa la precipitación minatural necesaria para evaluar las UHRH viene de un proceso de inferencia con tres grandes fuentes de incertidumbre:

- La interpolación mediante un *kriging* ordinario de series diarias de precipitación que se encuentran en un radio de 20 km.
- La posterior generación de series sintéticas minatural basados en el comportamiento minatural de la única serie pluviográfica disponible en la zona y la serie diaria interpolada, proceso conocido como *downscaling* temporal.
- La precisión del pronóstico meteorológico generado a una resolución espacial de 1.33 km cuando la distancia promedio entre centroides de las UHRH es de aproximadamente 2.86 km.

En cuanto a la discretización del territorio las condiciones son más limitantes aún, pues no se tiene la disponibilidad de mediciones en terreno para poder plantear la constitución del suelo en distintas profundidades y

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
<p>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</p>		



granulometrías. Así, el modelo adoptado consiste en la evaluación de las distintas UHRH para su posterior interconexión o tránsito hidráulico.

Como el enfoque de este proyecto se centra en la generación probabilista de múltiples escenarios, las series meteorológicas (precipitación, temperatura y evapotranspiración) obedecen a diversos escenarios generados con la metodología de *downscaling* anteriormente descrita y las salidas del modelo meteorológico WRF. La simulación hidrológica se realizará con tres modelos hidrológicos conceptuales a saber: GR4J (Perrin, Michel, & Andréassian, 2003), HBV (Ahmed, 2010) y el HEC-HMS (US Army Corps of Engineers, 2000). El tránsito hidráulico se ejecutará con el modelo multilínea discreto de tránsito de crecientes - MDLC (Camacho & Lees, 1999).

La calibración de cada modelo hidrológico se realizará con base en la optimización global simultánea de los parámetros de todas las UHRH acopladas con el MDLC, basados en las observaciones y en los pronósticos del modelo WRF. La optimización se ejecutará con el modelo de búsqueda dimensional dinámica – DDS (Tolson & Shoemaker, 2007). A continuación, se presentan los elementos que conforman la modelación hidrológica.

3.2 Modelos meteorológicos

Los modelos globales o productos de re-análisis a escalas gruesas (~50-200km de malla) no representan adecuadamente la interacción de los procesos sinópticos y de mesoescala que ocurren sobre topografía compleja, así como la estructura vertical y horizontal de circulaciones concentradas y de bajo nivel que afectan directamente los procesos de superficie, incluyendo aquellos fenómenos de precipitación fuerte como el del evento del 1 de abril de 2017 en Mocoa, Putumayo. Los modelos numéricos de predicción del estado del tiempo (*numerical weather prediction –NWP*) son herramientas de pronóstico que pueden simular la evolución de los sistemas de circulación en un rango amplio de escalas (0.1 km- 10km). Entre los modelos de NWP más populares están el *Penn State Fifth Generation Mesoscale Model (MM5)* y el *Weather Research and Forecast Model (Skamarock et al., 2007)*. El MM5 y el WRF son modelos no-hidrostáticos que permiten la simulación de fenómenos como tormentas severas, sistemas tropicales y extra-tropicales, y de circulaciones costeras y topografía compleja (Cuenca de la Amazonia). Se ha demostrado que los modelos NWP agregan valor cuando se usa información de los modelos globales o re-análisis como condiciones iniciales y de borde descritos a continuación.

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
	<p>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</p>	

3.2.1 Condiciones iniciales y de frontera (IC/BC)

Existen dos conjuntos de datos que se pueden implementar para la inicialización y predicción en tiempo real, los datos de EE.UU *Global Forecasting Systems* (GFS con dos resoluciones espaciales) y del *European Center of Medium-range Weather Forecast* (ECMWF). Ambos sistemas consisten en modelos globales de pronósticos y son disponibles para los el uso directo de WRF. El GFS y el ECMWF son muy similares aunque difieren (sutilmente) en los métodos de asimilación de datos y los procedimientos para la inclusión y transformación de datos derivados de plataformas satelitales.

Además, estos modelos son ampliamente reconocidos en su capacidad de simular los aspectos básicos del clima de la región y sistemas meteorológicos que introducen variabilidad (y predictibilidad) en la región del sur de Colombia (Cuenca Amazónica).

3.2.2 Análisis de sensibilidad del modelo meteorológico

Existen muchos grados de libertad y esquemas de parametrización física dentro de WRF, incluyendo, física de las nubes, capa limite, convección, radiación solar, interacción suelo- atmósfera, que dificultan la selección de una combinación de parámetros única (también llamado “simulación determinística”). Esta tarea es más difícil considerando que las condiciones climáticas cambian durante el año y durante condiciones del flujo extremas. Sin embargo, es común, y en algunos casos necesario, realizar estudios de sensibilidad a las parametrizaciones físicas del modelo. Por ejemplo variando los esquemas disponibles de parametrización de los procesos más importantes para la aplicación deseada, en este caso eventos de precipitación. Existen varias opciones para los procesos de interacción suelo- atmosfera, capa superficial y limite, procesos húmedos (convectivos y de microfísica de las nubes), procesos de radiación. La calidad de las condiciones de frontera estáticas y la escala de la información, incluyendo la topografía, usos del suelo, y SSTs, también pueden influenciar las soluciones de WRF.

Quando los recursos computacionales lo permiten, se recomienda el uso de conjunto de simulaciones o “Ensamblados o Simulaciones probabilísticas”. Esto se justifica dado a que la incertidumbre que se introduce en las diferentes capas de modelamiento, las limitaciones en las condiciones iniciales y de borde, y en el procesamiento de la información para las simulaciones. Los ensambles tienen un costo computacional alto pero ayudan a determinar el rango de soluciones asociados ya sea a (i) diferentes esquemas de parametrización física, (ii) perturbaciones en las condiciones iniciales, (iii) o diferentes modelos globales y NWP, (iv) o combinaciones de las

anteriores. Es común realizar estudios de diagnósticos para buscar la mejor forma y realizar ensambles ya sea durante condiciones de flujo frecuentes o casos extremos. Estos diagnósticos entregan información de la predictibilidad del sistema y en algunos casos, configuraciones del modelo “óptimas” para replicar en modo operativo.

3.2.3 Modelos imperfectos

Los modelos meteorológicos son imperfectos y altamente no-lineales, i.e., pequeños cambios en las condiciones iniciales causan divergencia en las soluciones. Varios de los procesos físicos atmosféricos son parametrizados en el modelo y en algunos casos no completamente entendidos. Se acostumbra estudiar el efecto de los diferentes esquemas de parametrización y el efecto de las observaciones usadas para crear las condiciones iniciales. Aunque la configuración óptima del modelo puede variar con respecto a la época del año y las condiciones de flujo predominantes. Los métodos de predicción probabilista (ensambles) son una forma segura y cada vez más común para atacar estos problemas.

3.3 Modelos hidrológicos

3.3.1 Modelo hidrológico agregado GR4J

El GR4J (Por sus siglas en francés, Génie Rural à 4 paramètres Journalier) es un modelo lluvia-escorrentía agregado, de cuatro parámetros Tabla 3-1 y concebido a resolución diaria (Perrin et al., 2003); no obstante, se puede escalar a resolución horaria (Mathevet, 2005).

Parámetro	Descripción
X ₁ (mm)	Capacidad máxima del tanque de producción
X ₂ (mm)	Coefficiente de intercambio de aguas subterráneas
X ₃ (mm)	Capacidad máxima para el tránsito en canales
X ₄ (días o horas)	Tiempo base del hidrograma unitario UH1
X ₅ (adimensional)	Factor de escalado de resolución diaria a horaria

Tabla 3-1 Parámetros del modelo GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier) Fuente: Autores, 2017

Todas las variables (entradas, salidas, variables internas) en el balance hídrico están expresadas en mm, por tal motivo, los volúmenes de agua deben ser divididos por el área de la cuenca cuando sea necesario (Carvajal & Roldán, 2007). A continuación, se presentan los parámetros y una descripción general del modelo mediante un

diagrama, donde la precipitación y la evapotranspiración potencial se denotan como P y E respectivamente (Figura 3-2).

El proceso llevado a cabo al emplear el modelo lluvia-escorrentía GR4J se detalla a continuación, tomado de la descripción de Carvajal & Roldán (2007).

3.3.1.1 Determinación de la precipitación y la evapotranspiración potencial neta.

La precipitación neta P_n o una capacidad de evapotranspiración E_n se determina al restar la evapotranspiración potencial de la precipitación, tomando como cero la capacidad de intercepción.

$$\text{Si } P \geq E, \text{ entonces } P_n = P - E \text{ y } E_n = 0 \quad \text{Ecuación 3-1}$$

$$\text{Si } P < E, \text{ entonces } P_n = 0 \text{ y } E_n = E - P \quad \text{Ecuación 3-2}$$

3.3.1.2 Almacenamiento de producción

Para el caso en que P_n no es cero, una parte P_s de P_n , entra al tanque de producción.

$$P_s = \frac{x_1 \left(1 - \left(\frac{S}{x_1} \right)^2 \right) \tanh \left(\frac{P_n}{x_1} \right)}{1 + \frac{S}{x_1} \tanh \left(\frac{P_n}{x_1} \right)} \quad \text{Ecuación 3-3}$$

P_s se determinada como una función del nivel (S) en el tanque, donde x_1 (mm) es la máxima capacidad del tanque de producción. Cuando E_n es diferente de cero, se determina la tasa real de evaporación como una función del nivel en el almacenamiento de producción con el fin de calcular la cantidad E_s de agua que se evaporará del tanque.

$$E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{x_1} \right) \tanh \left(\frac{P_n}{x_1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{x_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{x_1} \right)} \quad \text{Ecuación 3-4}$$

Es así, que el contenido de agua en el tanque de producción se actualiza como:

$$S = S - E_s + P_s \quad \text{Ecuación 3-5}$$

Es importante notar que S no puede exceder a x_1 . Una cantidad P_{erc} denota entonces la percolación del almacenamiento de producción. Este valor se calcula de la siguiente manera:

$$P_{erc} = S \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4 S}{9 x_1} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad \text{Ecuación 3-6}$$

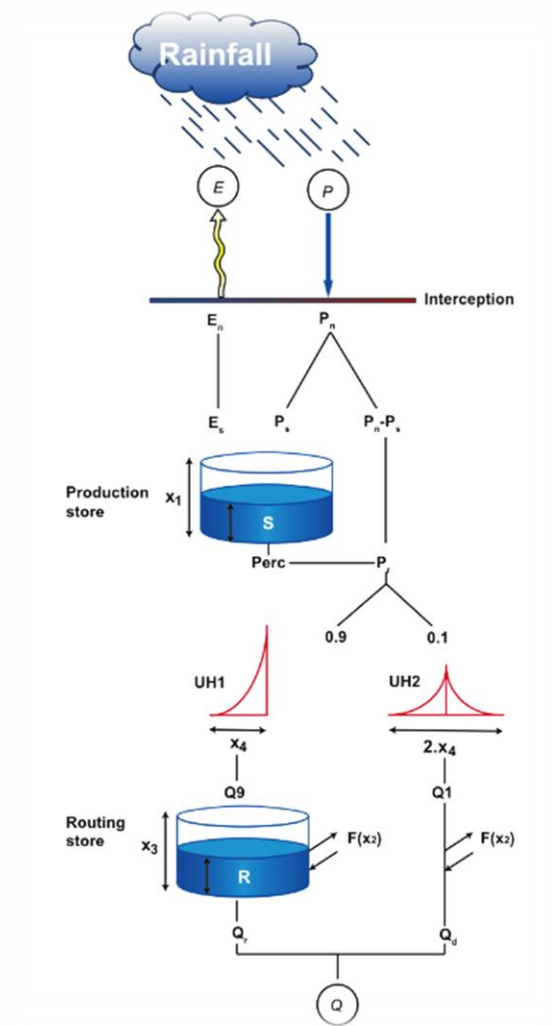




Figura 3-2. Diagrama del modelo lluvia-escorrentía GR4J.
Fuente: (Perrin et al., 2003)

	Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.	
	Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía	

De la expresión anterior se concluye que la percolación no contribuye mucho al caudal, por tanto, es importante principalmente para la simulación de eventos mínimos. El valor de P_{erc} es siempre menor que S . El nuevo nivel en el tanque queda definido como:

$$S = S - P_{erc} \quad \text{Ecuación 3-7}$$

3.3.1.3 Distribución lineal con hidrogramas unitarios

La cantidad total de agua P_r que alcanza las funciones de distribución está dada por:

$$P_r = P_{erc} + (P_n - P_s) \quad \text{Ecuación 3-8}$$

El valor de P_r se divide en dos componentes de flujo a saber: el 90% de P_r se distribuye por medio de un hidrograma unitario UH_1 y luego por un tanque de distribución no lineal, el 10% restante de P_r es distribuido por medio de un hidrograma unitario UH_2 . Con UH_1 y UH_2 , se puede simular el tiempo de rezago entre el evento de lluvia y el caudal pico resultante. Las ordenadas de ambos hidrogramas son usadas en el modelo para distribuir la lluvia efectiva sobre varios intervalos de tiempo sucesivos. UH_1 y UH_2 dependen del mismo parámetro x_4 expresado en días, sin embargo, UH_1 tiene un tiempo base de x_4 días, mientras que UH_2 tiene un tiempo base de $2x_4$ días. El parámetro x_4 puede tomar valores reales y debe ser mayor de 0.5 días.

En su forma discreta, los hidrogramas UH_1 y UH_2 tienen n y m ordenadas respectivamente, donde n y m son los enteros más pequeños que exceden x_4 y $2x_4$ respectivamente. Las ordenadas de ambos hidrogramas se derivan de las curvas-S correspondientes (proporción acumulada de la entrada con el tiempo) denotadas por SH_1 y SH_2 respectivamente. SH_1 está definida a lo largo del intervalo de tiempo t de la siguiente forma:



$$\text{Para } t \leq 0, SH_1(t) = 0 \quad \text{Ecuación 3-9}$$

$$\text{Para } 0 < t < x_4, SH_1(t) = \left(\frac{t}{x_4}\right)^{\frac{5}{2}} \quad \text{Ecuación 3-10}$$

$$\text{Para } t \geq x_4, SH_1(t) = 1 \quad \text{Ecuación 3-11}$$

SH_2 se definida similarmente:

$$\text{Para } t \leq 0, SH_2(t) = 0 \quad \text{Ecuación 3-12}$$

	Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.	
	Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía	

$$\text{Para } 0 < t \leq x_4, SH2(t) = \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{x_4} \right)^{\frac{5}{2}} \quad \text{Ecuación 3-13}$$

$$\text{Para } 0 < t < 2x_4, SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{x_4} \right)^{\frac{5}{2}} \quad \text{Ecuación 3-14}$$

$$\text{Para } t \geq 2x_4, SH2(t) = 1 \quad \text{Ecuación 3-15}$$

Finalmente, las ordenadas de UH1 y UH2 se determinan como:

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j - 1) \quad \text{Ecuación 3-16}$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j - 1) \quad \text{Ecuación 3-17}$$

Donde j es un entero.

3.3.1.4 Intercambio de agua en la cuenca

En este paso se calcula un término F que actúa en ambas componentes del flujo, el cual indica el intercambio de agua subterránea:

$$F = x_2 \left(\frac{R}{x_3} \right)^{\frac{7}{2}} \quad \text{Ecuación 3-18}$$

R es el nivel en el tanque de distribución, x_3 es la capacidad de referencia y x_2 es el coeficiente de intercambio. El parámetro x_2 puede ser positivo en el caso en que se importa agua, negativo en el caso en que hay pérdidas, o cero cuando no hay intercambio de agua. Entre más alto el nivel en el tanque de distribución mayor es el intercambio. En valor absoluto, F no puede ser mayor que x_2 , puesto que el coeficiente de intercambio representa la máxima cantidad de agua que puede ser adicionada (o liberada) a cada componente de flujo, cuando el nivel en el tanque de distribución es igual a x_3 .

3.3.1.5 Almacenamiento de distribución no lineal

El valor de R se actualiza adicionando el término F y la salida $Q9$ proveniente de UH1:

$$R = \max(0; R + Q9 + F) \quad \text{Ecuación 3-19}$$

	<i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i>	
	Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía	

El caudal de salida del tanque (Q_r), se determina como:

$$Q_r = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{x_3} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad \text{Ecuación 3-20}$$

Q_r siempre es menor que R . El nuevo nivel en el almacenamiento es:

$$R = R - Q_r \quad \text{Ecuación 3-21}$$

Aunque al comienzo de un intervalo de tiempo el tanque puede recibir una cantidad de agua mayor que el déficit de saturación $x_3 - R$, el nivel en el tanque nunca puede exceder la capacidad x_3 al final del intervalo de tiempo. Por consiguiente, la capacidad x_3 es llamada la capacidad máxima diaria. Este tanque de distribución está en la capacidad de simular recesiones cuando sea necesario.

3.3.1.6 Caudal total

La salida Q_1 proveniente de UH2, también está sujeta al intercambio de agua F , de esta forma la componente Q_d queda definida de la siguiente forma:



$$Q_d = \max(0; Q_1 + F) \quad \text{Ecuación 3-22}$$

Finalmente, el caudal total se determina como:

$$Q = Q_r + Q_d \quad \text{Ecuación 3-23}$$

3.3.2 Modelo hidrológico HBV

El modelo HBV pertenece a la segunda generación de modelos, caracterizada por intentar reproducir los procesos más importantes que están presentes en la producción de escorrentía con una estructura más robusta y sencilla posible. El modelo hidrológico HBV es un modelo hidrológico conceptual semi-distribuido desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI, por sus siglas en inglés Swedish Meteorological and hydrological Institute), el modelo fue nombrado de la abreviatura de Hydrologiska Byrans Vattenbalans-avdelning (Ahmed, 2010).

	<p align="center"><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
<p align="center">Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</p>		

El modelo se basa sobre el principio de simplicidad: es necesario que describa de manera exhaustiva la realidad física que investiga, sin exceder con el número de parámetros utilizados para describirla. Siempre según el mismo principio se ha intentado de reducir al máximo el número de parámetros “libres”, es decir aquellos cuyo valor óptimo se obtiene calibrando el modelo con datos observados. Como se ha mencionado, se trata de un modelo conceptual semi-distribuido: dentro de su estructura la unidad hidrológica básica es la subcuenca, que está acompañada por una caracterización de área y elevaciones y por una clasificación de uso de suelo muy poco detallada. El modelo está estructurado en tres módulos principales a saber (Ortiz, 2011):

- Acumulación/fusión de nieve.
- Compuo del contenido de humedad del suelo.
- Respuesta hidrológica y la propagación del flujo en el río.

Los datos requeridos de entrada al modelo son la precipitación. Estos datos se proporcionan con paso temporal diario, de todas formas acepta resoluciones temporales más bajas. El procedimiento de cálculo del estado de humedad del suelo requiere datos de evapotranspiración potencial.

Los valores climáticos promediados se calculan independientemente para cada subcuenca, mediante un balance de pesos, en el cual los pesos se determinan por consideraciones topográficas y climatológicas, o por métodos geométricos, como por ejemplo el método de los polígonos de Thiessen. A continuación se describen los módulos de humedad del suelo y respuesta de la escorrentía, tomada de (Ortiz, 2011)

3.3.2.1 Humedad del suelo

El módulo de humedad del suelo del modelo HBV calcula un índice de humedad para la cuenca entera e integra las cantidades de intercepción y de contenido de humedad del suelo. El cálculo está controlado por tres parámetros libres, FC, BETA y LP. FC es el máximo almacenamiento de humedad en el suelo en la cuenca y BETA determina la contribución relativa a la escorrentía de cada milímetro de lluvia por dado déficit de humedad del suelo. LP controla la forma de la curva de reducción de la evapotranspiración potencial, es decir que para valores inferiores a LP la evapotranspiración actual será reducida.

Al fin de la generación de escorrentía, la respuesta aumenta en cantidad al aumentar del estado de humedad. El módulo de cálculo de evapotranspiración ha sido modificado para tener en cuenta anomalías de temperatura durante primaveras y veranos más fríos de lo normal o al revés inviernos caracterizados por temperaturas más

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
<p>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</p>		

altas del estándar. Tal modificación ha sido obtenida mediante una corrección que se calcula comparando los datos actuales de temperatura y evapotranspiración con aquellos promediados sobre un largo rango de registros:

$$PE_A = (1 + C(T - T_M)) PE_M$$

Ecuación 3-24

Dónde:

PE_A = Evapotranspiración potencial ajustada.

