

**MODELACIÓN DE MÁXIMA AVENIDA DEL RÍO PUTUMAYO PARA LA
IDENTIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN DE LA POBLACIÓN
DE PUERTO CAICEDO, DEPARTAMENTO DEL PUTUMAYO**



**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
PROGRAMA ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA
MANIZALES
2016**

**MODELACIÓN DE MÁXIMA AVENIDA DEL RÍO PUTUMAYO PARA LA
IDENTIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN DE LA POBLACIÓN
DE PUERTO CAICEDO, DEPARTAMENTO DEL PUTUMAYO**

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

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
PROGRAMA ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA
MANIZALES
2016**

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

A Dios, quien nos ha dado las fuerzas y la sabiduría para culminar con bien los estudios de especialización.

A nuestras familias, por su apoyo incondicional y su gran amor que nos inspiran para seguir luchando.

A la Universidad de Manizales, docentes y conocidos que hicieron posible llevar a cabo este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. ÁREA PROBLEMÁTICA	16
2. OBJETIVOS	18
3. JUSTIFICACIÓN	19
4. MARCO TEÓRICO.....	20
4.1. MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	20
4.1.1. Clasificación de los modelos hidrológicos.. ..	20
4.3.1. Estratigrafía.	23
4.3.2. Tectónica.	25
5. METODOLOGÍA.....	28
5.1. TIPO DE TRABAJO.....	28
5.2. PROCEDIMIENTO	28
5.2.2. Trabajo de campo.....	29
5.2.3. Cálculo hidrológico de caudales máximos del río Putumayo en el área de estudio para períodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años.	30
5.3. APLICACIÓN METODOLÓGICA EN HIDROSIG	31
5.3.1. Interoperabilidad de los cálculos informáticos.	33
5.4. APLICACIÓN METODOLÓGICA EN HEC-RAS Y HEC-GEORAS.	35
5.4.1. Modelo de Inundación (Balance de Energía).	35
5.4.2. Simulación y espacialización de las áreas de inundación probables para el área de estudio.....	39
5.5. ESTUDIO DE DINÁMICA FLUVIAL.....	40
5.5.1. Imágenes utilizadas.....	40
5.5.2. Colección de firmas espectrales.....	41
6. RESULTADOS	42
6.1. DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS.....	42
6.1.1. Modelo Hidrológico.....	42
6.1.2. Modelo Hidráulico.....	58

6.2. ESTUDIO DE DINÁMICA FLUVIAL.....	85
6.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	94
7. CONCLUSIONES.....	98
8. RECOMENDACIONES	100
BIBLIOGRAFÍA	101
ANEXOS	103

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema Geológico del Área de Estudio (Fuente: Mapa Geológico de Colombia, INGEOMINAS 2002), Color rojo representa el área de estudio.....	22
Figura 2. Diagrama de esfuerzos del área de influencia.....	26
Figura 3. Localización del bloque de terraza aluvial ubicado en la zona de extensión urbana, Imagen adquirida mediante Unidad Aérea no Tripulada, 2015 (Sep.).....	27
Figura 4. Modelo Digital de Elevaciones - DEM del área de cálculo. Fuente Imagen SRTMv3, NASA 2013 (Remuestreo).....	29
Figura 5. Modelo de espacialización de las subcuencas del área de cálculo hidrológico.....	42
Figura 6. Modelo Digital de Elevaciones (DEM) del área de estudio.....	59
Figura 7. Localización de las geometrías del Talweg.....	60
Figura 8. Distribución de estaciones transversales de análisis.....	61
Figura 9. Modelo Multianual de inundación del área de estudio.....	64
Figura 10. Esquema gráfico de Inundación en período de 100 años.....	65
Figura 11. Distribución perfilada del modelo gráfico del sistema.....	66
Figura 12. Vectores de cambio de dinámica entre 1999-2002.....	85
Figura 13. Vectores de cambio de dinámica entre 2002-2003.....	86
Figura 14. Vectores de cambio de dinámica entre 2003-2004.....	87
Figura 15. Vectores de cambio de dinámica entre 2004-2006.....	88
Figura 16. Vectores de cambio de dinámica entre 2006-2009.....	89
Figura 17. Vectores de cambio de dinámica entre 2009-2013.....	90
Figura 18. Vectores de cambio de dinámica entre 2013-2015.....	91
Figura 19. Potencia Total de la Corriente (N/m.s).....	95
Figura 20. Esfuerzo cortante N/m ²	96

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Estaciones IDEAM Consultadas, 2015	31
Tabla 2. Compendio de imágenes de satélite empleadas para el análisis.....	41
Tabla 3. Tabla de caudales calculados para el área de estudio.	58
Tabla 4. Métricas del Talweg (Izq. Hombros, Der Cauces).....	59
Tabla 5. Caudal resultante para la cuenca del Río San Juan	62
Tabla 6. Caudal resultante para la cuenca del Río Putumayo Alto	62
Tabla 7. Relación de variación de los vectores de desplazamiento del cauce respecto al eje de máxima verisimilitud.	93

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Variogramas de distribución empleados.....	31
Gráfica 2. Diagrama de correlación resultante.....	32
Gráfica 3. Estructura del variograma resultante.....	32
Gráfica 4. Proceso de agregación de variables siguiendo la estructura de la red de drenaje.....	34
Gráfica 5. Representación de los términos de balance de energía. Fuente: (HEC 2014).....	36
Gráfica 6. División por defecto de las secciones en HEC-RAS. Fuente: (HEC 2002).....	37
Gráfica 7. Interpretación de la pendiente motriz en cada sección.....	38
Gráfica 8. Metodología General del Análisis de cambio fluvial	40
Gráfica 9. Modelo espectral utilizado para identificación de coberturas	41
Gráfica 10. Modelo de salida de datos Módulo Hidrológico de HydroSIG	43
Gráfica 11. Curva de distribución de caudales máximos para el área de estudio. .	58
Gráfica 12. Curva de distribución de caudales máximos cuenca del Río San Juan	62
Gráfica 13. Curva de distribución de caudales máximos cuenca del Río Putumayo Alto.....	63
Gráfica 14. Asociación de caudales y períodos de retorno para las fuentes	63
Gráfica 15. Lineamientos de cambio en las secciones transversales	94
Gráfica 16. Variaciones estadísticas del comportamiento de las secciones.	94
Gráfica 17. Localización de la medida de control sobre el escenario de máxima avenida, socavación y dinámica fluvial.	97

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1. RESUMEN ANALÍTICO.....	103

GLOSARÍO

- 1. Modelación hidrológica:** Procedimientos matemáticos relacionales que emplea teorías físicas y matemáticas relacionadas con la hidrología y que permiten conocer parámetros propios de escorrentía y balance hídrico de las cuencas hidrográficas.
- 2. Modelación hidráulica:** Rutina mediante la cual se ejecuta una serie de procedimientos computacionales en software especializado que determina las áreas de inundación para diferentes caudales en una corriente de agua o canal.
- 3. Vulnerabilidad:** “Susceptibilidad de los sistemas naturales, económicos y sociales al impacto de un peligro de origen natural o inducido por el hombre. La vulnerabilidad siempre estará determinada por el origen y tipo de evento, la geografía de la zona afectada, las características técnico – constructiva de las estructuras existentes, la salud del ecosistema, el grado de preparación para el enfrentamiento de la situación por la población, la comunidad y los gobiernos locales, así como por la capacidad de recuperación en el más breve tiempo posible”¹.
- 4. Riesgo de desastres:** “Corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad”².
- 5. Inundación:** “Fenómeno natural que se presenta cuando el agua sube mucho su nivel en los ríos, lagunas, lagos y mar; entonces, cubre o llena zonas de tierra que normalmente son secas.”³
- 6. Dinámica fluvial:** “Es un conjunto de procesos complejos activos y metamorfosis de los sistemas fluviales tanto en su componente espacial como en su evolución temporal; así mismo, la morfología fluvial es la subdisciplina de la dinámica fluvial que estudia y analiza las formas fluviales resultantes de los procesos fluviales (principalmente erosión, transporte y sedimentación)”⁴

¹ https://es.wikipedia.org/wiki/Vulnerabilidad#En_desastres_naturales

² Ley 1523 de 2012, Art 3, Núm. 25

³ <http://www.eird.org/fulltext/ABCDesastres/teoria/preguntas/inundaciones.htm#top>

⁴ Ollero, A. (sf). Algunos apuntes sobre la dinámica fluvial: los río actuales como resultado de su propia libertad y de la intervención humana en sus riberas <http://www.unizar.es/forojuven/downloads/curso/pdfs/5.pdf>