C = Parámetro empírico del modelo.

T = Temperatura media diaria.

T_M = Temperatura mensual promediada sobre un intervalo largo de registros.

PE_M = Evapotranspiración potencial promediada un intervalo largo de registros.

El valor ajustado de la evapotranspiración potencial está limitado a valores positivos y no puede exceder el doble del valor mensual promediado.

3.3.2.2 Respuesta de la escorrentía

El modulo que calcula la respuesta hidrológica transforma en caudal el exceso de agua calculado por el módulo de la humedad del suelo, para cada sub-cuenca. El modulo está estructurado en dos embalses con los siguientes parámetros libres:

- Tres coeficientes de recesión: K0, K1 y K2.
- Un umbral de percolación, UZL.
- Un ratio de percolación constante PERC.

Finalmente el proceso consta de un proceso de filtro para suavizar (smoothing) el flujo generado. Este filtro consiste en una función triangular de peso con un parámetro libre, MAXBAS. Además está disponible el método de propagación en cauce de Muskingum, para propagación de ondas de crecidas. El modelo HBV en su versión más sencilla con solo una cuenca esquematizada, tiene 12 parámetros libres que deben de ser calibrados. El esquema conceptual del modelo se muestra en la Figura 3-3.

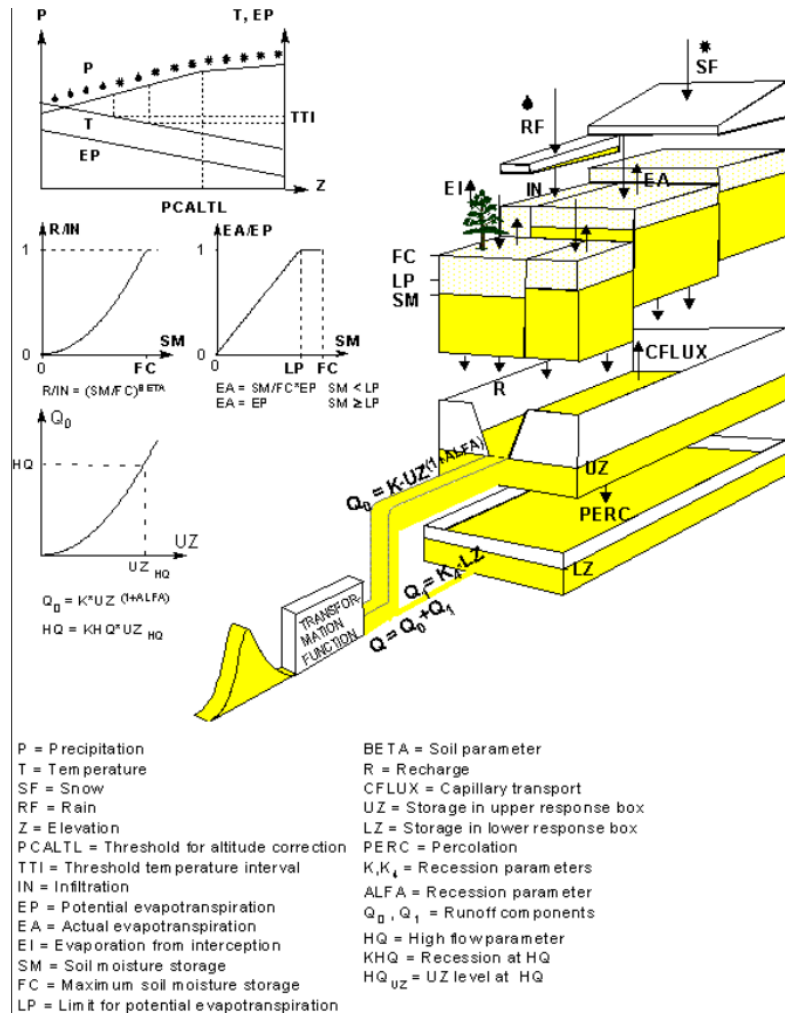




Figura 3-3. Esquema conceptual del modelo HBV.
Fuente: (Ortiz, 2011)

3.3.3 Modelo hidrológico HEC-HMS

El Sistema de Modelado Hidrológico HEC-HMS (por sus sigla en inglés, Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System), está diseñado para simular los procesos hidrológicos completos de los sistemas de cuencas dendríticas. El software incluye muchos procedimientos tradicionales de análisis hidrológico tales como infiltración de eventos, procesos lluvia-escorrentía, hidrogramas unitarios, etc (US Army Corps of Engineers, 2000).

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
	<p>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</p>	

HEC-HMS permite al modelador elegir entre numerosas parametrizaciones de pérdida de infiltración; sin embargo, sólo el modelo SCS-CN permite cálculos de infiltración espacialmente distribuidos (Knebl, Yang, Hutchison, & Maidment, 2005). Este modelo está disponible en HEC-HMS para simular escorrentía superficial directa de un evento de tormenta (lluvia-escorrentía) (Chu & Steinman, 2009). Para facilitar el modelado hidrológico continuo, se ha incorporado un modelo de contabilidad de la humedad del suelo (SMA) en HEC-HMS, básicamente, el SMA es un modelo agrupado que representa una subcuenca con capas de almacenamiento bien relacionadas que explican la interceptación de la lluvia, el almacenamiento de depresión superficial, la infiltración, la evapotranspiración, así como el agua del suelo y la infiltración de agua subterránea (Chu & Steinman, 2009).

En el modelo HEC-HMS, algunos parámetros se requieren como entradas para simular los hidrogramas de escorrentía. Algunos de los parámetros pueden estimarse mediante la observación y las mediciones de las características de las cuencas y las corrientes. El método utiliza generalmente un hidrograma unitario derivado empíricamente o alguna forma estándar definida por uno o dos parámetros, tales como el tiempo pico (Razi et al., 2010). La capacidad de infiltración se cuantifica en un parámetro derivado por el SCS, basada en el uso de la tierra, el tipo de suelo, cobertura de la tierra y el grupo de suelos hidrológicos. Los grupos de suelo se determinan en base al tipo de suelo y su capacidad de infiltración. El método de pérdida de infiltración se deriva de un conjunto de ecuaciones empíricas que definen la partición de la precipitación en infiltración y escorrentía (Knebl et al., 2005).

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{((P - I_a) + S)} \quad \text{Ecuación 3-25}$$

$$I_a = 0.2S \quad \text{Ecuación 3-26}$$

$$S = \left(\frac{1000}{CN} \right) - 10 \quad \text{Ecuación 3-27}$$

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad \text{Ecuación 3-28}$$

Dónde:

Q = Escorrentía en pulgadas.

P = Precipitación en pulgadas.

S = Potencial máximo de retención.

I_a = Abstracción inicial.

CN = Curva número de escorrentía.

La abstracción inicial es un parámetro variable que tiene en cuenta las pérdidas antes del inicio de la escorrentía, como la interceptación y el almacenamiento de la depresión. Las pérdidas por evapotranspiración se consideran insignificantes para el modelo preliminar debido a varios factores: la intensidad de la precipitación que se está modelando, la saturación continua del aire y la suposición resultante de que el volumen de evapotranspiración es despreciable comparado con el volumen de escorrentía.

El objetivo principal de la implementación conjunta del evento SCS-CN y del modelado continuo de SMA es fortalecer la capacidad global de modelado. Los parámetros que están bien calibrados en el modelado de sucesos se utilizan además para mejorar el modelado hidrológico continuo. A continuación se detallan las estimaciones que se realizan en el SMA, tomadas de (Chu & Steinman, 2009).

Según el método SMA en HEC-HMS, la lluvia contribuye en primer lugar al almacenamiento de interceptación de la precipitación (S_c). Entonces, el agua de lluvia está disponible para la infiltración, que se determina por la capacidad de infiltración y el almacenamiento del suelo (S_s). Cualquier exceso de agua de lluvia llena secuencialmente el almacenamiento de depresión superficial (S_{sf}) y eventualmente se convierte en escorrentía superficial. La tasa potencial de infiltración está dada por:

$$i(t) = i_m \frac{S_{sd}(t)}{S_{s\ max}} \quad \text{Ecuación 3-29}$$

En el cual,

$$S_{sd}(t) = S_{s\ max} - S_s(t) \quad \text{Ecuación 3-30}$$

Dónde:

$i(t)$ = Tasa de infiltración potencial en el tiempo t (la tasa de infiltración real también depende del agua disponible para la infiltración en el instante t).



i_m = Tasa máxima de infiltración.

$S_{s\ max}$ = Almacenamiento máximo de agua en el suelo.

$S_s(t)$ = Almacenamiento del agua del suelo en el tiempo t .

$S_{sd}(t)$ = Déficit de almacenamiento de agua en el suelo en el tiempo t .

La tasa de infiltración es igual a cero cuando $S_{sd}(t) = 0$ ($S_s(t) = S_{s\ max}$) y alcanza tasa máxima i_m cuando $S_{sd}(t) = S_{s\ max}$ ($S_s(t) = 0$). A partir de la definición de la abstracción inicial en el modelo CN y los procedimientos de cálculo del modelo SMA (no evaporación durante la lluvia), se tiene:

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
	<p>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</p>	

$$I_a = S_c + S_{sf} + F_0 \quad \text{Ecuación 3-31}$$

En el cual,

$$F_0 = i_0 t_0 \quad \text{Ecuación 3-32}$$

Donde F_0 es la infiltración acumulada antes de que empiece la escorrentía superficial, i_0 es la tasa media de infiltración antes de que comience la escorrentía superficial, y t_0 es el tiempo inicial.

Remplazando la expresión de la Ecuación 3-32 y la determinación de S en centímetros en la Ecuación 3-28, se tiene:

$$F_0 = \left(\frac{508}{CN} - 5.08 \right) - S_c - S_{sf} \quad \text{Ecuación 3-33}$$

Para todo el evento de precipitación, la escorrentía total puede expresarse como:



$$R = P - S_c - S_{sf} - F_0 - F_r \quad \text{Ecuación 3-34}$$

Donde F_r corresponde a la infiltración acumulada después del inicio de la escorrentía superficial.

Aunque SCS-CN y SMA utilizan métodos diferentes para simular el escurrimiento superficial, la infiltración y otros procesos hidrológicos relacionados, las derivaciones presentadas anteriormente proporcionan una manera de estimar mejor los parámetros involucrados en el modelo continuo SMA basado en las estimaciones del modelo SCS -CN.

3.4 Modelo hidrológico multi-lineal discreto

El Modelo hidrológico multi-lineal discreto de retraso y tránsito de crecientes - MDLC (por sus siglas en inglés Multilinear Discrete Lag – Cascade Method of Channel Routing), es una extensión del modelo de cascada multi-lineal discreto propuesto por Pemural (1994) (Camacho & Lees, 1999), cuyo modelo conceptual está basado en un elemento de canal discreto, acoplado en una serie de n celdas o embalses en serie (Ver Figura 3-4). El parámetro de canal lineal está caracterizado por un parámetro de retraso del frente de onda τ cuyo efecto es simplemente el de trasladar el hidrograma sin atenuación (Cantor Monroy, 2010).

	Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.	
	Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía	

$$k_3 = \frac{3}{m^2} (1 + (m - 1)F_0^2) \left(\frac{y_0}{S_0 X} \right)^2 \left(\frac{X}{m u_0} \right)^3$$

Ecuación 3-41

Dónde:

F_0 = Numero de Froude.

Y_0 = Profundidad de flujo uniforme para el caudal de referencia.

S_0 = Pendiente longitudinal del canal.

X = Distancia a la cual es calculado el hidrograma.

m = Relación entra la velocidad de la onda cinemática C_0 y la velocidad media del flujo para las condiciones de referencia u_0 , y se determina mediante la siguiente ecuación.

$$m = \frac{c_0}{u_0} = \frac{\left(\frac{dQ}{dA} \Big|_{A = A_0} \right)}{\frac{Q_0}{A_0}}$$

Ecuación 3-42

Las relaciones son válidas para cualquier tipo de sección transversal y cualquier fórmula de fricción utilizada. Se ha demostrado que el movimiento promedio de una onda de flujo linealizada en un canal general uniforme de cualquier sección transversal y formula de fricción está dada, exactamente, por la aproximación de la onda cinemática (Camacho & Lees, 1999) presentada a continuación.

$$\bar{t}_{fl} = \frac{L}{c_0} = \frac{L}{m u_0}$$

Ecuación 3-43



El cálculo de los parámetros se obtiene partir de los tres momentos del sub modelo lineal, reordenando las expresiones, se definen los parámetros así:

$$K = \frac{3}{2m} (1 + (m - 1)F_0^2) \left(\frac{y_0}{S_0 L} \right) \left(\frac{L}{m u_0} \right)$$

Ecuación 3-44

$$n = \frac{\frac{4m}{9} (1 - (m - 1)^2 F_0^2)}{(1 + (m - 1)F_0^2) \left(\frac{y_0}{S_0 L} \right)}$$

Ecuación 3-45

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
	<p>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</p>	

$$\bar{t}_{fl} = \frac{L}{\mu u_0} \left[1 - \frac{\frac{3}{2}(1 + (m - 1)^2 F_0^2)}{(1 + (m - 1)F_0^2)} \right] \quad \text{Ecuación 3-46}$$

Nótese que los parámetros del modelo MDLC, n , K y \bar{t}_{fl} están relacionados con las características físicas del canal para un caudal específico de referencia Q_0 . Estos parámetros tienen validez en un amplio rango donde se puede tener o no en cuenta la linealidad de las ecuaciones. En general, se asume que el caudal de referencia Q_0 varía de acuerdo con la intensidad del caudal de entrada:

$$Q_0 = I_b + a[I(t) - I_b] \quad \text{Ecuación 3-47}$$



Donde, I_b es el caudal de flujo permanente inicial antes del arribo de la onda de creciente $I_b = I(t = 0)$; y a es el coeficiente empírico, con límites entre 0 y 0.5. Esto es consistente con los conceptos del modelo MDLC, y con el caudal de referencia, en el cual se basa la linealización. Estos cálculos continuos en el tiempo hacen que la linealización sea una buena aproximación a la solución de las ecuaciones no lineales.

En este modelo el coeficiente a depende de las características del tramo y del tipo de onda que se está modelando. Un valor de $a = 0$ para el caso más simple, de un canal lineal, hasta valores de 0.5 para ondas cinemáticas. Este coeficiente también puede ser visto como una medida de la dispersión en el tramo de estudio (Camacho & Lees, 1999).

3.5 Modelo de optimización paramétrica

3.5.1 Búsqueda dimensional dinámica (DDS)

El DDS es una heurística estocástica de búsqueda global que busca encontrar una solución próxima a la óptima global con un bajo número de evaluaciones de la función objetivo. Este método busca localmente en el espacio paramétrico y a medida que avanza el número de iteraciones se identifican las dimensiones que mayor impacto tienen en la optimización de la función objetivo. Las soluciones candidatas son creadas perturbando aleatoriamente los valores actuales de una de las dimensiones del problema. La magnitud de estas perturbaciones se toma de muestras al azar que siguen una distribución normal con media cero. A continuación, se detallan los pasos metodológicos del algoritmo, tomados de Tolson & Shoemaker (2007).

	<p align="center">Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</p>	
	<p>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</p>	

Definición de las entradas del DDS

- Parámetro del grado de perturbación (por defecto $r = 0.2$)
- Máximo número de evaluaciones de la función objetivo (m)
- Vectores de rangos de los parámetros X^{\min} , y máximos X^{\max} .
- Inicialización de la semilla $X^0 = [x_1, \dots, x_d]$.

Conjunto de contadores desde 1, $i = 1$, y evalúa la función objetivo F para la solución inicial o semilla, $F(x_0)$:

$$F_{best} = F(x^0), y x^{best} = x^0 \quad \text{Ecuación 3-48}$$

Selecciona aleatoriamente J de las D variables posibles para incluirlas en el barrido

- Calcula la probabilidad de que cada variable tomada sea incluida en $\{N\}$ como función de la iteración actual:
- Para $d = 1 \dots D$ variables tomadas, las adiciona a $\{N\}$ con una probabilidad P .

Para $j = 1, \dots, J$ la variable de decisión en $\{N\}$, perturba a x_j^{new} usando una variable aleatoria estándar normalmente distribuida, $N(0,1)$, reflejando la variable de tomada a los límites si es necesario:

$$x_j^{new} = x_j^{best} + \sigma_j N(0,1), \text{ donde } \sigma_j = r(x_j^{max} - x_j^{min}) \quad \text{Ecuación 3-49}$$

- Si $x_j^{new} < x_j^{min}$, refleja la perturbación:

$$x_j^{new} = x_j^{min} + (x_j^{min} + x_j^{new})$$

Ecuación 3-50



- Si $x_j^{new} > x_j^{max}$, entonces $x_j^{new} = x_j^{min}$

- Si $x_j^{new} > x_j^{max}$, refleja la perturbación:

$$x_j^{new} = x_j^{max} - (x_j^{new} - x_j^{max})$$

Ecuación 3-51

- Si $x_j^{new} < x_j^{min}$, entonces $x_j^{new} = x_j^{max}$

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
	<p>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</p>	

Evalúa $F(x^{new})$ y actualiza la mejor solución si es necesario

- Si $F(x^{new}) \leq F_{best}$ Actualiza la nueva mejor solución:
 - $F_{best} = F(x^{new})$ y $x^{best} = x^{new}$

Actualización del conteo de iteraciones, $i = i + 1$, y comprueba el criterio de parada:

- Si $i = m$, Para y muestra la salida
- De lo contrario retorna al PASO 3

4 PREPARACIÓN DE LA INFORMACIÓN

4.1 Modelo digital de terreno

Como fuente principal para realizar la modelación hidráulica en el área de estudio se evalúan los modelos de elevación digital disponibles con el fin de tener la mejor representación del terreno de las subcuencas de los ríos Mulato y Sangoyaco; y las quebradas Taruca y Taruquita para antes del evento del 31 de marzo de 2017. También se hace necesario evaluar la precisión de los DEM para generar los productos que necesiten este insumo para procesar y analizar datos.

4.1.1 Modelos de elevación digital existentes

Para el área de estudio hay disponibles cinco modelos de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés) de antes del evento del 31 de marzo de 2017, los cuales son descritos a continuación:

4.1.1.1 DEM con resolución espacial de 1m:

Abarca la cabecera municipal de Mocoa y no tiene información en la parte media y alta del río Mulato y las quebradas Taruca y Sangoyaco (Figura 4-1).

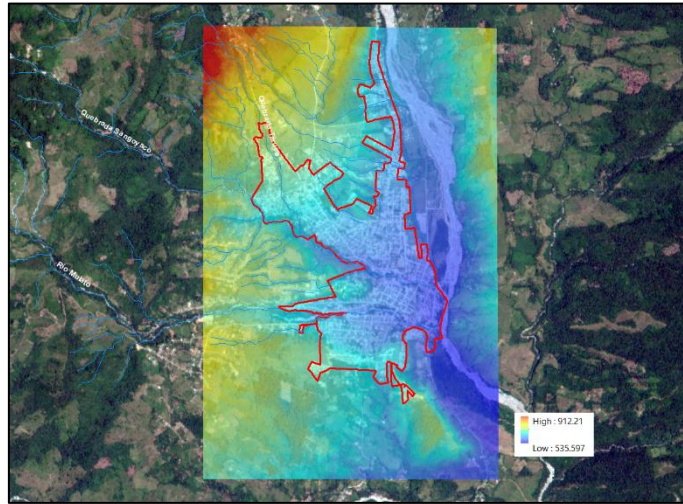


Figura 4-1. Modelo de elevación digital de 1m de resolución espacial.

4.1.1.2 DEM con resolución espacial de 2m:

Como se puede observar en la Figura 4-2, abarca la cabecera municipal de Mocoa y no tiene información en la parte media y alta del río Mulato y las quebradas Taruca y Sangoyaco.