7. **ArcGIS:** es el nombre de un conjunto de productos de software en el campo de los Sistemas de Información Geográfica o SIG. Producido y comercializado por ESRI, bajo el nombre genérico ArcGIS se agrupan varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica⁵.
8. **Exelis ENVI:** ENVI constituye la herramienta informática de software geocientífico desarrollado por EXELIS para el tratamiento, edición, procesamiento y postprocesamiento de productos de sensores remotos a través de técnicas de Teledetección⁶.
9. **HEC-GeoRAS:** HEC-GeoRAS (Hydrological Engineering Center - Geospatial River Analysis System) es una extensión para ArcGIS desarrollada conjuntamente por el Hydrologic Engineering Center del United Army Corps of Engineering y el Environmental System Research Institute (ESRI). Se compone de una serie de procedimientos, herramientas y utilidades diseñadas para procesar datos georreferenciados que permite realizar la preparación de los datos geométricos para importarlos en HEC-RAS. Mediante HEC-GeoRAS se crea un archivo de importación a HEC-RAS que recoge los datos de la geometría del terreno incluyendo el cauce del río, las secciones transversales, las líneas de flujo, etc. Este archivo se importa a HEC-RAS donde se realiza todo el cálculo hidráulico y se obtiene los resultados de calado y velocidades. Finalmente, estos resultados se pueden exportar a ArcGIS para procesarlos y obtener los mapas de inundación y riesgo⁷.
10. **HEC-RAS:** HEC-RAS (Hydrological Engineering Center - River Analysis System) es un programa de modelización hidráulica unidimensional compuesto por 4 tipos de análisis en ríos: i) Modelización de flujo en régimen permanente. ii) Modelización de flujo en régimen no permanente, iii) Modelización del transporte de sedimentos, iv) Análisis de calidad de aguas. Este software permite simular flujos en cauces naturales o canales artificiales para determinar el nivel del agua por lo que su objetivo principal es realizar estudios de inundabilidad, determinar las zonas inundables y estimar los grados de socavación de fondo, contracción y expansión⁸.
11. **HidroSIG:** HidroSIG es una extensión del Sistema de Información Geográfica **MapWindow**, que permite realizar estimaciones y análisis de variables hidrológicas, climáticas y geomorfológicas para la planificación y cuantificación del recurso hídrico. HidroSIG 4.0 es desarrollado por

⁵ <https://www.arcgis.com/features/>

⁶ <http://www.exelisvis.com/ProductsServices/ENVIProducts/ENVI.aspx>

⁷ <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-georas/>

⁸ <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

investigadores pertenecientes a la Escuela de Geociencias y Medio Ambiente de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín⁹.

12. Pix4D: Pix4D es un paquete de software exclusivo que combina imágenes aéreas tomadas por vehículos aéreos no tripulados u otro tipo convencional de aeronave en precisos mapas profesionales en 2D y modelos 3D, aplicando algoritmos de semejanza de imágenes¹⁰.

13. GNSS Ashtec Doble Frecuencia: para el levantamiento de la información básica de ajuste horizontal y vertical de las imágenes de satélite, cálculo de RMS de la topografía batimétrica se empleó un dispositivo de Navegación Global por Satélite Mobile Mapper, con doble frecuencia en señales L1 y L2 en Sistema GPS y GLONASS. Los datos fueron post-procesados utilizando rutinas de corrección por RINEX.

14. Unidad Aérea No Tripulada – UAV / Phantom 3 Pro: Para el área de estudio específico asociado a la terraza aluvial presente en el área de confluencia hídrica se realizó un levantamiento fotogramétrico utilizando una UAV (Drone), dotado de una cámara RGB con ancho de sensor de 6.16 mm y distancia focal de 4 mm, el cual se programó para vuelo autónomo a altura de 80 m sobre el DSM, para obtener capturas traslapadas de 80% con tamaño de 4000 x 2250 pixeles, con precisión horizontal de 2.71 cm y 4.28 cm vertical.

⁹ <http://www.medellin.unal.edu.co/~hidrosig/>

¹⁰ <https://pix4d.com/>

RESUMEN

La modelación de máxima avenida del río Putumayo, es una propuesta que pretende mitigar el riesgo que causa la conjunción de elementos expuestos, vulnerabilidad de los mismos y por la amenaza de inundación de en los barrios Modelo de Paz y La Playa del casco urbano de Puerto Caicedo Putumayo, localizados en un antiguo cauce del río donde además, confluye el Río San Juan.