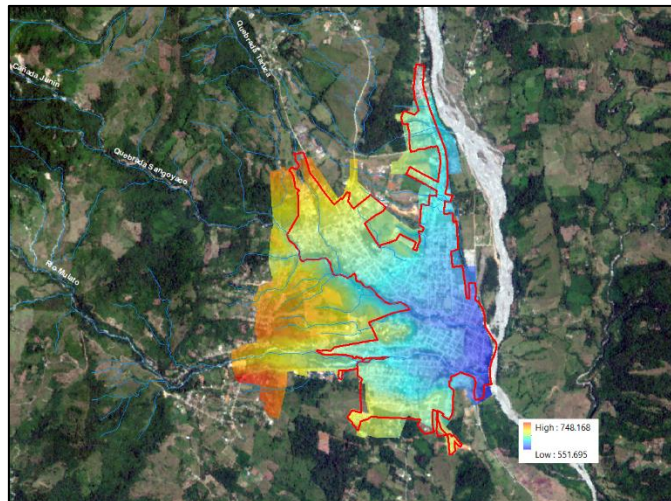


Figura 4-2. Modelo de elevación digital de 2m de resolución espacial – sólo cabecera municipal.

4.1.1.3 DEM con resolución espacial de 2m (22-03-17):

A diferencia del DEM anterior, este por su parte tiene mayor cubrimiento del área de estudio, aún así no alcanza a tener información en partes relevantes para las modelaciones que se realizarán para obtener un escenario antes del evento (Figura 4-3).

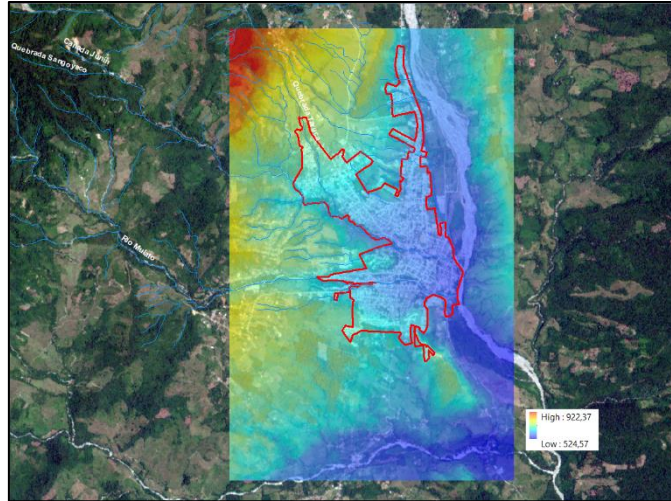


Figura 4-3. Modelo de elevación digital de 2m de resolución espacial.

4.1.1.4 DEM con resolución espacial de 3m:

De acuerdo con la Figura 4-4 este DEM tiene total cubrimiento de la zona de estudio, está afectado por la presencia de la vegetación en las laderas de los ríos y quebradas, por lo tanto al momento de generar los drenajes se presentan desvíos del cauce principal de la quebrada Taruca y San Antonio.

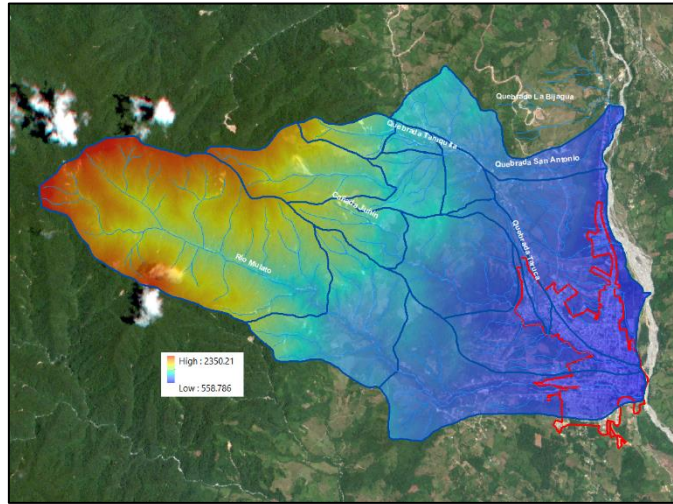


Figura 4-4. Modelo de elevación digital de 3m de resolución espacial.

4.1.1.5 DEM con resolución espacial de 5m:

Imagen de radar banda P que se ve afectada en menor grado por la cobertura vegetal debido a que la longitud de onda alcanza a penetrarla. Este DEM al igual que el de 3m presenta inconvenientes al generar los drenajes (quebrada Taruca y San Antonio), ya que estos se desvían en la parte media de las quebradas (Figura 4-5).

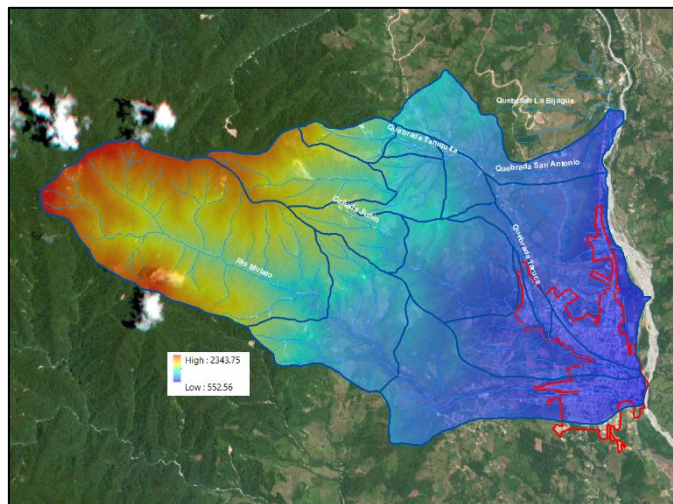


Figura 4-5. Modelo de elevación digital de 5m de resolución espacial.

4.1.2 Análisis y procesamiento

De acuerdo con la descripción anteriormente mencionada se hizo necesario realizar un procesamiento de los DEM que habían disponibles, este procedimiento se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Se utilizó la herramienta Qgis para observar los perfiles de los drenajes en cada DEM y así poder seleccionar el mejor. Como se puede ver en (Figura 4-6 y Figura 4-7) el DEM que mejor representa la sección transversal de los drenajes es el que tiene una resolución espacial de 2m y el que más difiere de los otros es el de 3m (debido a la vegetación riparia que no deja tener una mejor representación del cauce).

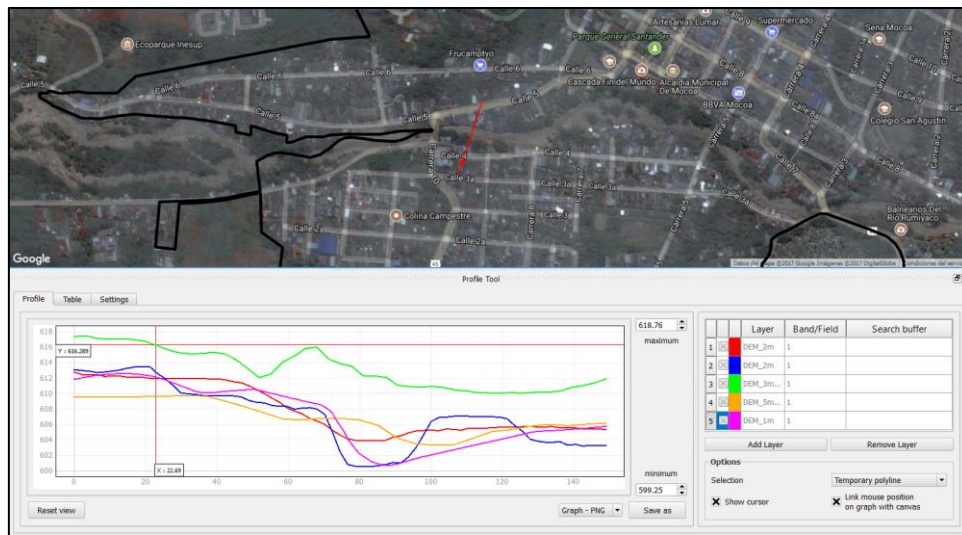


Figura 4-6. Perfil altitudinal de la parte baja del río Mulato – Cabecera municipal.



Figura 4-7. Perfil altitudinal de la parte baja de la quebrada Taruca - cabecera municipal.

- Luego se unió el DEM de 2m (que es el que mejor representa la sección transversal de las quebradas) con el DEM de 5m, debido a que el primero no cubre en su totalidad el área de estudio que son las cuencas de los ríos Mulato y Sangoyaco; y las quebradas Taruca, Taruquita y San Antonio. Se unieron los DEM por medio de un proceso de minimización de la diferencia de niveles en la línea de contornos de la unión de estos DEM's y se produjo un histograma de diferencias de nivel para puntos generados cada metro en dicho contorno (Figura 4-8), dando como resultados errores del orden de 10m, por lo que no se considera aceptable para los fines de las modelaciones.

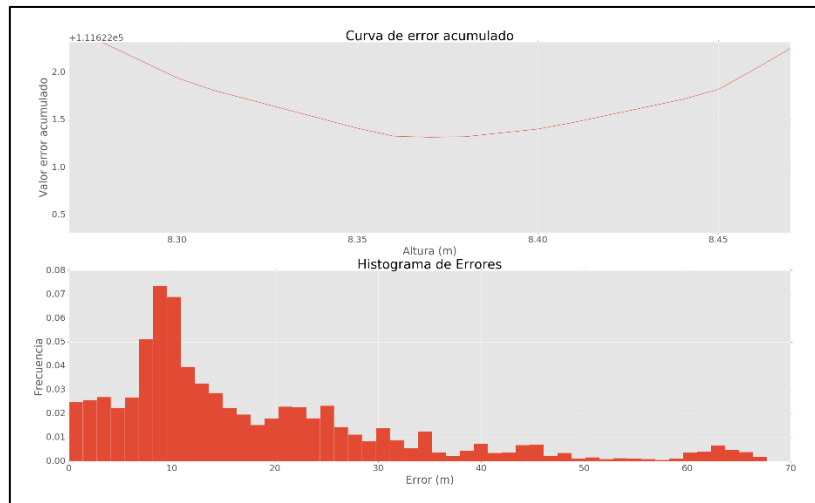


Figura 4-8. Histograma y curva de errores de la unión del DEM de 5m y el de 2m.

- Después de obtener los anteriores resultados se procedió a utilizar sólo el DEM de 5m, y corregir el inconveniente anteriormente mencionado con el desvío de las quebradas Taruca y San Antonio, para esto se pensó utilizar la batimetría que se tiene de la quebrada Taruca y así ajustar los valores del DEM, pero al momento de comparar dichas cotas con las del DEM se evidenciaron diferencias significativas y además no eran sistemáticas (Figura 4-9).

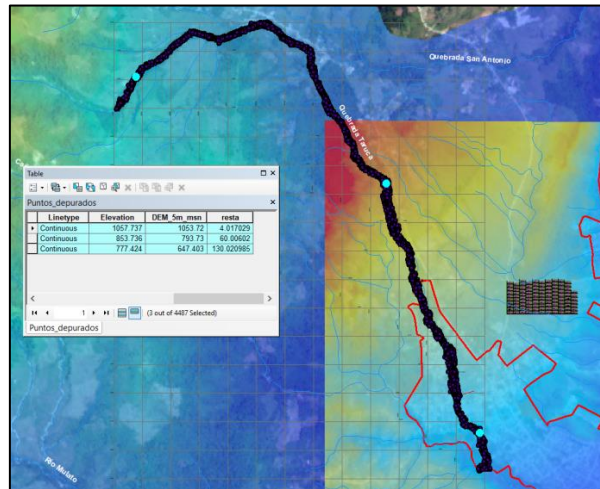


Figura 4-9. Batimetría de la quebrada Taruca.

- Por último se procedió a realizar manualmente la variación de la cota de las celdas del DEM de 5m con el fin de que los drenajes corrieran por donde debían, este procedimiento se hizo con base a lo observado en las fotografías aéreas disponibles en Qgis. Las variaciones en las cotas están en el rango de 0.3m a 1m (en algunos casos se disminuyó y en otro se aumentó) lo cual no se considera un cambio significativo y si se obtiene el resultado esperado para realizar unas adecuadas modelaciones. En la Figura 4-10 se puede observar el curso que tenían las quebradas antes de realizar la modificaciones, mientras que en la Figura 4-11 se presenta el resultado final y en la Figura 4-12 un perfil transversal de una sección modificada.

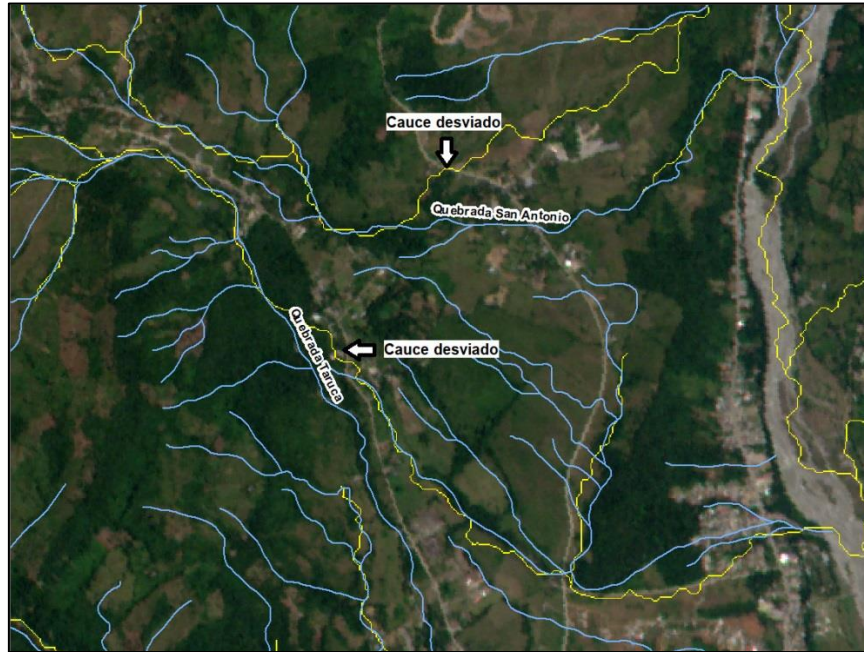


Figura 4-10. Cauces desviados en color amarillo y drenajes de la cartografía 1:25000 en color azul.

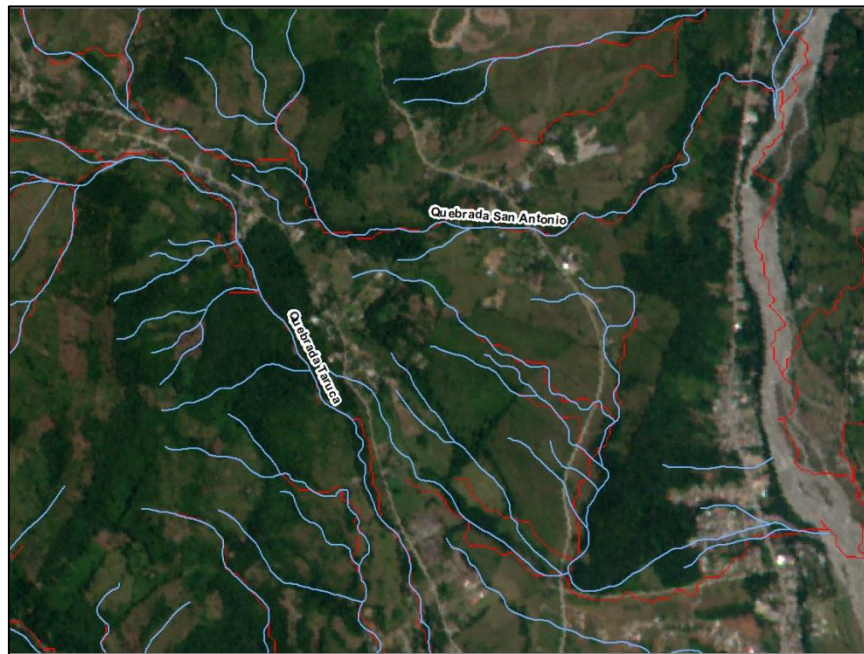


Figura 4-11. Cauces generados después de la corrección del DEM en color rojo y drenajes de la cartografía 1:25000 en color azul.

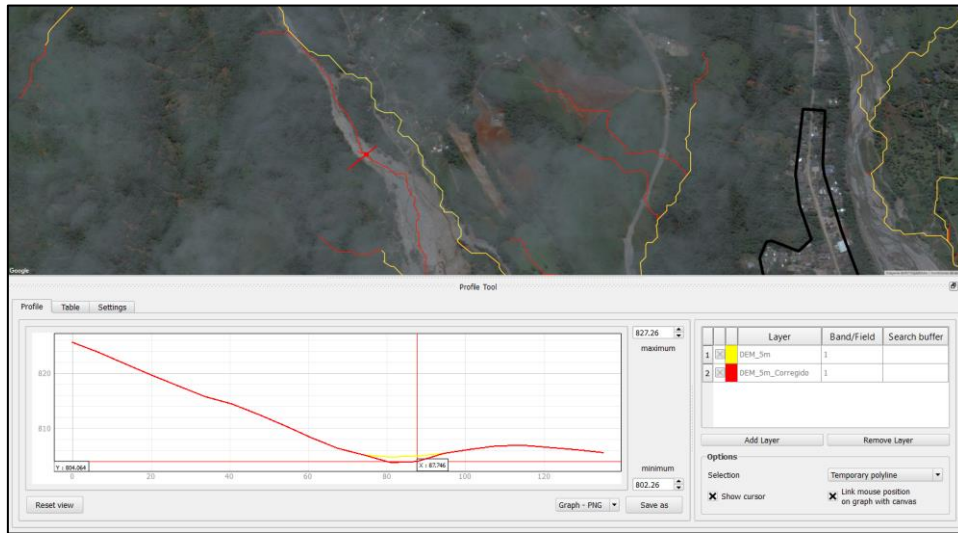


Figura 4-12. Perfil altitudinal de la parte media de la quebrada Taruca.

Tras correr algunos modelos hidráulicos preliminares con los modelos de elevación digital modificados, se observó que, en varios puntos, especialmente sobre la quebrada Taruca, el flujo se desviaba por partes que no fueron inundadas en el evento y que actualmente no cuentan con tránsito de agua, generándose desembocaduras inexistentes de la quebrada Taruca sobre el río Mocoa y afectación en barrios que no fueron afectados por avalancha. Un ejemplo de esto puede observarse Figura 4-13.

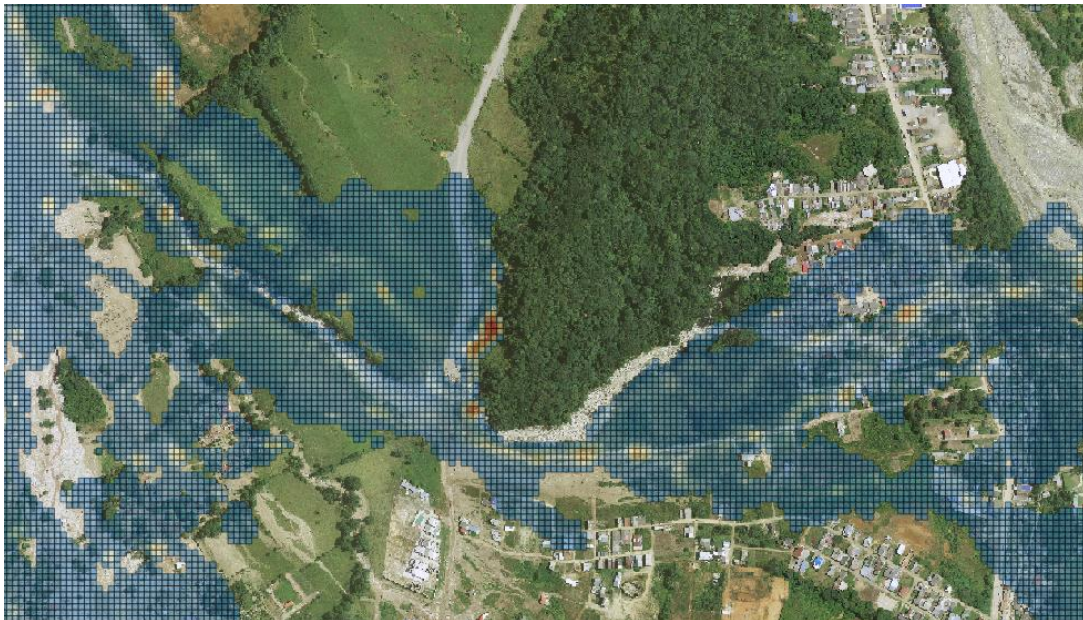


Figura 4-13. Ejemplo de resultados de modelos hidráulicos preliminares, donde, por presuntos errores en el modelo de elevación digital, el agua no fluye por los cauces de las quebradas existentes.