Para el desarrollo de este objetivo, se propuso en primera medida determinar los aspectos generales del área de investigación. Posteriormente se realiza el estudio hidrológico de caudales máximos del río Putumayo en períodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años; en el estudio hidráulico, se simula y espacializan las áreas de inundación probables; igualmente se hace el análisis de la dinámica fluvial mediante el uso de productos de sensores remotos y unidad aérea no tripulada, y, finalmente, se analizan los resultados, y se efectúa la estimación del grado de amenaza y vulnerabilidad por efectos de inundación.

Cumplido el procedimiento propuesto, se obtienen resultados como la superación del tirante hidráulico de metros sobre el área inundada, el aumento progresivo aguas abajo del factor de socavación general del río Putumayo, el incremento de los pesos de socavación lateral por expansión en las huellas del cauce y la socavación de fondo con interacción de expansión lateral, que llevan a considerar como posibilidad de mitigación de inundabilidad una modelación con disposición de estructura en alturas y empotramiento entre las secciones 1212.26 y 503.6633 aguas abajo, que permita transportar y/o contraer velocidades superiores a los 4 m/s, puesto que la misma sinergia de fondo, la velocidad de superficie y la pendiente promedio del lugar indica que se generan corrientes turbulentas en las secciones medias del tirante hidráulico promedio.

PALABRAS CLAVES:

Modelación hidrológica
Modelación hidráulica
Tirante hidráulico
Vulnerabilidad
Riesgo

ABSTRACT

Modeling of maximum flood of the Putumayo River, is a proposal that aims to mitigate the risk caused by the vulnerability by threat of flooding of the districts Modelo de Paz and “La Playa” of the town of Puerto Caicedo - Putumayo, located in an ancient riverbed where in addition, converges with the San Juan river.

For the development of this objective, proposed in first step to determine the General aspects of the area of research. Later is the hydrological study of flow maxima of the Putumayo River in periods of return of 2.33, 5, 10, 25, 50 and 100 years. It simulates the hydraulic study, and they espacialize the likely flood areas; equally is the analysis of the fluvial dynamics through the use of remote sensors and unmanned aerial unit products, finally, results are analyzed, and is carried out the estimation of the degree of threat and vulnerability by effects of flooding.

Complied with the proposed procedure, obtained results and the estimation of the degree of threat and vulnerability is carried out by effects of flooding. Complied with the proposed procedure, results are obtained as the overcoming of the hydraulic tie rod of meters above the flooded area, the progressive increase in downstream scour factor general of the Putumayo River, the increase in weights of lateral scour by expansion in the footsteps of the runway and the undermining of background with interaction of lateral expansion, leading to consider possibility of mitigation of flooding a modeling with available frame heights and embedding between sections 1212.26 and 503.6633 downstream, allowing transport and/or contract rates greater than the 4 m/s, since that same Fund synergy, surface speed and the pending average of place indicates that turbulent currents in the middle of the average hydraulic Rod sections generated.

KEY WORDS:

Hydrological modeling
Hydraulic modeling
Hydraulic tie rod
Vulnerability
Risk

INTRODUCCIÓN

El Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres del municipio de Puerto Caicedo - 2012, referencia la presencia de inundaciones, crecientes súbitas y socavación hídrica producida por los ríos Putumayo y San Juan, entre otros, que han ocasionado daños en los barrios Modelo de Paz y La Playa durante varios años consecutivos sobre todo en el primer periodo de lluvias entre los meses de mayo a julio.

La propuesta que se plantea desde esta investigación, propone un enfoque integral de la gestión del riesgo haciendo énfasis en la medida *ex ante* que depende esencialmente de la identificación y análisis del riesgo y de la concepción y aplicación de medidas de mitigación, dando prioridad al análisis y solución de las causas y efectos que lo generan.

De esta manera, los conceptos y acciones están fundamentados en orientar las fases del proceso en la mitigación de los factores de vulnerabilidad de la población de Puerto Caicedo, especialmente los barrios Modelos de Paz y La Playa, quienes debido a la falta de conocimiento sobre el riesgo han ubicado sus viviendas sobre un antiguo cauce del río Putumayo y su confluencia con el Río San Juan, zona con posibilidades de inundación que se constituye en un núcleo tensor donde las corrientes andinas cambian su estructura geomorfológica a “ríos de llanura”, convirtiendo de forma previsible el desencadenamiento de amenazas.