Al observar esta situación, se optó por realizar modificaciones a algunas celdas del modelo de elevación digital teniendo en cuenta los resultados de los modelos hidráulicos preliminares y la mancha de inundación generada por el evento. Inicialmente, se realizaron pruebas introduciendo masas de agua en diferentes puntos para identificar los tramos en los que se presentaba desviación del flujo. Un ejemplo de uno de estos tramos se presenta en Figura 4-14, donde se observa una línea de flujo generada por introducir masa de agua en un punto (izquierda – área en color azul) que no corresponde a la localización actual del cauce; cuando se introduce la misma masa en un punto más aguas abajo, se observa que el agua si sigue el curso del cauce actual (derecha – área en color morado).

Realizando este procedimiento en varios puntos, reconocidos como relevantes para la modelación hidráulica, se identificaron los tramos cuyas elevaciones serían susceptibles a modificación, partiendo de la suposición que las mencionadas desviaciones del flujo, se deben a errores en el modelo de elevación digital.

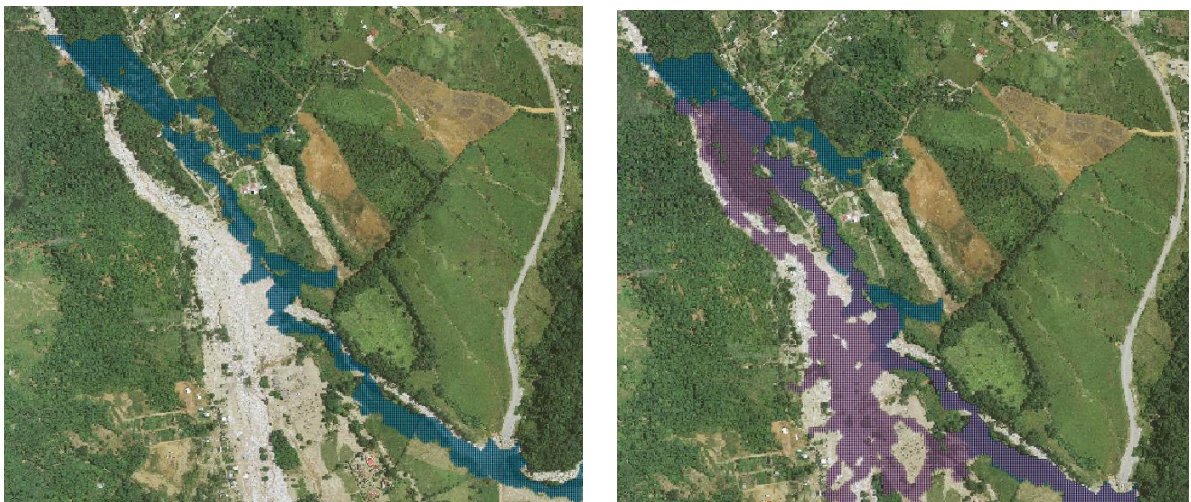


Figura 4-14. Ejemplo de diferencias en la formación de los cauces según el lugar donde se introduzca la masa de agua. En el fondo se presenta la mancha de inundación del evento y en colores azul y morado, los resultados de las modelaciones preliminares.

En numerosos tramos, se nota adicionalmente que no se observa ningún vaso en el modelo de elevación digital en los sitios por donde debería ir el cauce, ocasionando las mencionadas desviaciones del flujo. Un ejemplo de esto se presenta en Figura 4-15, donde se observa que, en el sitio donde debería ir el flujo se encuentra un talud, ocasionando que el agua fluya hacia la derecha, donde se encuentra una llanura; en dicha llanura se observan en la orto foto áreas residenciales y zonas verdes por donde no fluye la quebrada y que no fueron afectadas por la avalancha.

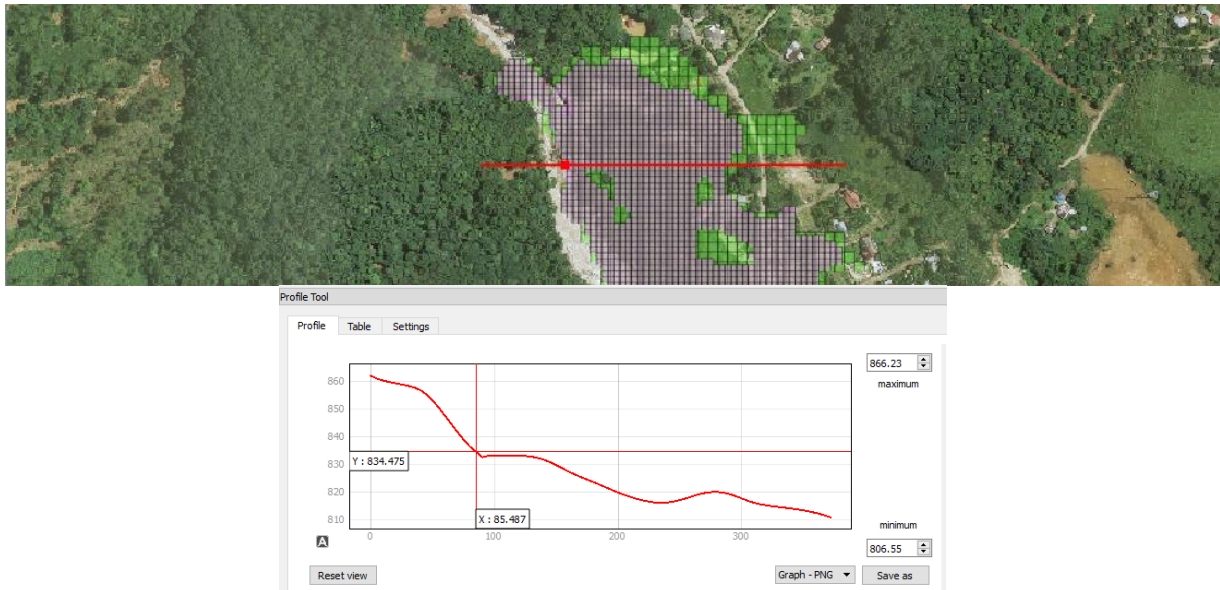


Figura 4-15. Ejemplo tramos en los que no se observa el vaso por el que debería ir el cauce según las ortofotos.

Los anteriores factores llevan a que, en varios tramos de los cauces, especialmente sobre la quebrada Taruca, sea necesario realizar modificaciones a las elevaciones del modelo digital, solo con el objeto de una adecuada simulación hidráulica. Estas modificaciones, actualmente se realizan teniendo en cuenta los resultados de los modelos hidráulicos preliminares, buscando que estos representen adecuadamente la forma de la mancha de inundación. Este procedimiento se realiza en forma de un proceso casi iterativo en el que se busca reducir el error entre las áreas de inundación modeladas y observadas. Cabe anotar que las modificaciones se realizan empleando información de modelos de elevación digital de menor resolución y los detalles brindados por las fotografías de alta resolución, procurando no incurrir en obtener elevaciones improbables o no acordes con las características del relieve de la zona.

4.2 Geotecnia

4.2.1 Fuentes de material

El sedimento en suspensión y el transporte de la carga de fondo, al igual que el ajuste del lecho del cauce están íntimamente relacionados con la disponibilidad y variabilidad temporal de las fuentes de material. Las principales fuentes de sedimento en los ríos de montaña son la erosión de las laderas expuestas, los deslizamientos y los flujos de detritos provenientes de la erosión de laderas inestables, del lecho del cauce y de sus bancas. Los procesos morfológicos relacionados con este suministro de material son, por lo tanto, altamente variables tanto

en el espacio como en el tiempo. Las características de las fuentes de material de la Quebrada la Taruca varían notablemente con la elevación, tal como se evidencia en la Figura 4-16. Variaciones similares se observaron en las regiones altas de la Quebrada la Taruquita y el Río Mulato.

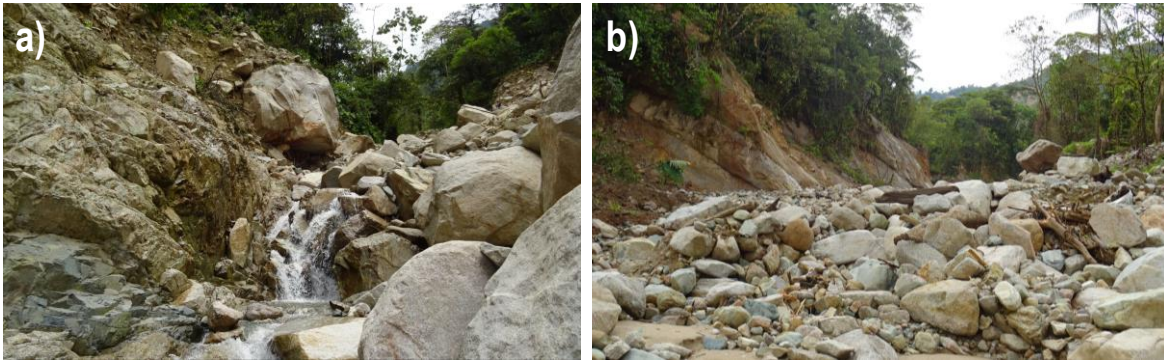


Figura 4-16. Fuentes de material observadas en la Quebrada Taruca en (a) La zona alta y en (b) La confluencia con la Quebrada Taruquita.

Las pendientes altamente empinadas de los ríos de montaña de la zona de estudio facilitan los procesos de movimiento masivo de sedimento, los cuales pueden aportar elementos de gran tamaño (de hasta 9 m x 5 m, véase la Figura 4-16 (a)), como los que fueron transportados durante el evento del 31 de marzo de 2017, registrado en Mocoa (Putumayo). La permanencia del material movilizado de las zonas altas del cauce al canal principal de un río de montaña puede alcanzar cientos de años, sin embargo, este factor depende de la frecuencia y magnitud de las crecientes a los que esté expuesto el sistema.

La ocurrencia de deslizamientos de importante magnitud, como los observados en la zona de estudio, y la vegetación erradicada por los altos flujos observados en regiones montañosas de alta pluviosidad (la cual puede contener el cuerpo completo de un árbol y su sistema radicular) pueden bloquear el cauce principal del río, generando represamientos del flujo que, posteriormente fallan creando rompimientos locales y flujos de alta intensidad similares a los observados en los eventos de rompimiento de presas.

La carga de lecho en los ríos de montaña es transportada por trenes de ondas de variadas frecuencias y amplitudes, lo cual dificulta el uso de formulaciones determinísticas, basadas en la capacidad del flujo. Adicionalmente, el transporte de sedimento es selectivo ya que las partículas de menores tamaños son más fácilmente transportadas, pero se genera un efecto de escondimiento producido por la presencia de variados tamaños de sedimento. Teniendo en cuenta lo anterior y dado que en los ríos de montaña el lecho es bastante irregular, compuesto de material con amplios rangos de tamaños, que en muchas ocasiones presenta

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
<p>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</p>		

acorazamiento y que está expuesto a un régimen de caudales altamente variable, los mecanismos de transporte de la carga de lecho no se han logrado explicar completamente todavía, haciendo que su estimación y modelación sean bastante aproximadas.

Los modelos existentes para estimar la capacidad de transporte de sedimento en ríos con lecho de grava son formulados en su mayoría considerando alguna condición crítica de movimiento, expresada con frecuencia en términos de esfuerzos de corte, y considerando el efecto de escondimiento descrito anteriormente. Sin embargo, en ríos de montaña con lechos altamente irregulares es virtualmente imposible determinar los valores críticos del esfuerzo de corte para un determinado tamaño de partícula, ya que no pueden estimarse con precisión los valores locales de la profundidad del flujo o la pendiente.

4.2.2 Manto de meteorización

Los procesos de denudación que ocurren en las zonas más altas de los ríos de montaña están estrechamente relacionados con las propiedades de los materiales de los que se componen las laderas de dichos cauces. En ambientes tropicales, como el de la zona de estudio, estas propiedades resultan de un intenso proceso de meteorización bioquímica, el cual facilita el desarrollo de mantos altamente meteorizados y de un espesor importante, en comparación con lo observado en otras latitudes. Sin embargo, el espesor de los mantos de meteorización no solo es función de las condiciones climáticas, sino que también depende de la composición y estructura de la roca, las propiedades fisicoquímicas de los productos de meteorización y el tipo e intensidad de los procesos observados en la superficie (Römer, 2013).

En regiones caracterizadas por una precipitación abundante y de altas intensidades, como las registradas en el municipio de Mocoa, el espesor y la alta permeabilidad del manto de meteorización promueven una infiltración rápida y la presencia de elevadas presiones de poros, lo cual incrementa la inestabilidad de las laderas. Los controles topográficos, como los observados en los cañones definidos entre los contactos de diferentes estructuras rocosas incrementan este efecto y la presencia de cascadas. Este tipo de controles se observan en múltiples puntos de la parte alta de la quebrada la Taruca, véase la Figura 4-17.



Figura 4-17. Quebradas que promueven la infiltración rápida en los mantos de meteorización de la zona de estudio.

Sin embargo, es importante aclarar que las fallas de los taludes y los deslizamientos resultan de una combinación de factores que están asociados con la alta variabilidad de las propiedades hidroclimatológicas y geotécnicas de los mantos de meteorización existentes en las regiones tropicales. La precipitación antecedente y la magnitud, frecuencia e intensidad de los eventos de precipitación son un factor decisivo en el control de la localización, densidad espacial, y tipo de los deslizamientos observados en las cercanías del municipio de Mocoa. En concordancia con esta característica, es que el Servicio Geológico Colombiano caracterizó como “Factor detonante” a los intensos eventos de precipitación que se registraron antes del catastrófico evento del 31 de marzo de 2017 (SGC, 2017).

4.2.3 Caracterización del lecho

4.2.3.1 Caracterización Servicio Geológico Colombiano

El SGC (SGC, 2017), obtuvo muestras de los distintos depósitos generados después del evento, las cuales se encuentran localizadas en la Figura 4-18. A estas muestras se le realizaron los siguientes ensayos en laboratorio:

- Granulometría e hidrometría (Clasificación S.U.C.S).
- Contenido de agua (humedad).

- Gravedad específica.

De los anteriores ensayos se cuenta con resultados para cada una de las muestras, los cuales tienen un uso potencial en el proyecto en desarrollo para poder caracterizar el material en estudio y definir algunos parámetros que se usaran para la modelación hidrodinámica, en particular los parámetros asociados a la viscosidad del sedimento al entrar en suspensión con el agua de las quebradas (SGC, 2017).

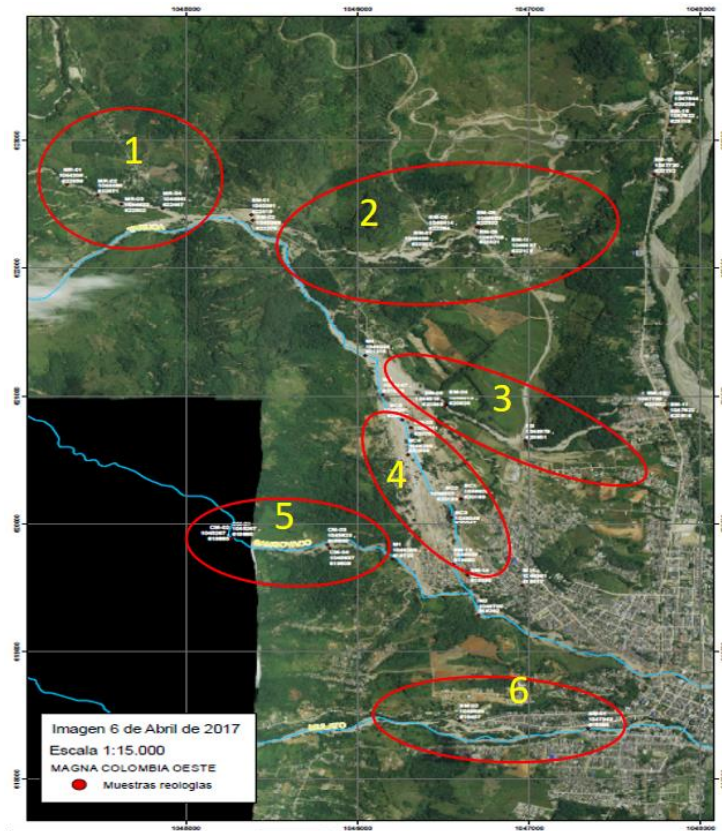


Figura 4-18. Localización muestras SGC. (SGC, 2017) y zonificación.

Como se observa en la Figura 4-18, las muestras fueron recopiladas después del evento del 31 de marzo, a lo largo de las quebradas Taruca y Taruquita, y ríos Sangoyaco y Mulato. Lo anterior indica que estas muestras pueden corresponder a material arrastrado en el evento, es decir, la localización de las muestras no corresponde a la localización original del material; por lo anterior, se debe estimar su localización mediante la información y descripción geológica-geotécnica presentada en el documento Línea Base de información secundaria.



Los muestreos recopilados fueron zonificados como se muestra en la Figura 4-18, teniendo en cuenta su descripción visual y características como su granulometría, gravedad específica y contenido de agua.

	<p align="center"><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
<p align="center">Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</p>		

1. Quebrada Taruquita: Se encuentran las muestras MR-01, 02, 03 y 04; descritas en general como grava arenosa subangular junto con algo de limo, de color café oscuro, bien gradada, presencia de material cristalino y de humedad baja.
2. Quebrada San Antonia: Se encuentran las muestras EM -01, 02, 06, 07, 08, 09, 10, 15, 16 y 17; las cuales se describen en su mayoría como arena limosa de color café oscuro, presencia de raíces y de material cristalino y de humedad media baja.
3. Quebrada Taruca –quebrada El Carmen: Se encuentran las muestras EM-04, 05, 11 y 12; correspondientes a arena con algo de limo de grano medio a grueso, de color café con gris, bien gradada, presencia de materiales cristalino y de humedad media baja.
4. Quebrada Taruca en zona urbana- Barrio San Miguel: Se encuentran las muestras EM-03, 13 y 14 que corresponden a arena limosa de grano fino, de color café claro, presencia de material cristalino y de humedad media baja.
5. Río Sangoyaco: Se tomaron las muestras CM-01, 02, 03, 04; con descripción de arena limosa de grano medio a grueso, de color café oscuro, presencia de material cristalino y de humedad media baja.
6. Río Mulato: Se encuentran las muestras SM-01 y 02, con descripción de arena limosa de grano fino a medio, de color café claro, presencia de material cristalino y de humedad media baja.

Para cada una de las zonas descritas anteriormente, se seleccionó una muestra representativa con el fin de poder resumir y representar las propiedades y características encontradas en cada zona. En la Tabla 4-1 se encuentra el resumen de resultados en el laboratorio para cada una de las muestras seleccionadas en cada zona, (los ensayos fueron realizados por el Servicio Geológico Colombiano).

Como se observa en la Tabla 4-1 Resumen de resultados de ensayos de laboratorio. (SGC, 2017)., en todas las zonas se clasificó el material como arena limosa, a excepción de la quebrada la Taruquita donde se encontró material granular en la parte alta de la cuenca como era de esperarse, debido a que en esta zona se presenta un cambio representativo de material, el cual es limitado por la falla La Tebaida, como se observa en la Figura 4-19.

	Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.	
	Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía	

ZONA	No. de Campo / Referencia	Contenido de Humedad	Gravedad Específica	Granulometría			CLASIFICACIÓN S.U.C.S.	DESCRIPCIÓN VISUAL
		INV E 122 – 13	INV E 128 – 13	INV E 123 – 13				
		W _n	G _s	Finos	Arenas	Gravas		
		(%)		(%)	(%)	(%)		
3	EM-05	20.51	2.70	5.02	94.98	0.00	SW - SM	Arena con algo de limo de grano medio a grueso, de color café con gris, bien gradada, presencia de materiales cristalino y de humedad media baja
2	EM-07	22.87	2.68	24.96	74.27	0.76	SM	Arena limosa de color café oscuro, presencia de raíces y de material cristalino y de humedad media baja
4	EM-13	24.14	2.69	38.49	61.51	0.00	SM	Arena limosa de grano fino, de color café claro, presencia de material cristalino y de humedad media baja
1	MR-02 MD	7.86	2.66	6.02	38.90	55.09	GW - GM	Grava arenosa subangular junto con algo de limo, de color café oscuro, bien gradada, presencia de material cristalino y de humedad baja
5	CM-02	18.20	2.73	22.37	76.96	0.67	SM	Arena limosa de grano medio a grueso, de color café oscuro, presencia de material cristalino y de humedad media baja
6	SM-02	20.85	2.69	16.19	83.81	0.00	SM	Arena limosa de grano fino a medio, de color café claro, presencia de material cristalino y de humedad media baja

Tabla 4-1 Resumen de resultados de ensayos de laboratorio. (SGC, 2017).

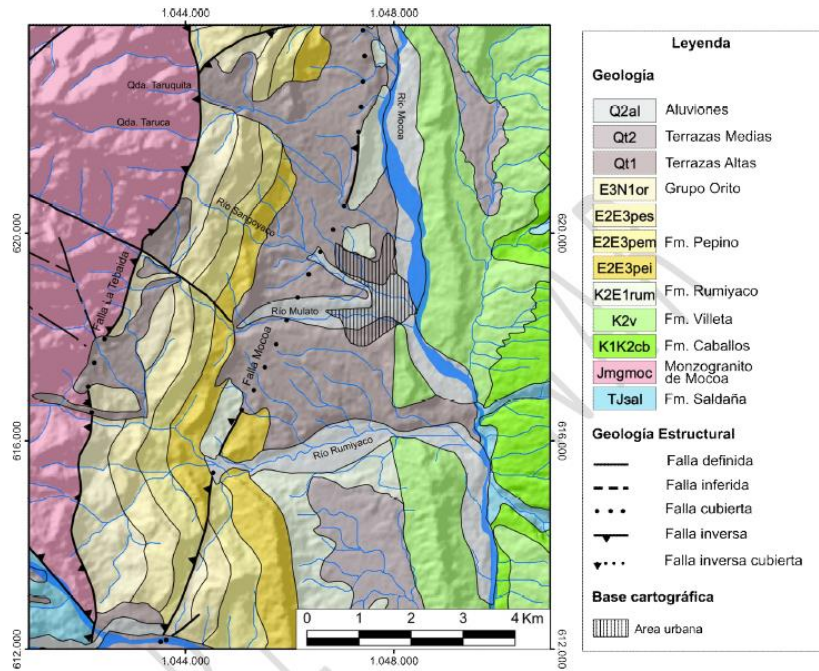


Figura 4-19. Mapa geológico escala 1:100000 (SGC, 2017).

4.2.3.2 Determinación de viscosidad

Uno de los parámetros necesarios para el modelo de lluvia escorrentía, es la viscosidad de la mezcla de sedimento que viaja a lo largo del cauce; este parámetro se encuentra en función de la concentración de sólidos, donde a mayor concentración de sólidos, se presenta mayor viscosidad, siguiendo una relación exponencial mostrada en la siguiente ecuación, donde η es la viscosidad, τ_y el esfuerzo de fluencia y C_v la concentración volumétrica.

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \quad \text{Ecuación 4-1}$$

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \quad \text{Ecuación 4-2}$$

Los coeficientes empíricos α_1 , β_1 , α_2 y β_2 relacionan el esfuerzo de fluencia τ_y y la viscosidad de la mezcla agua-sedimento η , con la concentración volumétrica, suponiendo un comportamiento de fluido no Newtoniano tipo Bingham.

Para la determinación de estos coeficientes empíricos, se está llevando a cabo el ensayo de viscosidad Marsh Funnel siguiendo la norma ASTM D6910-10, el cual consiste en colocar la mezcla en el marsh funnel (mostrado en la Figura 4-20), luego de permitir el flujo a través de este y medir el tiempo que demora en llenarse $\frac{1}{4}$ de

galón. El tiempo medido se puede correlacionar con la viscosidad directamente mediante varias ecuaciones propuestas por distintos autores (Faleh, Ahmed, & Nagham, 2014). También a partir de este ensayo es posible describir el comportamiento reológico de la mezcla, llevando un control de la variación de la altura a lo largo del tiempo; a partir de este es posible pasar a una curva de esfuerzo-deformación, donde se espera se evidencie el comportamiento de un fluido no Newtoniano tipo Bingham (Chandan, Rajesh, & Prakash, 2013).

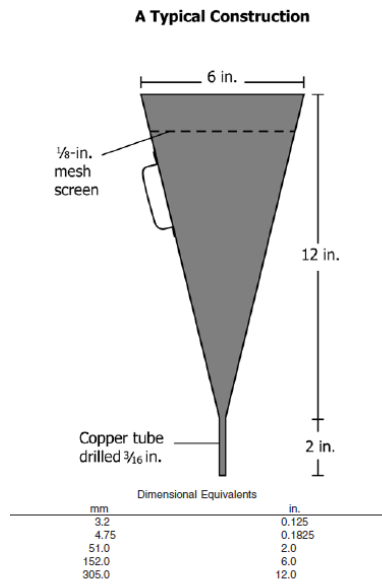


FIG. 1 Marsh Funnel

Figura 4-20. Marsh Funnel Standard. (ASTM, 2010).

4.2.3.3 Ángulo de fricción

El ángulo de fricción interno y basal, es uno de los parámetros necesarios para la modelación hidráulica, los cuales permiten incorporar en algunos modelos la socavación en el fondo y bancas e incorporar el material en el volumen transportado. Para poder estimarlos, se está siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C-1444, el cual consiste en dejar caer la muestra libremente desde un embudo, y calcular el ángulo de reposo formado. Este procedimiento se realizó de dos formas: la primera de tal forma que la muestra quedara en contacto con la superficie directamente, en este caso vidrio; el segundo de tal forma que la muestra cayera sobre una superficie de suelo; lo anterior para estimar ángulo de fricción interno y basal respectivamente. En la Figura 4-21 se muestra el resultado del procedimiento llevado a cabo.

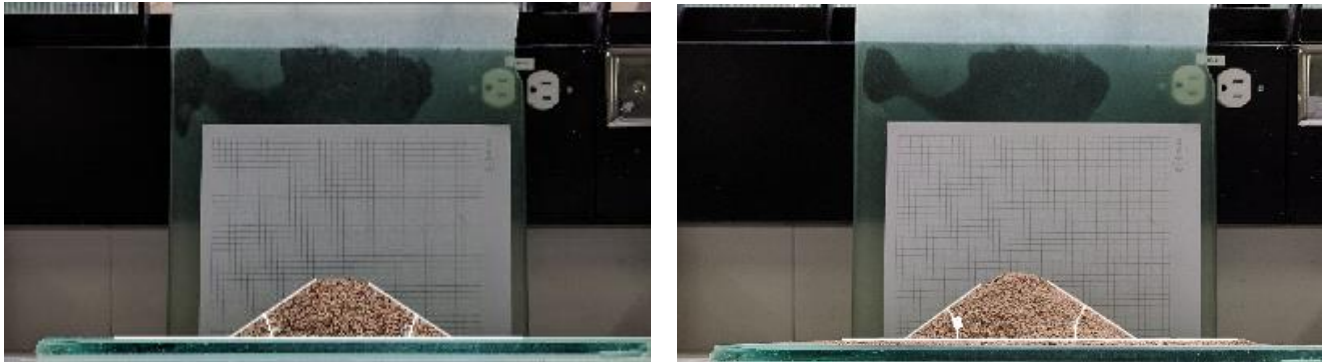


Figura 4-21. Estimación de ángulo de rozamiento interno y basal.

4.2.4 Procesos de erosión en bancas

Mocoa está localizada en una zona donde la actividad tectónica y el clima tienen una gran influencia en el comportamiento y evolución de la cuenca. La exposición del monzogranito de Mocoa, debido a procesos erosivos y la actividad de la falla La Tebaida, han generado un frente montañoso activo, con drenajes que incisan rápidamente los cuerpos graníticos, desarrollándose valles en “V”. Sumado a lo anterior, por su ubicación en la Zona de Confluencia Intertropical (ZCT), el clima cálido-húmedo y los intensos periodos de lluvia (con picos de más de 4000 mm/año) hacen que se desarrollen con mayor facilidad suelos residuales, los cuales son removilizados y depositados originando así agradación del canal aguas abajo (SGC, 2017).

Para identificar los procesos de erosión en bancas se realizó una revisión de la descripción geológica presentada en el informe de caracterización del evento del Servicio Geológico Colombiano (2017). A continuación, se presentan los aspectos más relevantes en relación al proceso de erosión en bancas para cada una de las formaciones. El mapa geológico es mostrado en la Figura 4-19.

- Monzogranito de Mocoa (Jmgmoc)

Aflora en las partes altas de las cuencas de los ríos Mulato y Sangoyaco, las quebradas Taruca y Taruquita. Presenta un alto grado de fracturamiento como resultado del fuerte control estructural de la Falla La Tebaida-Mocoa y estructuras satélite y ha sufrido procesos de meteorización debido a la condición climática que domina la zona provocando la inestabilidad del macizo rocoso lo que ha favorecido tanto la formación de suelos residuales, así como la generación de procesos erosivos y de movimientos en masa constantes (e.g. caída de rocas, deslizamientos por flujos, flujos de detritos, entre otros; estos procesos de movimientos en masa son los principales aportantes de material (arena, bloques y menor proporción arcilla) a los cauces de las quebradas

Taruca y Taruquita, los cuales se depositan en el tiempo y son removilizados y transportados cauce abajo, formando espesos depósitos fluvio-coluviales de hasta 8 m de espesor, llevando en muchos sectores a la agradación del canal (SGC, 2017).



Figura 4-22. Monzogranito de Mocoa, fotografía tomada en la parte alta de La Taruca. (Fuente: El autor).

En la Figura 4-22 se observa el monzogranito de Mocoa, donde se evidencia el alto grado de fracturamiento y meteorización, facilitando la formación de suelos residuales en los que se encuentran embebidos grandes bloques, que hacen que la banca sea potencialmente erosionable.

- Formación Rumiayaco (K2E1rum)

Unidad sedimentaria que aflora a lo largo de las cuencas de las quebradas San Antonio, El Carmen, Taruca y los ríos Mulato y Sangoyaco. La sucesión está conformada por arcillolitas de color rojo y gris, con diversas tonalidades, en la cual se intercalan capas delgadas de conglomerados finos, areniscas cuarzosas y

ocasionalmente niveles calcáreos. Sobre la quebrada San Antonio, en los cauces central y sur, se observan paquetes gruesos de arcillolitas masivas, moderadamente fracturadas y meteorizadas (Fotografía 4a), con niveles locales de conglomerados de hasta 0.30 m, los cuales se vieron expuestos por los procesos de erosión (socavación de fondo, lateral y movimientos en masa) asociados al evento y en algunos casos se incorporaron al flujo. Dicho material se observa en forma de cantos y bloques angulares de hasta 2.7 m de ancho (Fotografía 4d). (SGC, 2017)



Fotografía 4. Se observan capas de arcillolita rojiza a gris, en capas de hasta 0.80 m (a, b). La disposición de las capas generó durante el evento represamientos parciales (b), así como entrada de bloques arcillolita en el depósito (c, d). Coordenadas (a) X: 1047602 Y: 622741; (b) X: 1047485 Y: 622488; (c) X: 1047234 Y: 622199; (d) X: 1047423 Y: 622393.

Figura 4-23. Fotografía tomada de informe de SGC (2017).

En la Figura 4-23 se observan los procesos y características descritos anteriormente. Fue posible evidenciar en la visita de campo realizada el 7 de septiembre de 2017, que esta formación ubicada en la quebrada San Antonia, fue expuesta a socavación de fondo y lateral.

- Formación Pepino (Miembro-inferior; E2E1pei)

Los afloramientos observados son del miembro inferior de esta formación, con un espesor de entre 5 m y 5.5 m, en capas subhorizontales, donde se reconoce un conglomerado espeso clastosoportado, con gravas de

chert, arcillolita negra y cuarzo, redondeados a subredondeados entre 0.04 m y 0.06 m en promedio. (SGC, 2017).



Fotografía 5. Afloramientos del miembro inferior de la Formación Pepino por la quebrada San Antonio. Coordenadas (a) X: 1045956 Y: 622141; (b) X: 1046060 Y: 622097

Figura 4-24. Fotografía Formación Pepino, tomada de informe de SGC (2017).

Dicho material clastosoportado con gravas, mostrado en la Figura 4-24, tiene un gran aporte de material al ser erodado en la banca, debido a que ocurrirá caída de bloques.

Para localizar los procesos de erosión en bancas, se tuvo en cuenta la descripción anterior realizada para las zonas geológicas y lo observado en la visita de campo realizada el 7 de septiembre de 2017, donde se identificaron las zonas las cuales corresponden a suelos residuales y terrazas aluviales, en los cuales se encuentran embebidos grandes bloques, los cuales pueden aportar un volumen de sólidos representativo. En la Figura 4-25 se pueden observar fotografías localizadas, donde se considera que ocurrió o puede ocurrir proceso de erosión en bancas. Cabe resaltar que estos procesos se dan más que todo en la parte baja respecto a la falla La Tebaida.

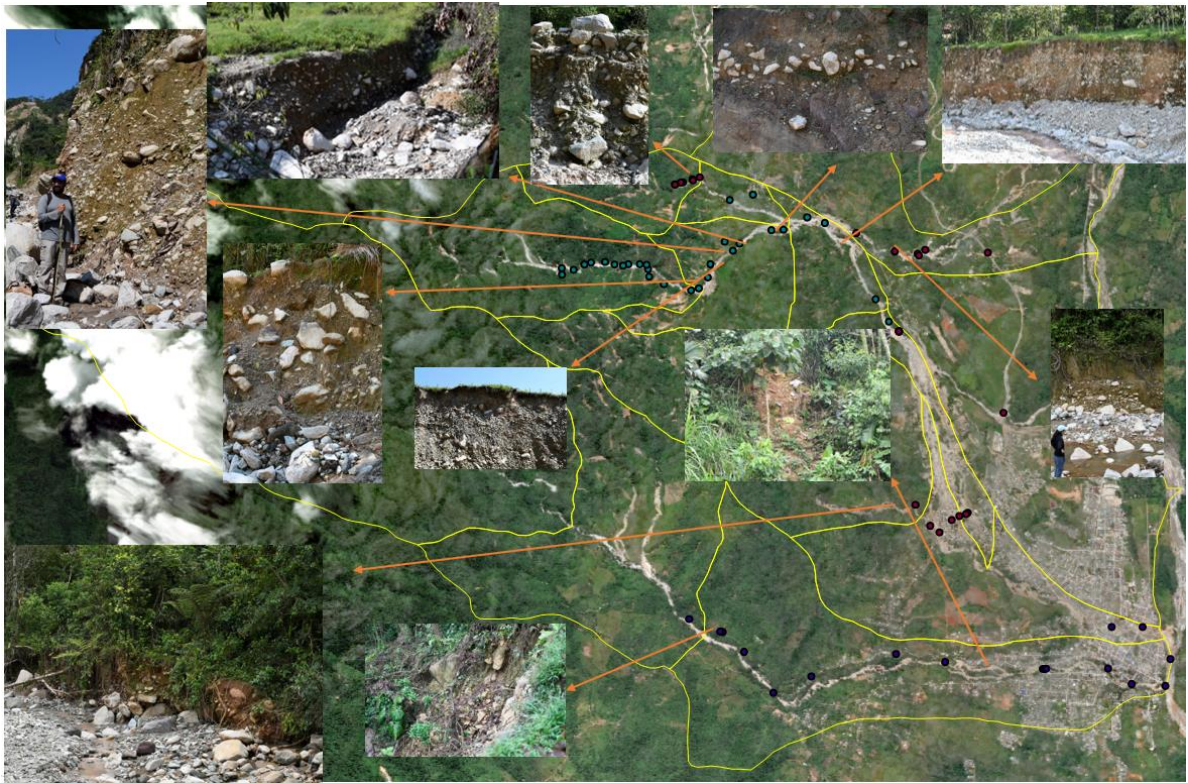


Figura 4-25. Análisis para localización de procesos de erosión en banquetas. (Elaboración propia).

4.2.5 Análisis multitemporal

El municipio de Mocoa se encuentra en una cuenca caracterizada por su pequeña área, la predominancia de altas pendientes y bajos tiempos de concentración de caudales. Actualmente la cabecera municipal está atravesada por cuerpos de agua como las quebradas y ríos en estudio. Para un mejor entendimiento de los cambios que se han generado a lo largo del tiempo, se utilizarán fotos obtenidas de fuentes como Corpoamazonía y Google Earth a partir de vuelos de drones con cámaras de alta resolución y/o imágenes satelitales, para realizar un análisis multitemporal que permita analizar la evolución de la cuenca en estudio. En la Figura 4-26 se observan las fotografías de vuelos en los años 1962 y 2017 (después del evento ocurrido). A simple vista se observa que la quebrada la Taruca, el río Sangoyaco y el río Mulato conservan un cauce similar; además probablemente en fechas cercanas a 1962 ocurrió un flujo de detritos que ocasionó la deposición de materiales, similar a la del evento del 31 de marzo de 2017 pero en menor magnitud. Con el fin de analizar la evolución temporal de los cauces y de poder identificar la ocurrencia de eventos torrenciales similares, se realizará un análisis multitemporal con ortofotos de 1962 brindada por Corpoamazonia, 2001 tomada de Google Earth y 2017 antes y después del evento brindada por Corpoamazonia. En adición a las anteriores, se encuentra

en proceso de adquisición las distintas fotografías históricas del área de estudio existentes en el IGAC, por lo cual se actualizará este análisis en próximos informes.

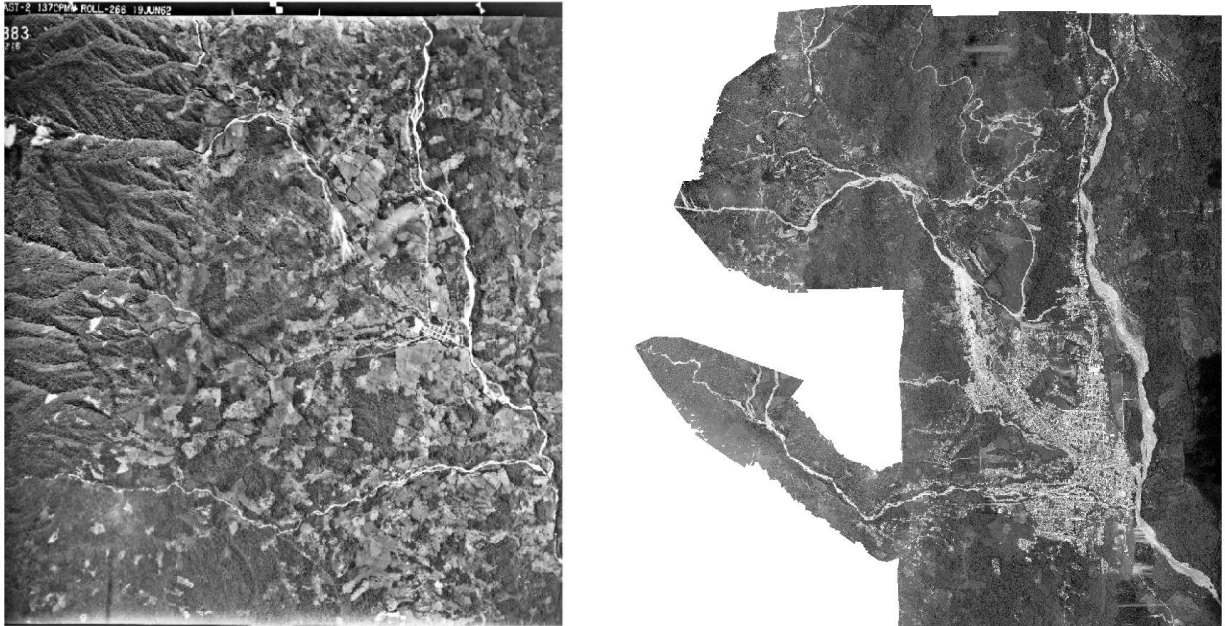


Figura 4-26. Aerofotografías de Mocoa, (Izquierda) 1962, (Derecha) 2017.

4.2.5.1 Año 1962

Según el informe presentado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017), en 1960 se presentó un flujo de lodo y escombros en la quebrada La Taruca, dejando la muerte de tres personas y animales domésticos. La aerofotografía presentada en la Figura 4-27, fue tomada en 1962. En esta, se puede evidenciar que la quebrada La Taruca y Taruquita han llevado su mismo cauce a lo largo de los años recorridos, igual que el río Sangoyaco y el río Mulato, además de un comportamiento similar de la cuenca ante un evento de gran magnitud como el ocurrido en 1960. En la foto se observa que ocurrió una deposición de escombros cerca a lo que hoy en día es la subestación eléctrica de Mocoa, aproximadamente unos 730m aguas abajo de donde ocurrió el esparcimiento de los depósitos del evento de 31 de marzo de 2017, lo que indica que la cuenca viene respondiendo de manera similar ante estos eventos desde años atrás. La diferencia de distancia puede ser debida a los distintos depósitos que se han generado en esta zona, lo que produce que en el 2017 ocurra el esparcimiento y deposición un poco antes.