Frente al análisis de este riesgo, se formula la modelación de máxima avenida del río Putumayo partiendo de la realización de estudios hidrológicos e hidráulicos que permitan conocer la dinámica fluvial de los ríos en mención y plantear las maneras de amortiguar el impacto.

1. ÁREA PROBLEMÁTICA

El área de estudio se localiza en la sección occidental del municipio de Puerto Caicedo – Putumayo, sobre los 76°36'44.519"W de Longitud Oeste, 0°41'6.34"N de Latitud Norte y 284 m.s.n.m. (Promedio), en la confluencia entre los ríos Putumayo y San Juan, zona priorizada como escenario de riesgo en el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres –PMGRD- debido a inundaciones que pueden ser provocadas por el aumento del volumen de agua de los mismos, “como producto de las precipitaciones durante periodos largos”,¹¹ o por represamiento con material de arrastre.

“Según registro de eventos del municipio, las inundaciones tienen un porcentaje de participación en los eventos de un 30%, la cual ocupa el primer lugar, con 15 eventos,”¹² ocasionados por diferentes fuentes hídricas que lo afectan entre ellas, los ríos Putumayo, San Juan, Picudo, Piñuña Blanco y la quebrada El Achiote.

El riesgo más alto producido por la confluencia entre los ríos Putumayo y San Juan para la población de Puerto Caicedo, es la posibilidad de “unión en la parte baja del sector La Playa hacia abajo con la quebrada El Achiote, y que puedan aproximarse hasta la iglesia Católica, como ya ha ocurrido en inundaciones anteriores”.

“El río Putumayo puede orientarse hacia el componente urbano de Puerto Caicedo si se presentan crecientes fuertes del río San Juan, ya que prácticamente la desembocadura de éste último sobre el río Putumayo se da frente del componente urbano de Puerto Caicedo. Este río, desde Villagarzón hacia abajo comienza a explayarse, tiene gran capacidad de arrastre y presenta alta sedimentación, esto hace que los canales se llenen de material con facilidad y que el río comience a divagar y generar brazuelos, afectando sobre todo a las zonas de vega. Muchas fincas han desaparecido por la socavación lateral.”¹³

La situación ha provocado en repetidas ocasiones crecientes súbitas y la inundación de los barrios Modelo de Paz y La Playa, eventos que se encuentran referenciados en el PMGRD del municipio (2012) con ocurrencia desde 1970 hasta el 2012 (es posible que haya venido ocurriendo desde años anteriores debido a la dinámica fluvial), algunos de estos asociados al fenómeno de La Niña; también se reporta que las inundaciones generalmente se presentan en la primera temporada de lluvias, que corresponde a los meses de mayo a julio.

¹¹ PMGRD Puerto Caicedo. Plan Local de Emergencia y Contingencia Municipio de Puerto Caicedo, 2005. Pg. 18

¹² *Ibíd.* Pg. 18

¹³ *Ibíd.* Pg. 19

Estas inundaciones han traído como consecuencia familias damnificadas, afectación psicosocial de las mismas, pérdida de viviendas, muebles, enseres, animales domésticos, cultivos, daños en la bocatomía del acueducto municipal, vías urbanas y establecimientos comerciales. Así mismo, se produjo la “destrucción y afectación de la zona protectora de ríos y quebradas, suelos, pérdida de fauna silvestre que habita en cercanía a las orillas del río y en las zonas de ladera. Afectación de la calidad del aire por la generación de malos olores dada la descomposición de animales y material orgánico que causaron problemas de salud pública y la presencia de vectores, aves carroñeras y roedores, lodo que afectó la biodiversidad agrícola del sector. Las aguas han presentado un incremento muy superior a lo normal, en sólidos totales, así como también en sus otras características fisicoquímicas y microbiológicas”.¹⁴

¹⁴ *Ibíd.* Págs. 33,34

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Modelar la máxima avenida del río Putumayo para la identificación la amenaza por inundación de la población urbana de Puerto Caicedo Putumayo.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los aspectos generales del área de estudio.
- Realizar el estudio hidrológico de caudales máximos del río Putumayo en el área de estudio para períodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años.
- Realizar el estudio hidráulico, simulando y espacializando las áreas de inundación probables para el área de estudio.
- Analizar la dinámica fluvial del área de estudio mediante el uso de productos de sensores remotos y unidad aérea no tripulada.
- Analizar los resultados, estimación del grado de amenaza y vulnerabilidad por efectos de inundación.