A pesar que la fotografía fue tomada alrededor de dos años después, y que la reforestación en esta zona ocurre de manera rápida (como se observó en visita de campo), se pueden evidenciar algunos deslizamientos ocurridos en esas fechas los cuales son mostrados como polígonos verdes en la Figura 4-27.

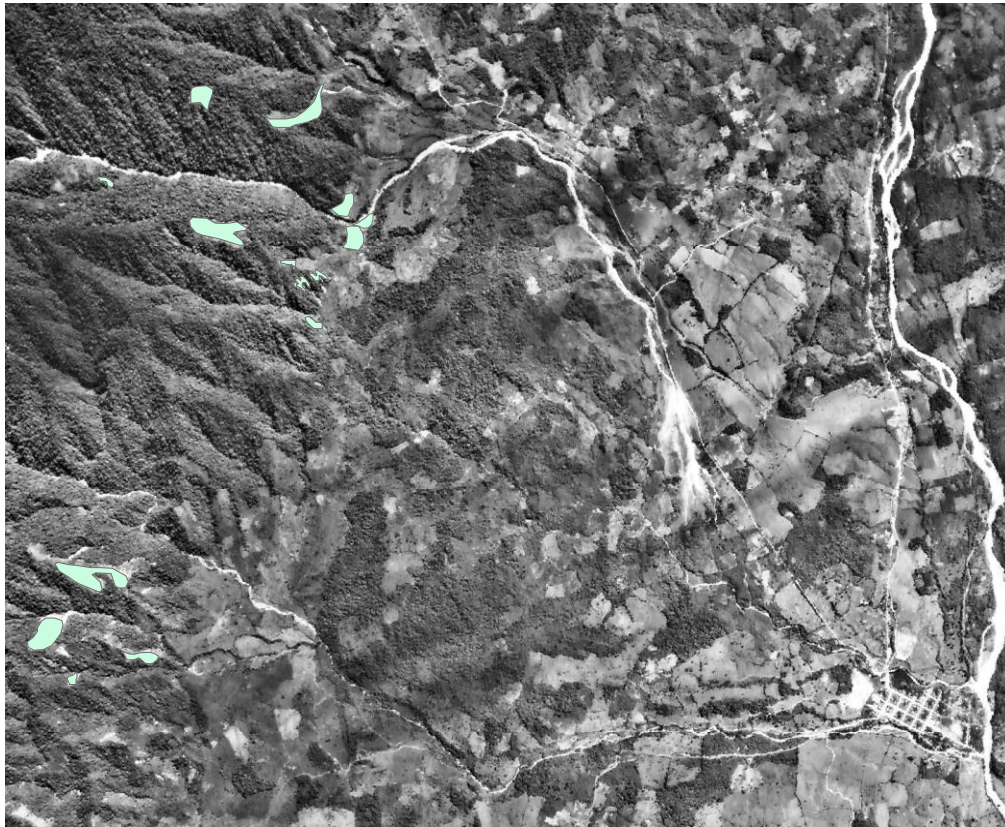


Figura 4-27. Ortofoto de Mocoa, 1962. (Corpoamazonia).

4.2.5.2 Año 2001

Durante el transcurso de años de 1962-2001, se tiene registro de eventos como avenidas torrenciales o movimientos en masa en 1971, 1972, 1989, 1994, 1995, 1997 y 1998 (SGC, 2017). Por lo anterior, fue necesario recurrir a la imagen satelital de Google Earth del año 2001, con el fin de analizar la cuenca después de estos eventos. Como se observa en la Figura 4-18, se evidenciaron algunos deslizamientos resaltados en la imagen con color verde, sin embargo, no se evidencia ninguna deposición de materiales; y tanto como quebradas y ríos conservan su cauce. Además, se observa que los deslizamientos mapeados en la imagen de 1962 ya no son visibles en 2001.

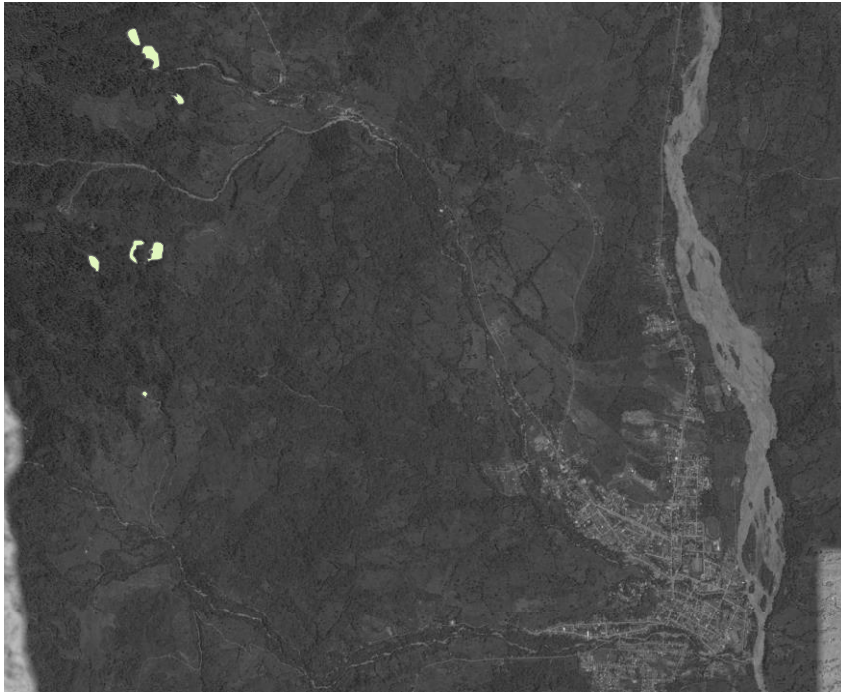


Figura 4-28. Imagen satelital Mocoa, 2001. GOOGLE EARTH.

4.2.5.3 2017 antes del evento

En la ortofoto mostrada en la Figura 4-29 no es posible observar la parte alta de la cuenca, por lo cual no es posible evidenciar algunos de los eventos registrados en 2010, 2011 y 2013 (SGC, 2017). Sin embargo, las quebradas y ríos observados en la cabecera municipal presentan un comportamiento natural, como se ha registrado a lo largo de los años.

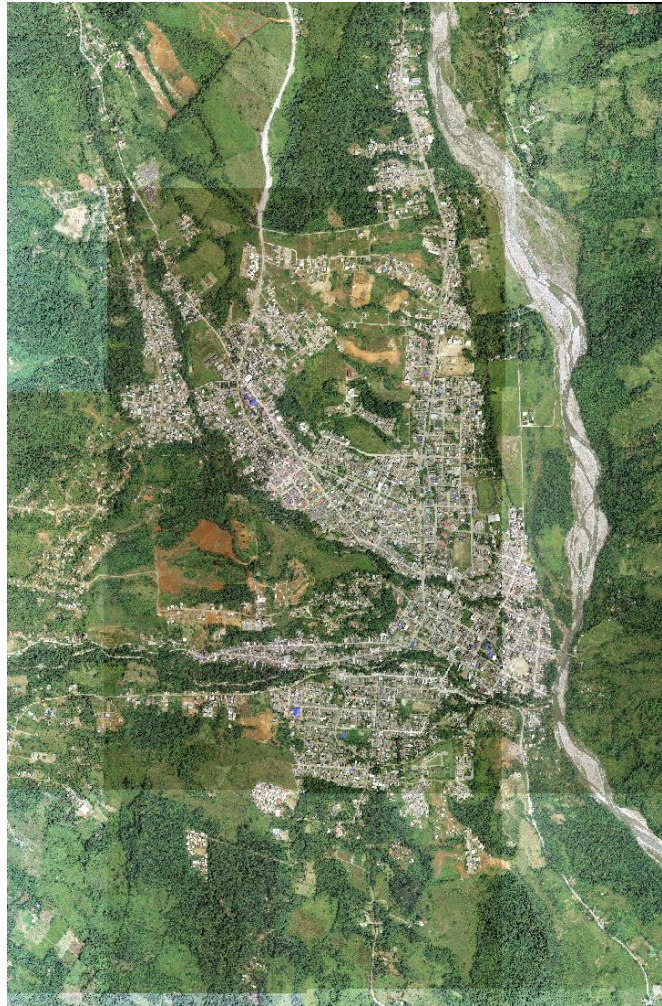


Figura 4-29. *Ortografía Mocoa, 2017 antes del evento del 31-03-17.*

4.2.5.4 2017 después del evento

Luego del evento ocurrido el 31 de marzo de 2017, fue posible evidenciar tanto en la Figura 4-30 como en la visita de campo, la ocurrencia de varios deslizamientos los cuales se encuentran mapeados como se muestra a continuación. Además, se observa el desbordamiento de la quebrada La Taruca en la confluencia con la Taruquita, haciendo continuar su cauce por la quebrada San Antonia. Aguas abajo de la confluencia, ocurrió una deposición de materiales similar a la ocurrida en 1962, pero abarcando mucha más área y 730m antes, como se explicó anteriormente; y esta vez llevándose algunos barrios por delante debido al crecimiento poblacional del municipio.

En el río Sangoyaco y Mulato, también es posible evidenciar la deposición de material a lo largo del cauce, afectando a la población. Según el registro obtenido, este evento corresponde a de mayor magnitud ocurrida en esta cuenca, con mayor cantidad de deslizamientos.



Figura 4-30. Ortofoto de Mocoa, después del evento de 31-03-17. Corpoamazonia.

Como resultado del análisis multitemporal realizado, fue posible identificar los deslizamientos ocurridos por las fechas analizadas, como se muestra en la Figura 4-31. Fue posible evidenciar la ocurrencia de algunos deslizamientos que fueron reactivados en el evento del 31 de marzo de 2017, debido a su aparición en 1962, su no aparición en 2001 y su aparición nuevamente en 2017 después de ocurrido el evento; tal como el deslizamiento que ocurrió en la curva de la quebrada La Taruca, aguas arriba de su confluencia con la Taruquita.

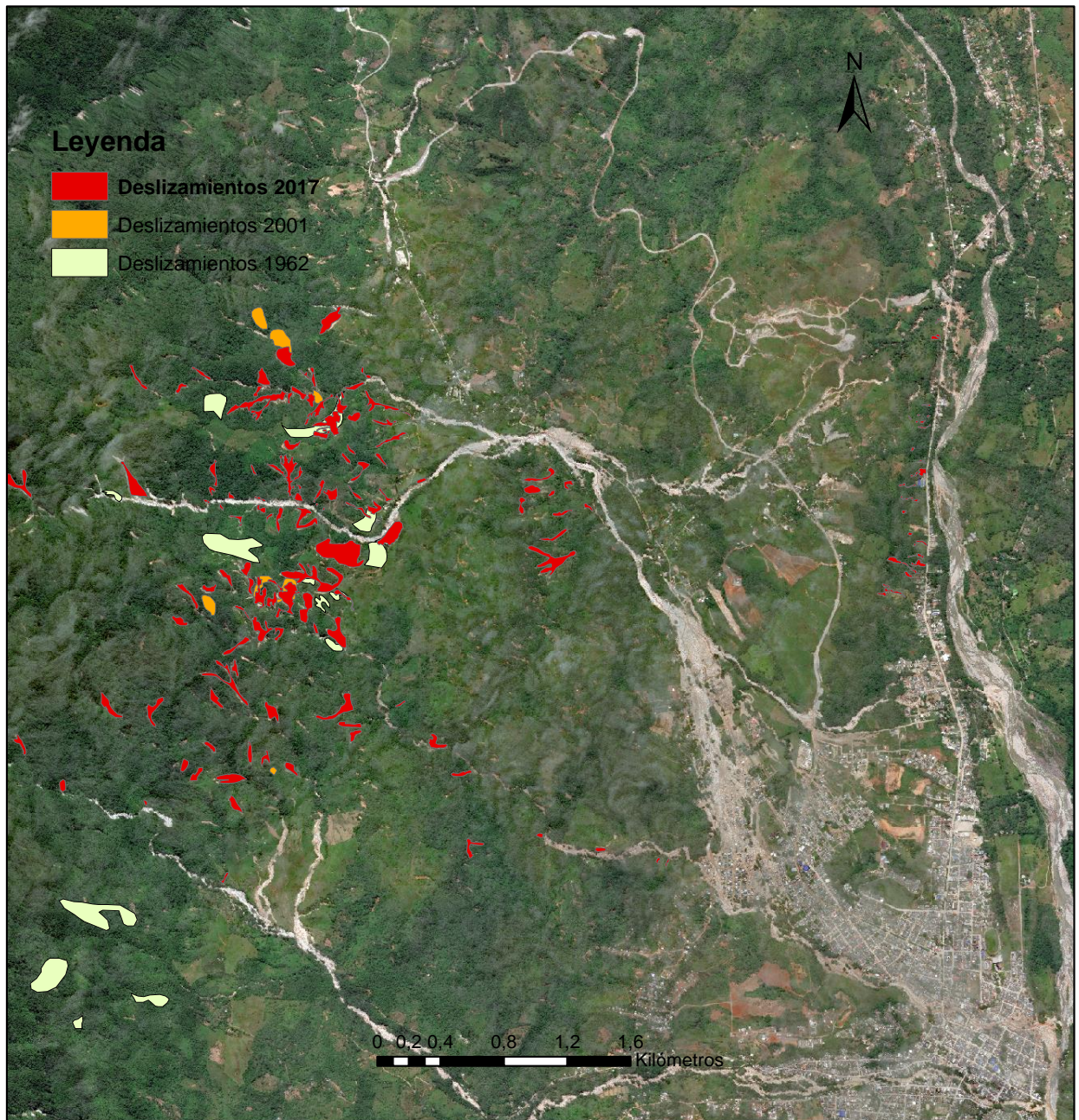


Figura 4-31. Análisis multitemporal, inventario de deslizamientos por fecha observados en imágenes de 1962, 2001 y abril 2017. (Corpoamazonia y elaboración propia).

4.3 Consideraciones hidrodinámicas para el tránsito de caudales en ríos de montaña

En las zonas de cabecera de las cuencas hidrográficas de alta montaña, de donde puede derivarse una parte significativa de la escorrentía generada durante eventos de crecida, los canales permanentes son pequeños, de

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
	<p>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</p>	

alta pendiente y con alta resistencia al flujo (rugosidad). Hasta hace un par de décadas, la dificultad de definir las relaciones hidráulicas para estos flujos someros, que recorren canales irregulares con lechos rocosos o de materiales de tamaños importantes había sido ignorada por completo. Hecho que se atribuye a la alta complejidad de los procesos involucrados (Beven et al., 1979). El flujo que se presenta en los sistemas de rápidas y pozas, por ejemplo, se caracteriza por cambios geométricos rápidos, con pequeñas cascadas y otras irregularidades en el lecho del canal que generan cambios intempestivos de las características del cauce como el ancho del canal y la profundidad del flujo, que afectan la resistencia al flujo (fricción) y el gradiente de energía del tramo de estudio.

4.4 Resistencia al flujo en ríos de montaña

El método más utilizado para realizar el tránsito de caudales en un sistema de canales se basa en la relación de las velocidades del flujo medidas en campo con los parámetros de alguna de las ecuaciones de flujo uniforme (Manning ó Chezý, por ejemplo); esto para poder derivar coeficientes de rugosidad para un tramo de río determinado. Los coeficientes de rugosidad obtenidos mediante esta metodología, se mantienen luego constantes durante el proceso de tránsito de caudales. Sin embargo, se ha observado en la práctica que los valores medidos varían con el caudal de una manera compleja y son difícil de predecir (Orlandini 2002; Heritage et al., 2004); particularmente cuando se sobrepasan los niveles máximos de las bancas del canal principal.

Mediciones realizadas en campo, mediante la aplicación de esta práctica producen en ríos de montaña resultados demasiado altos de los coeficientes de rugosidad cuando los caudales son bajos, aspecto que demuestra que el flujo en estos sistemas está altamente influenciado por la forma del canal, mientras que la contribución del tipo de material del lecho y las bancas es baja. De hecho, los altos valores reportados en la literatura, son asociados con las bajas velocidades en las zonas de las pozas en relación con las altas pendientes observadas en las rápidas.

Es bastante claro entonces que el tipo de flujo presente en este tipo de ríos es altamente no uniforme y que estos coeficientes de resistencia al flujo (rugosidad) están siendo utilizados como un parámetro para ajustar el efecto global de la disipación de energía debido a los resaltos hidráulicos y las distorsiones de las curvas, rocas, constricciones y otras perturbaciones, presentes en estas zonas (Zimmermann, 2010). Durante la ocurrencia de una creciente, sin embargo, las complejas geometrías del lecho y las secuencias de rápidas y pozas, pueden quedar sumergidas y tal vez en este punto un análisis por medio del flujo uniforme pueda ser válido nuevamente.

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
	<p><i>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</i></p>	

5 DATOS DE CAMPO

Para conocer el estado actual del cauce, posterior a los eventos observados este año, se plantea realizar una visita de campo que incluya la realización de aforos de caudal y la verificación de las cotas de algunas secciones transversales claves con la información secundaria existente.

La medición de las características del flujo en ríos de montaña presenta una serie de dificultades, derivadas de las características geomorfológicas descritas anteriormente. Para mediciones puntuales de la velocidad del flujo, las profundidades son generalmente muy bajas o la velocidad del flujo muy lenta para obtener mediciones con una precisión aceptable. Existen también serias complicaciones en la definición de las secciones transversales “representativas”, para seleccionar los lugares de medición (Beven et al., 1979). En algunos casos se ha adoptado la utilización de vertederos u otras estructuras hidráulicas laterales para medir caudales en algunas zonas determinadas, sin embargo, este tipo de estructuras afectan demasiado la naturaleza del flujo.

Considerando lo anterior, la técnica más sencilla y económica para la medición de caudales en este tipo de ríos es el método de aforo por dilución (Beven et al., 1979). Este método se aplicará durante la salida de campo con la realización de ensayos de trazadores en campo, utilizando sustancias químicas o radiactivas que, a bajas concentraciones, no son nocivas para la salud. Los sectores en los que se realizarán los aforos de caudal se presentan en la Tabla 1 y en la Figura 5. Los aforos se realizarán en la forma más simultáneamente posible, entendiéndose con el menor tiempo entre cada aforo.

Una de las actividades iniciales que se incluye en esta visita de campo será la instalación de miras que permitan realizar el registro continuo de los niveles de agua en los principales cauces de la zona de estudio (quebradas Taruca y Taruquita, ríos Sangoyaco y Mulato). La recolección de esta información de niveles será útil en el proceso de calibración de los modelos hidrodinámicos y permitirá identificar si durante la campaña de aforos se registran cambios significativos en el nivel y por ende en el caudal del sector de estudio.

La verificación de las cotas y el levantamiento de secciones transversales de importancia, se realizará en la visita de campo por medio de equipos de precisión centimétrica. Se emplearán receptores GNSS que realizan la corrección satelital en tiempo real (sistema RTK). Además de incluir todas las zonas en las que se realicen aforos, se incluirán zonas de relevancia como la confluencia de las Quebradas Taruca y Taruquita y la afluencia

de la Quebrada Taruca al río Sangoyaco. Las zonas en las que se han detectado falencias del modelo de elevación digital actual, serán verificadas también durante esta visita de campo.

ID	Y (m)	X (m)
1	1 044 812.664	622 304.661
2	1 044 782.879	622 479.245
3	1 045 262.614	622 412.825
4	1 046 122.432	621 267.922
5	1 046 814.363	619 341.035
6	1 045 356.072	619 831.149
7	1 046 690.804	619 330.350
8	1 047 015.268	619 140.176
9	1 048 183.376	618 724.126
10	1 044 341.310	618 597.435
11	1 044 866.773	618 155.060
12	1 046 309.814	618 424.935
13	1 048 116.701	618 232.001

Tabla 5-1. Puntos del plan de monitoreo a realizar en la zona de estudio. Fuente: El Autor.

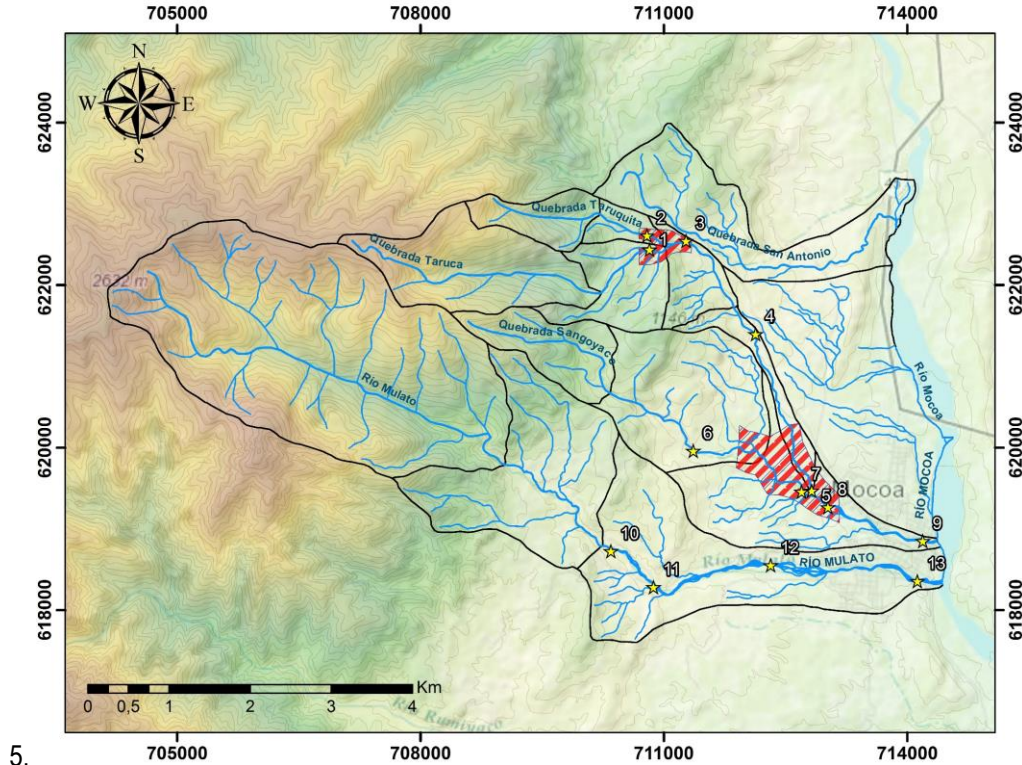


Figura 5-1. Localización de los puntos de control de la campaña de monitoreo a realizar en la zona de estudio. Las coordenadas de los puntos indicados se presentan en la **Tabla 5-1**.

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
	<p>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</p>	

Adicionalmente, se identificarán las áreas en las que los procesos de erosión de bancas sean significativos y, junto con el componente de mediciones, se identificarán los equipos de medición que sean más apropiados para el monitoreo hidro-morfológico de los cauces y la frecuencia de registro recomendada.

6 MODELOS HIDRODINÁMICOS Y PARÁMETROS DE TRÁNSITO HIDRÁULICO

6.1 Puntos de Calibración

Para realizar la calibración del modelo hidráulico, se dispone de dos referencias principalmente: (i) una fotografía tomada después del evento (4 de abril) por Geospatial, producto de una contratación hecha por Corpoamazonía y (ii) una serie de puntos con alturas de flujo de la avalancha, medidos por el Servicio Geológico colombiano (SGS) en el casco urbano y en la parte alta de las cuencas de las quebradas Taruca y Taruquita. A partir de la primera referencias mencionada, se obtienen las líneas de flujo seguidas por la avlancha y las áreas de afectación; a partir de la segunda, se obtienen alturas específicas de flujo que deberían ser simuladas por el modelo hidráulico. En la figura presentada a continuación, se presenta la fotografía tomada después del evento y la ubicación de los puntos en donde fue medida la altura de la mancha de inundación.

Las alturas de flujo medidas en campo tienen magnitudes que van de 0.15 m a 5 m; teniendo en cuenta la diferencias en las elevaciones consecuencia del evento, dichas magnitudes estarían entre 0.5 m y 13 m con respecto a las elevaciones originales.

Siguiendo lo reportado por SGC en Servicio Geológico Colombiano (2017), las mayores alturas se presentaron en las quebradas Taruca y Taruquita antes de su confluencia y en el sector del cabildo Mucurunakuna. Sobre la cárcel el flujo alcanzó una altura entre 3 y 4m y en el sitio de la desemmbocadura de la Taruca en el Sangoyaco, unos 5 o 6 m. En los barrios ubicados al sur oeste de la cárcel (como San Fernando) se alcanzaron alturas entre 2 y 3 m, pero el flujo aisló parcialmente algunos barrios de este sector. En los barrios Huasipanga, El Progreso, Villa Colombia, Bolívar, Modelo, La Independencia y San Agustín donde se alcanzaron alturas entre 1 y 3 m. Por su parte, el río Mulato presentó alturas de flujo de hasta 2 m sobre sus márgenes, afectando las casas ubicadas sobre los barrios Miraflores, 17 de Julio, José Homero y Naranjito.

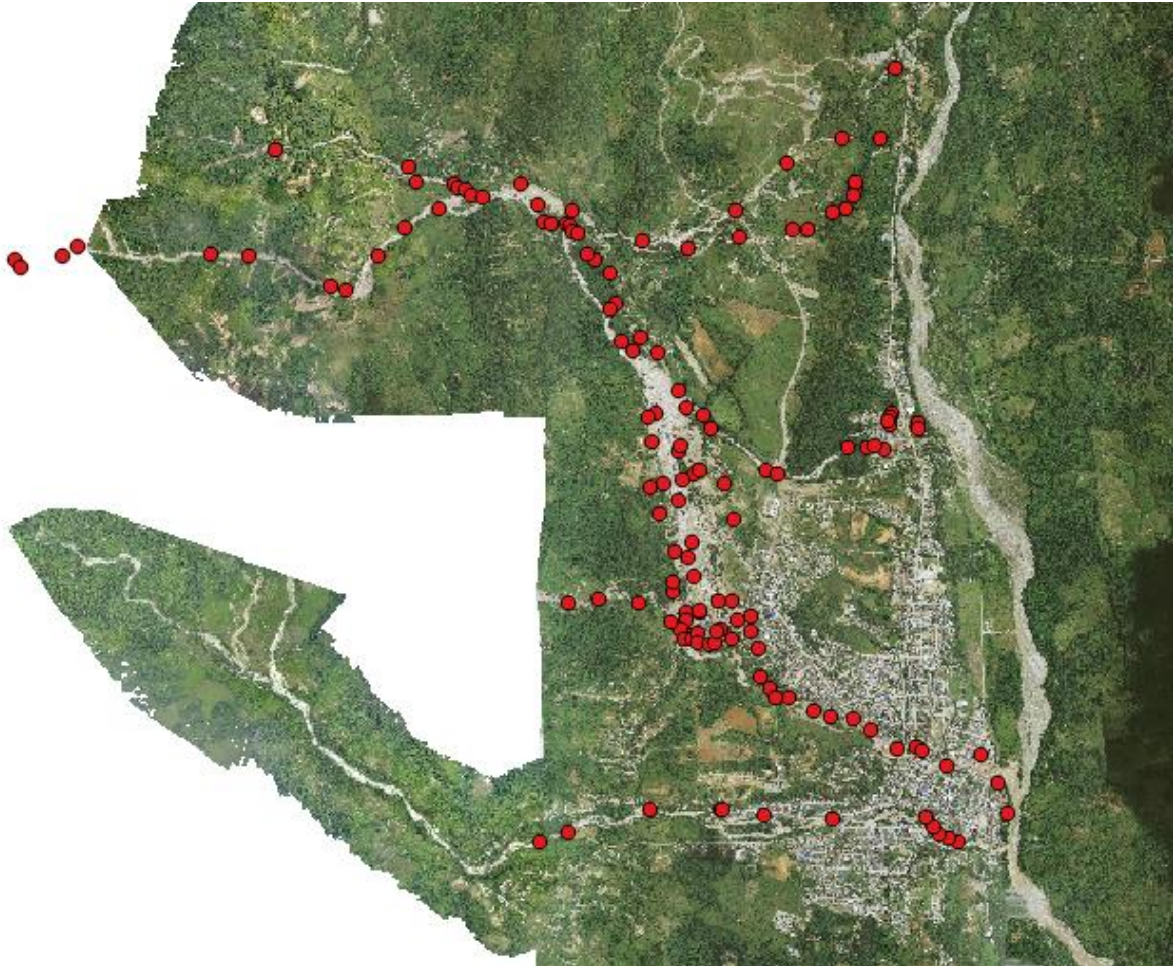


Figura 6-1. Fotografía tomada después del evento y localización de alturas de flujo tomadas por el SGC. Fuente: (GeoSpatial SAS, 2017) y (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

En la visita de campo, se identificó un puente sobre el cauce del Sangoyaco, justo antes de su desembocadura en el río Mocoa, que presentó taponamiento por una baja magnitud del galibo; esto ocasionó que parte del flujo se desviara por los barrios adyacentes a la desembocadura.



Figura 6-2. Puente en el que se presentó taponamiento. Ubicado sobre el río Sangoyaco antes de su desembocadura en el río Mocoa.

Otro aspecto identificado en campo, que vale la pena tener en cuenta en la simulación hidráulica, es el cambio en la forma del cauce de la quebrada Taruca luego del evento. La quebrada cambió el punto de su desembocadura en el río Sagoyaco, desembocando en un sitio más de 200 m aguas arriba del punto original. Cabe mencionar, que sobre el antiguo cauce fluye aún un caudal de muy baja magnitud.



Figura 6-3. Lugar de la desembocadura actual de la quebrada Taruca sobre el río Sagoyaco

Como aspectos relevantes para la calibración del modelo, se cuenta con dos aspectos adicionales identificados en la visita de la campo: la destrucción de un puente sobre el río Sagoyaco (ubicado aguas debajo de la desembocadura de la Taruca) y de uno localizado sobre el río Mulato. El gálibo de estos puentes antes del evento, brindará información adicional sobre la altura de la avalancha en dichos puntos.



Figura 6-4. Localización de puente sobre el río Mulato destruido por la avalancha. Se encuentra ubicado aguas abajo de puente metálico provisional de uso peatonal.



Figura 6-5. Localización de puente sobre el río Sangoyaco destruido por la avalancha. Se ubica aguas debajo de la desembocadura de la quebrada Taruca.

6.2 Modelos hidrodinámicos a considerar

De acuerdo con las complejas características de la hidrología y morfología de la zona, en esta consultoría se evaluarán diferentes modelos hidrodinámicos para determinar cuál de ellos es más eficiente en describir los fenómenos de avalancha y flujos de detritos a los que está expuesta la microcuenca de los ríos Mulato y Sangoyaco, y las quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.

En este estudio se evaluará el desempeño de los siguientes modelos hidrodinámicos: FLO-2D, RAMMS, AVALOW y OPEN TELEMAC. En los siguientes numerales se presentan las principales suposiciones de cada uno de los modelos a estudiar.

6.2.1 FLO 2D

El programa FLO-2D es un modelo hidráulico de tránsito de volúmenes de inundación, que cuenta con herramientas para delimitar áreas de amenaza y modelar flujos de lodos y detritos. Se encuentra aprobado por la FEMA (*Federal Emergency Management Agency*) y actualmente es propiedad de la compañía *FLO-2D Software*,

Inc. A continuación, se presenta una descripción de sus principales características y de los modelos matemáticos que emplea; esta información es extraída de FLO 2D Inc. (2015).

El modelo usa las ecuaciones de onda sinámica o de Saint Venant en una dimensión, las cuales suponen una distribución de presiones hidrostática, no cuentan con un término de viscosidad en la ecuación de momentum y el término de las fuerzas que se oponen al flujo, es representado por la suma de una fuerza gravitacional dependiente de la pendiente del terreno y una fuerza de fricción relacionada con la pendiente de la línea de energía del flujo. Las ecuaciones de gobierno son presentadas enseguida, las cuales son discretizadas por el método de diferencias finitas, usando un esquema de diferencias centrales.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hV}{\partial x} = i \tag{Ecuación 6-1}$$

$$S_f = S_o - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \tag{Ecuación 6-2}$$

Donde

V = velocidad promedio en una dirección.

h = profundidad de flujo en la celda.

So = Pendiente del terreno.

Sf = Pendiente de fricción.

Para transitar el flujo en una llanura de inundación, el programa calcula la velocidad V en ocho direcciones en cada celda; la velocidad en cada dirección es calculada en forma independiente y se realiza posteriormente un balance de masas.

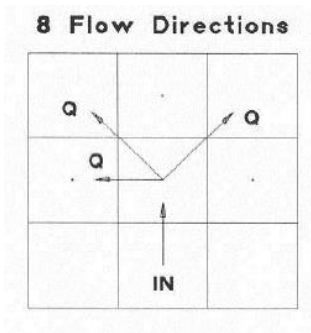


Figura 6-6. Esquema del cálculo multidireccional de la velocidad que realiza FLO-2D. Tomado y adaptado de (FLO 2D Inc., 2015)

	Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.	
	Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía	

Para transitar flujo de lodos y escombros, el programa usa un modelo reológico que estima los esfuerzos cortantes a partir de la concentración de sedimentos C_v que defina el usuario. En el enfoque que sigue, estos esfuerzos son expresados en forma de tres términos adimensionales que sumados, equivalen a la pendiente de la línea de energía S_f . Así, la pendiente de la línea de energía se calcula como la suma de: *yield slope* S_y , *viscous slope* S_v y *turbulent dispersive slope* S_{td} .

$$S_f = S_y + S_v + S_{td} \quad \text{Ecuación 6-3}$$

Estos términos son calculados en función de la concentración de sedimentos C_v , incluyendo una serie de parámetros obtenidos principalmente de relaciones empíricas.

$$S_v = \frac{K \eta V}{8 \gamma_\omega h^2} \quad \text{Ecuación 6-4}$$

$$S_{td} = \frac{n_{td}^2 V^2}{h^{4/3}} \quad \text{Ecuación 6-5}$$

$$S_y = \frac{\tau_y}{\gamma_\omega h} \quad \text{Ecuación 6-6}$$

El cálculo de los parámetros n_{td} , η y τ_y , se realiza a su vez, a partir de funciones de la concentración de sedimentos.

$$n_{td} = n_t b e^{m C_v} \quad \text{Ecuación 6-7}$$

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \quad \text{Ecuación 6-8}$$

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \quad \text{Ecuación 6-9}$$

De esta forma, además del ingreso de un hidrograma de entrada de agua y uno de sedimentos en términos de la concentración C_v , el programa solicita al usuario asignar una valor a los siguientes parámetros:

K = Prámeto de resistencia para flujo laminar; es un número real que puede estar en el rango [24, 50000]

γ_ω = Peso específico de la mezcla de sedimentos

n_t = *Turbulent n-value* o n de Manning

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
	<p>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</p>	

$\alpha_1, \beta_1, \alpha_2$ y β_2 = Coeficientes empíricos definidos por ensayos de laboratorio; son números reales positivos. Se presentan diferentes rangos de estos parámetros en (FLO 2D Inc., 2015)

Los parámetros restantes b y m de Ecuación 6-8, se encuentran definidos por el programa y no pueden ser modificados por el usuario; sus valores son de 0.0538 y 6.0896, respectivamente.

6.2.2 RAMMS

RAMMS es una herramienta de simulación numérica que proporciona distancias de desviación, alturas de flujo, velocidades de flujo y presión de impacto de avalanchas de nieve, deslizamiento de laderas y flujos de detritos. Desarrollado por el Instituto de Investigación de Nieve y Avalanchas (Institute for Snow and Avalanche Research – SLF), el Instituto Federal Suizo para la investigación de Bosques, nieve y Paisaje WSL (Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research – WSL).

RAMMS es un modelo en tres dimensiones, donde “x” y “y” son direcciones de flujo paralelas a la superficie topográfica y “z” la elevación perpendicular al perfil de la crecida aluvial. Cada dirección de flujo tiene un vector de aceleración gravitacional y un componente temporal a escala de grilla, cuyo valor depende de la resolución del DEM (Deubelbeiss & Graf, 2013).

Las ecuaciones de conservación de masa y momento se resuelven utilizando un esquema de volumen finito, el cual integra el modelo de Voellmy, en donde integra el parámetro de fricción. RAMMS se basa en las ecuaciones de Navier-Stokes en 2D modificadas por el modelo de fricción de Voellmy-Salm. Las ecuaciones de conservación de masa y momento se definen a continuación (Valdés-Pineda, Valdés, & García-Chevesich, 2017):

$$\partial_t H + \partial_x(HU_x) + \partial_y(HU_y) = Q(x, y, t) \quad \text{Ecuación 6-10}$$

En donde Q(x, y, z) es la tasa de arrastre. El balance de momentum en las direcciones x e y se denota como:

	<i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i>	
	Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía	

$$\begin{aligned} \partial_t(HU_x) + \partial_x \left(HU_x^2 + g_z K_{a/p} \frac{H^2}{2} \right) + \partial_y (HU_x U_y) \\ = S_{gx} - S_{fx} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 6-11}$$

$$\begin{aligned} \partial_t(HU_y) + \partial_y \left(HU_y^2 + g_z K_{a/p} \frac{H^2}{2} \right) + \partial_x (HU_x U_y) \\ = S_{gy} - S_{fy} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 6-12}$$

Dónde:

S_f = es la resistencia friccional o fricción total

$K_{a/p}$ = Coeficiente de presión de la tierra

S_g = Fricción gravitacional

ρ = Densidad de la crecida aluvial (kg/m^3)

g = Aceleración de gravedad (m/s^2)

H = Altura de la crecida aluvial (m)

U = Velocidad de la crecida aluvial (m/s)

RAMMS supone que el flujo aluvial es un continuo incompresible de densidad constante y con superficie superior libre. La información vertical dentro del modelo de Voellmy-Salm está dada por el coeficiente de presión de la tierra $K_{a/p}$ el cual es un factor de proporcionalidad de las tensiones verticales y normales. Este coeficiente modifica los gradientes de presión longitudinal que impulsan el flujo y se define utilizando la teoría de la presión de la tierra de Rankine (P. Bartelt, Salm, & Gruber, 1999).

Los parámetros de entrada del software RAMMS son:

- El volumen total del flujo aluvial (m^3)
- Altura del flujo (m)
- Parámetros de resistencia μ y ξ , incorporados dentro de la ecuación de fricción S_f
- Un parámetro de presión de la tierra $K_{a/p}$

6.2.2.1 Parámetros de fricción

El modelo de Voellmy divide la resistencia por fricción en dos parámetros, un coeficiente de fricción (μ) llamado coeficiente de fricción Dry-Coulomb que representa el estrés normal al movimiento del aluvión, este coeficiente se puede representar como la tangente del ángulo interno de la tensión de corte.

	Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.	
	Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía	

Un coeficiente de velocidad (ξ), llamado coeficiente de fricción viscosa, que representa el estrés asociado a la viscosidad del aluvión.

Integrándolo así:

$$S = \mu\rho Hg\cos(\theta) + \frac{\rho g U^2}{\xi} \quad \text{Ecuación 6-13}$$

Dónde:

S = Resistencia friccional de la crecida aluvial (Pa)

ρ = Densidad de la crecida aluvial (kg/m³)

g = Aceleración de gravedad (m/s²)

θ = Pendiente de la superficie topográfica donde la crecida es modelada (grados)

H = Altura de la crecida aluvial (m)

U = Velocidad de la crecida aluvial (m/s)

De acuerdo con bibliografía los parámetros μ se encuentra entre 0,05 y 0.2 y los valores de ξ están entre 150 y 600 m/s². Los valores de referencia de estos parámetros por lo general son 0,06 y 500 (Perry Bartelt et al., 2013).