3. JUSTIFICACIÓN

El grave riesgo al que se encuentran expuestos los habitantes del casco urbano de Puerto Caicedo, especialmente los ubicados en los barrios Modelo de Paz y La Playa, así como sus posesiones, viviendas, huertas y animales domésticos por causa de inundaciones de gran magnitud de los ríos Putumayo y San Juan, sobrepasa la capacidad institucional local para dar una respuesta oportuna y adecuada, conduciendo en repetidas oportunidades a declararse en situación de calamidad pública.

La modelación de máxima avenida del río Putumayo mediante el estudio hidrológico e hidráulico permite el desarrollo de elementos de juicio para plantear medidas estructurales y no estructurales que vayan en función de mitigar los efectos identificados de vulnerabilidad de los elementos expuestos a la amenaza por inundación anteriormente expuestos.

La realización de un cálculo confiable de caudales máximos en el área de estudio para períodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años, complementado con el análisis de dinámica fluvial mediante el uso de productos con sensores remotos y unidad aérea no tripulada, hará posible simular y espacializar las zonas de inundación y recomendar una alternativa para atenuar los impactos de este fenómeno.

4. MARCO TEÓRICO

Por sus características topográficas y su régimen hidrometeorológico particular, en Colombia cada año las inundaciones producen mayores desastres porque el hombre deteriora progresivamente las cuencas y cauces de los ríos y quebradas, aumenta la erosión con talas y quemas, habitando u ocupando lugares propensos a inundaciones. La cantidad de agua que llueve cada año en el país es aproximadamente igual, pero por las razones antes expuestas los daños que producen son cada vez mayores. La suma de los perjuicios causados anualmente por las inundaciones la convierten en una de las calamidades que producen más pérdidas y deterioro social.¹⁵

En la actualidad, en Colombia las catástrofes causadas por inundaciones se han manifestado con gran intensidad mayormente en el sur del país, debido a la riqueza hídrica encontrada en este lugar.¹⁶

Teóricamente se han planteado diversas maneras para mitigar los impactos producidos por inundaciones, y a partir de su revisión se consideró idóneo retomar las propuestas de modelación hidrológica e hidráulica expuestas por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, igualmente que las de otros autores como Ponce y Molero, entre otros.

4.1. MODELACIÓN HIDROLÓGICA

“Un sistema hidrológico se define como una estructura o volumen en el espacio, rodeada por una frontera, que acepta agua y otras entradas, opera en ellas internamente y las produce como salidas. El objetivo del análisis de estos sistemas, es estudiar la operación del mismo y predecir su salida”.¹⁷

4.1.1. Clasificación de los modelos hidrológicos. “Según Ponce (1994) los modelos hidrológicos pueden dividirse en dos grandes categorías: modelos físicos o materiales y modelos formales o matemáticos; estos últimos conciben el sistema por medio de un grupo de abstracciones matemáticas que describen fases relevantes del ciclo hidrológico con el objeto de simular la transformación de las entradas en salidas del sistema.

¹⁵ UNGRD-Unidad Nacional Para la Gestión del Riesgo de Desastres. 2014

¹⁶ AGUDELO, Omar Y SUÁREZ, Carlos, op cit.

¹⁷ Cardona, Alberto et all. Mecánica Computacional Vol. XXXI. Argentina, 2012, págs. 579-603

Siguiendo a Ponce (1994), en la práctica, pueden distinguirse cuatro tipos generales de modelos:

1. Determinísticos: son formulados siguiendo las leyes de la física y/o procesos químicos descritos por ecuaciones diferenciales.

2. Probabilísticos: por el contrario, se formulan siguiendo las leyes del azar o probabilidad.

Pueden ser de dos tipos: estadísticos o estocásticos.

3. Conceptuales: son representaciones simplificadas de los procesos físicos, usualmente recaen sobre descripciones matemáticas que simulan procesos complejos basándose en unas pocas claves de parámetros conceptuales.