6.2.2.2 Coeficiente de presión de tierra $K_{a/p}$

Dentro del modelo es posible usar el coeficiente de presión activa-pasiva, el cual modifica el gradiente presión longitudinal que dirige el flujo. Una presión activa se refiere a zonas de flujo dilatantes y para presiones pasivas se refiere a un flujo que se contrae. Normalmente el coeficiente de presión activo-pasivo se define con la teoría de presión de Rankine:

$$k_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \quad \text{Ecuación 6-14}$$

$$k_p = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad \text{Ecuación 6-15}$$

Donde ϕ es el Angulo de fricción interno. Esto implica que $k_a=1/k_p$. Dentro del software RAMMS no es posible especificar el valor del ángulo, sin embargo el coeficiente de presión se introduce directamente. El uso de este coeficiente puede afectar los resultados de la simulación. Con valores pasivos mayores (k_p) del coeficiente de presión de tierra es menor la altura del flujo y por lo tanto es más grande la expansión longitudinal del flujo de detritos, especialmente en la zona de salida, produciendo distancias de salida más grandes. En el caso contrario si la presión es activa (k_a) indican que el flujo es dilatante y se contrae dando a lugar un aumento de la velocidad.

	Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.	
	Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía	

Se recomienda mantener constante el valor de este coeficiente $k_{a/p}$ igual a 1, en casos de que se modifique el valor de este parámetro es necesario recalibrar los coeficientes μ y ξ (Perry Bartelt et al., 2013).

6.2.3 AVAFLOW

La mixtura de dos fases en un flujo de detritos se caracteriza por las propiedades de sus fases sólida y líquida. La fase del fluido se caracteriza por la densidad (ρ_f) y viscosidad (η_f), mientras que la de la fase sólida se caracteriza por su densidad (ρ_s), el ángulo interno de fricción (ϕ), el ángulo basal de fricción (δ) y el coeficiente de presión lateral de suelo (K). Los componentes de velocidad para el fluido se denotan por $u_f = (U_f, V_f)$, así mismo los del sólido $u_s = (U_s, V_s)$. La profundidad del fluido se denomina h , la fracción de volumen de sólidos α_s y la fracción de volumen de fluido α_f . El modelo de fluido para detritos consta de 7 ecuaciones, dos de conservación de masa, cuatro de conservación de momento y una de evolución de lecho. En las ecuaciones de conservación de masa se incorporan términos fuente de erosión debido al fluido y erosión mecánica debido al movimiento de la masa de flujo de detritos. De igual manera, se adicionan términos fuente de momento debido a la erosión y el arrastre de sólidos. La ecuación Ecuación 6-16 a la Ecuación 6-19 presenta el balance de masa para el sólido y fluido, además de la ecuación para la evolución morfológica del lecho (Pudasaini y Fischer, 2016).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s h) + \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_s h u_s) + \frac{\partial}{\partial y}(\alpha_s h v_s) = E_s \quad \text{Ecuación 6-16}$$

Ecuación 6-17



$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f h) + \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_f h u_f) + \frac{\partial}{\partial y}(\alpha_f h v_f) = E_f$$

Ecuación 6-18

$$\frac{\partial b}{\partial t} = -E$$

$$E = E_s + E_f \quad \text{Ecuación 6-19}$$

Donde $b = b(x,y,t)$ es la evolución de la topografía basal en el espacio y tiempo, E_s y E_f son las tasas de erosión y E es la tasa de erosión total. De manera similar las ecuaciones conservación de momento para la fase sólida y líquida se presenta de la Ecuación 6-20 a la Ecuación 6-23. Las ecuaciones de conservación de masa un término de producción de masa debido a la erosión hídrica y mecánica (E_s , E_f).

	Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.	
	Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía	

$$\frac{\partial}{\partial t} [\alpha_s h(u_s - \gamma C(u_f - u_s))] + \frac{\partial}{\partial x} [\alpha_s h(u_s^2 - \gamma C(u_f^2 - u_s^2)) + \beta x_s \frac{h}{2}] + \frac{\partial}{\partial y} [\alpha_s h(v_s u_s - \gamma C(v_f u_f - v_s u_s))] = hS_{x_s} + u_s^b E_s \quad \text{Ecuación 6-20}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} [\alpha_s h(u_s - \gamma C(u_f - u_s))] + \frac{\partial}{\partial y} [\alpha_s h(u_s^2 - \gamma C(u_f^2 - u_s^2)) + \beta y_s \frac{h}{2}] + \frac{\partial}{\partial x} [\alpha_s h(v_s u_s - \gamma C(v_f u_f - v_s u_s))] = hS_{y_s} + v_s^b E_s \quad \text{Ecuación 6-21}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\alpha_f h \left(u_f + \frac{\alpha_s}{\alpha_f} C(u_f - u_s) \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\alpha_f h \left(u_s^2 - \frac{\alpha_s}{\alpha_f} C(u_f^2 - u_s^2) \right) + \beta y_s \frac{h}{2} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\alpha_s h \left(v_s u_s - \frac{\alpha_s}{\alpha_f} C(v_f u_f - v_s u_s) \right) \right] = hS_{x_f} + u_f^b E_f \quad \text{Ecuación 6-22}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\alpha_f h \left(v_f + \frac{\alpha_s}{\alpha_f} C(u_f - u_s) \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\alpha_f h \left(v_s^2 - \frac{\alpha_s}{\alpha_f} C(v_f^2 - v_s^2) \right) + \beta y_f \frac{h}{2} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\alpha_f h \left(v_f u_f - \frac{\alpha_s}{\alpha_f} C(v_f u_f - v_s u_s) \right) \right] = hS_{y_f} + v_f^b E_f \quad \text{Ecuación 6-23}$$

Las ecuaciones de conservación de momento para la fase sólida y del fluido (Pudasaini y Fischer, 2016), incluyen los términos fuentes de producción de momento (segundo término de lado derecho). La tasa de erosión mecánica para la fase sólida es el resultado del esfuerzo de corte y el flujo de momento que se induce por el esfuerzo de corte aplicado. En donde, el esfuerzo efectivo friccional de corte neto se iguala al flujo de momento neto. El esfuerzo de corte se fundamenta en la ley de Coloumb. En modelo tiene la capacidad de realizar evolución de lecho en función de las tasas de erosión y deposito. Los Parámetros para el modelo parámetros del modelo son:

- Densidad del sólido,
- Densidad del fluido,
- Masa virtual,
- Ángulo de fricción interna,
- Ángulo de fricción basal,
- Coeficiente viscoso de corte para el fluido,
- Distribución de concentración de sólidos con la altura,
- Velocidad de caída,
- Combinación del parámetro del arrastre del detrito,
- Logaritmo en base 10 del número de Reynolds asociado a la partícula,
- Exponente de arrastre,
- Logaritmo en base 10 del cuasi-número de Reynolds,
- Logaritmo en base 10 del cuasi-número de movilidad,
- Coeficiente de arrastre del ambiente.

6.2.4 OPEN TELEMAT

Open TELEMAT-MASCARET consiste en un conjunto de herramientas de código abierto, que permiten la solución numérica de problemas de flujos a superficie libre, dentro de las herramientas contenidas, se encuentra TELEMAT-2D, que resuelve el flujo mediante las ecuaciones de aguas someras, del cálculo se obtienen entonces, la velocidad horizontal (bidimensional) del flujo y su profundidad. Otro módulo incluido dentro de open TELEMAT-MASCARET es el módulo SISYPHE, que se encarga del cálculo del transporte de sedimento tanto en suspensión como en arrastre de sedimentos y a partir de estos cálculos se pueden estimar cambios en el fondo, para estos efectos SISYPHE hace uso de las variables calculadas en TELEMAT-2D y los cambios calculados del fondo retroalimentan los cálculos hidrodinámicos. Se debe hacer énfasis en que todos los módulos que hacen parte de open TELEMAT-MASCARET son de código abierto, lo que implica que se hace posible realizar modificaciones a los modelos constitutivos originales implementados.

6.2.4.1 Ecuaciones constitutivas

Como ya se había mencionado para el cálculo de la hidrodinámica TELEMAT-2D resuelve las ecuaciones de aguas someras, que consta de un sistema de ecuaciones diferenciales parciales, en los que se tienen 2 ecuaciones para la conservación del momentum y una ecuación de conservación de la masa. Al resolver el sistema de ecuaciones se obtiene del proceso la velocidad bidimensional y la profundidad del flujo en el tiempo.

Ecuaciones de aguas someras:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0 \quad \text{Ecuación 6-24}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}\left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2\right) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) = -hg\frac{\partial z_b}{\partial x} + \nabla \cdot (h v_T \nabla u) + f_x \quad \text{Ecuación 6-25}$$



$$\frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial x}(huv) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2\right) = -hg\frac{\partial z_b}{\partial y} + \nabla \cdot (h v_T \nabla v) + f_y \quad \text{Ecuación 6-26}$$

Dónde:

u y v = Velocidades en las direcciones x y y , respectivamente.

h = Profundidad del agua, medida desde el fondo del cuerpo de agua.

z_b = Cota del fondo, medida desde un cero de referencia.

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
	<p>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</p>	

g = Aceleración de la gravedad.

ν_T = Viscosidad, incluye la viscosidad molecular y una viscosidad turbulenta.

$f_{x,y}$ = Términos fuente que actúan en los respectivos ejes.

Dentro de los términos fuente que actúan en la ecuación de momentum, se encuentra la fricción debida al lecho, estos términos se calculan en función de la velocidad, la profundidad del flujo y un coeficiente de rugosidad que depende del material que compone el lecho (coeficiente de Manning, coeficiente de Chezy, etc), estos coeficientes de fricción pueden ser calibrados.

6.2.4.2 SISYPHE, Transporte de sedimentos y evolución del lecho

SISYPHE es el módulo encargado del cálculo del transporte de sedimentos, para ello hace uso de las magnitudes calculadas en TELEMAC-2D junto con formulaciones experimentales para determinar las cantidades de sedimentos que pueden ser transportadas para determinadas condiciones de flujo. Haciendo un balance de masa entre el sedimento que puede ser movido se estima la evolución del lecho.

6.2.4.3 Transporte de fondo

Es el transporte que la corriente arrastra, se estima generalmente como una función del diámetro que compone el lecho y el esfuerzo cortante que ejerce el flujo sobre el lecho, la evolución del lecho debida al transporte de fondo se calcula mediante la ecuación de Exner.

$$(1 - n) \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \nabla \cdot Q_b = 0 \quad \text{Ecuación 6-27}$$



Dónde:

n = Porosidad del material lecho.

Z_b = Cota del fondo.

Q_b = Caudales sólidos calculados como función de la hidrodinámica.

Q_b es determinado mediante fórmulas principalmente empíricas, que dependen del flujo y el diámetro del material que es arrastrado, estos diámetros e inclusive las fórmulas pueden ser ajustadas para la calibración.

	<p align="center"><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
	<p>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</p>	

6.2.4.4 Transporte en suspensión

SISYPHE también tiene en cuenta el material que viaja suspendido en el flujo, para ello, originalmente se supone que se transporta como un escalar pasivo, lo que implica que la concentración del material que se lleva en suspensión no afecta directamente el flujo (una afectación indirecta ocurre cuando los cambios en el fondo debidos a la erosión o depositación del material en suspensión modifican el fondo). Este supuesto es válido cuando se trata con concentraciones muy bajas. En caso contrario otros modelos (como FLO-2D) incorporan términos adicionales de naturaleza friccional en las ecuaciones de momentum que consideran la concentración del sedimento en suspensión para modificar directamente la hidrodinámica, estos términos pueden ser incluidos en el modelo conceptual de TELEMAC, y por lo tanto también se deberán considerar los parámetros de calibración asociados a estos términos adicionales.

Para el cálculo del transporte en suspensión SISYPHE resuelve una ecuación de transporte para determinar el cambio de concentración del material en suspensión.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{1}{h} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(h \epsilon_s \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \epsilon_s \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] + \frac{E - D}{h} \quad \text{Ecuación 6-28}$$

Dónde:

C = Concentración de sedimentos.

u y v = Velocidades en las direcciones x y y , respectivamente.

h = Profundidad del agua medida desde el fondo del cuerpo de agua.

ϵ_s = Coeficiente de dispersión o difusión.

$E - D$ = Flujo neto de sedimentos, está basado en la concentración de equilibrio.

De esta ecuación pueden ser determinados los coeficientes ϵ_s , que afectan el término difusivo de la ecuación, estos coeficientes pueden ser calibrados.

El término $E - D$, flujo neto de sedimentos corresponde al flujo que de sedimento en suspensión que se levanta del lecho o se deposita en este. Para su cálculo se hace uso de ecuaciones que estiman la concentración de sedimento en suspensión para unas condiciones hidráulicas dadas (concentración de equilibrio), estas ecuaciones dependen del diámetro del sedimento en suspensión. Además el flujo E-D es calculado como:

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
	<p>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</p>	

$$(E - D) = w_s(C_{eq} - C_{ref})$$

Ecuación 6-29

Dónde:

w_s = Velocidad de asentamiento de las partículas en suspensión.

C_{eq} = Concentración de equilibrio

C_{ref} = Concentración de sedimento calculada mediante la ecuación de transporte.

La concentración de equilibrio deberá ser adaptada ya que las fórmulas originalmente disponibles en SISYPHE fueron concebidas para concentraciones bajas, los parámetros asociados al cálculo de las concentraciones de equilibrio también pueden ser calibrados. El término w_s controla la velocidad con que se deposita o erosiona material del lecho, por lo tanto también tiene influencia sobre el tiempo que el material que viaja en suspensión se mantiene en este estado, por lo que este coeficiente también puede ser calibrado.

7 CONCLUSIONES

La microcuenca de estudio, las características geomorfológicas de sus cauces y el tipo de flujos que se generan ante eventos extremos de precipitación hacen de la zona a modelar un ambiente altamente complejo y con particularidades que hacen necesaria la inclusión de condiciones y escenarios de modelación que no son comunes en el argot profesional. Por lo tanto, en este documento se han condensado las características meteorológicas y físicas de la zona de estudio y la selección de modelos que serán evaluados durante el desarrollo de esta consultoría para describir matemáticamente los flujos a los que puede estar expuesta la población de Mocoa, considerando el evento ya registrado en marzo de este año.

Adicionalmente, se describen en el informe las actividades que se realizarán para recopilar los datos de campo, que serán una fuente valiosa de información a la hora de calibrar los modelos seleccionados. Este proceso de calibración es altamente importante considerando que, después del evento del 31 de marzo de 2017, se produjeron cambios importantes en la morfología de los cauces. Este último aspecto hace que la información histórica existente no sea suficiente para realizar las labores de modelación que son requeridos para proponer el diseño de un sistema de alerta temprana. Es importante aclarar que los cambios observados después de la ocurrencia del evento, obligaron también a la posterior modificación antrópica de los cauces alterados, con el fin de remover los grandes volúmenes de material transportado por el evento y depositados en los cauces principales de los cauces de estudio.

	<i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i>	
	Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía	

8 BIBLIOGRAFÍA

Ahmed, S. (2010). Hydrologic ensemble predictions using ensemble meteorological forecasts. University of the Ryukyus.

ASTM. (2010). Standard Test Method for Marsh Funnel Viscosity of Clay Construction Slurries1. U.S.

Bartelt, P., Salm, B., & Gruber, U. (1999). Calculating dense-snow avalanche runout using a Voellmy-Fluid model with active/passive longitudinal straining. *Journal of Glaciology*.

Bartelt, P., Buehler, Y., Christen, M., Deubelbeiss, Y., Graf, C., MacArdell, B., y otros. (2013). RAMMS User Manual V1. Debris Flow.

Beven, K., Gilman, K., & Newson, M. (1979). Flow and flow routing in upland channel networks. *Hydrological Sciences Bulletin*, 303-325.

Camacho, L. A., & Lees, M. J. (1999). Multilinear discrete lag-cascade model for channel routing. *Journal of Hydrology*, 30-47.

Cantor Monroy, M. M. (2010). Modelación del transporte de solutos en condiciones de flujo no permanente con alta dispersión y zonas muertas en canales de baja pendiente - aplicación al caso del río Bogotá en el tramo de puente vargas - puente la virgen. Universidad Nacional de Colombia.

Carvajal, L. F., & Roldan, E. (2007). Calibración del modelo lluvia-escorrentia agregado GRJ4 aplicación: cuenca del río Aburra. 73-87.

Chandan, G., Rajesh, K., & Prakash, M. (2013). Rheological analysis of drilling fluid using MarshFunnel. *India: Journal of Petroleum Science and Engineering*.

Chu, X., & Steinman, A. (2009). Event and Continuous Hydrologic Modeling with HEC-HMS . *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119-124.

Deubelbeiss, Y., & Graf, C. (2013). Two different starting conditions in numerical debris flow models-Case Study of Dorfbach, Randa (Valais, Switzerland). *GRAF, C.(Red.) Matteredtal-ein Tal in Bewegung*, 125-138.

Faleh, A., Ahmed, Z. A.-Y., & Nagham, J. (2014). Apparent Viscosity Direct from Marsh Funnel Test. *Baghdad: Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*.

FLO 2D Inc. (2015). Introducción al Modelo FLO-2D Pro.

GeoSpatial SAS. (4 de Abril de 2017). Fotografía del casco urbano de Mocoa ADS y drone. Mocoa.

Heritage, G. L., Moon, B. P., Broadhurst, L. J., & James, C. S. (2004). The frictional resistance characteristics of a bedrock-influenced river channel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 611-627.

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
	<p>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</p>	

INVIAS, & MIG, C. I. (Agosto de 2011). INFORME FINAL DE INTERVENTORÍA – Contrato INV 3413-2006, INTERVENTORÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL DIQUE MARGINAL DESDE COLORADO HASTA ACHÍ K0+000 a K67+800.

Knelb, M. R., Yang, Z. L., Hutchison, K., & Maidment, D. R. (2005). Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: A case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*, 325-336.

Lang, P. (2010). Telemac-2D user manual.

Mathevet, T. (2005). Quels Modèles Pluie-Debit Globaux au pas de temps horaire? Développements Empiriques et Comparaison de modèles sur un large échantillon de Bassins Versants. *Ecole Nationalite De Génie Rural, Des Eaux et Forêts*, 463.

Orlandini, S. (2002). On the spatial variation of resistance to flow in upland channel networks. *Water Resources Research*, 1197.

Ortiz, E. (2011). Memoria-informe sobre modelos de previsión hidrológica empleados en otras organizaciones.

Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonius model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 275-289.

Pudasaini, S. P., & Fischer, J. T. (2016). A mechanical erosion model for two-phase mass flows. 1-21.

Razi, M. A., Ariffin, J., Thair, W., Arish N, A. M., & Arish N, A. M. (2010). Flood estimations studies using hydrologic modelling system (HEC-HMS) for Johor River, Malaysia. *Journal of Applied Sciences*, 930-939.

Römer, W. (2013). Hillslope Processes in Tropical Envrinments. San Diego: Treatiseon Geomorphology.

Schmidt, K. H., & Ergenzinger, P. (1994). Recent developments and perspectives in mountain river research. *Dynamics and Geomorphology of Mountain Rivers*, 3-11.

Servicio Geológico Colombiano. (2017). CARACTERIZACIÓN DEL MOVIMIENTO EN MASA TIPO FLUJO DEL 31 DE MARZO DE 2017 EN MOCOA – PUTUMAYO. Bogotá D.C.



SGC. (2017). Caracterización del movimiento en masa tipo flujo del 31 de Marzo de 2017 en Mocoa-Putumayo. Bogotá: SGC.

Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Barker, D., Wang, W., y otros. (2007). A description of the Advanced Research WRF.

Tolson, B. A., & Shoemaker, C. A. (2007). Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. *Water Resources Research*, 1-16.

UN - Sede Medellín. (2006). Control de inundaciones en la Región de la Mojana.

US Army Corps of Engineers. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS.

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
<p>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</p>		

Valdés Pineda, R., Valdés, J. B., & García Chevesich, P. (2017). Modelación de Crecidas Aluviones en la Cuenca del Río Copiapó. Ingeniería del Agua, 135.

Villaret, C., & Tassi, P. (2010). SISYPHE 6.0 User Manual . Modelisation des Apports Hydriques et Transferts Hydro-Sedimentaires-Laboratoire National d'hydraulique et Environment.

Zimmermann, A. (2010). Flow resistance in steep streams: An experimental study. Water Resources Research, 46.

	<p><i>Consultoría de los estudios de diseño del sistema de alerta temprana para avenidas torrenciales y crecientes súbitas generadas por precipitaciones de la microcuenca de los ríos Mulato, Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa.</i></p>	
<p><i>Documento – Determinación de modelos lluvia - escorrentía</i></p>		

9 ANEXOS

- 9.1 Perfil Río Mulato.
- 9.2 Perfil Río Sangoyaco.
- 9.3 Perfil Quebrada La Taruca.
- 9.4 Perfil Quebrada Taruquita.