4. Paramétricos: o también conocidos como empíricos o de caja negra. Son los más simples, consisten en una ecuación (o ecuaciones) algebraica que contiene uno o más parámetros a ser determinados por el análisis de datos u otro medio empírico”.¹⁸

4.2. MODELACIÓN HIDRÁULICA

Mediante la modelación hidráulica se realiza una estimación lo más confiable posible de las áreas de inundación para diferentes caudales.

El modelo utilizado corresponde al modelo matemático unidimensional Hec-RAS 4.1.0, software gratuito de origen Estadounidense desarrollado por parte del Cuerpo de Ingenieros de la Armada (US Army Corps of Engineering), donde posee varios programas de computación para la administración del recurso de agua.

HEC-RAS resuelve el flujo gradualmente variado a partir de la ecuación de balance de energía (trinomio de Bernoulli) entre dos secciones dadas, excepto en los casos en los que se simule estructuras como puentes, vertederos o tramos cortos entubados (*culverts*). En tales casos HEC-RAS resuelve la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento, así como ciertas ecuaciones de carácter empírico establecidas *ad hoc* para estas estructuras.

“El proceso de modelación hidráulica consta de tres etapas:

- **Preproceso.** Es el trabajo previo en HEC-GeoRAS instalado como herramienta en Arc GIS donde se genera un archivo de importación para HEC-RAS que contiene la información geométrica de las secciones transversales.

¹⁸ *Ibíd.*, pg. 579-603.

- **Modelización del flujo.** Para la generación del flujo para cada período de retorno con HEC-RAS y generación del archivo de exportación para ArcGis y,
- **Postproceso.** Nuevamente con ArcGis y HEC-GeoRAS, que genera los resultados finales de superficies de inundación para cada período de retorno, grids de profundidad, visualización 3d.¹⁹

Para realizar la modelación de máxima avenida del río Putumayo y aplicar los procesos hidrológicos e hidráulicos, es preciso tener presente los aspectos geológicos, estratigráficos y tectónicos que se muestran a continuación.

4.3. GEOLOGÍA

Es importante precisar que en el área de estudio, particularmente en la temática de la geología tectónica, la desembocadura del río San Juan en el Río Putumayo hace parte del punto de concurrencia de dos fallas geológicas de tipo dextral, con rumbo sur-este, ambas de carácter inverso y cubiertas.

Adicionalmente, la zona de influencia de las hoyas hidrográficas, asociadas a los Talega principales está inmersa en dos sistemas regionales determinísticos de la dinámica tectónica del departamento, como lo es el Anticlinal Guayabal y Sinclinal San Pedro. Ver Figura 1.

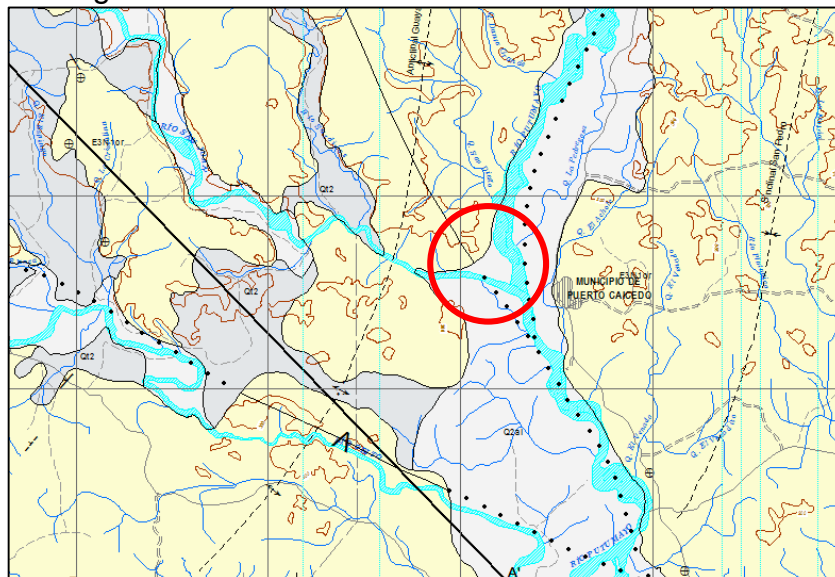


Figura 1. Esquema Geológico del Área de Estudio (Fuente: Mapa Geológico de Colombia, INGEOMINAS 2002), Color rojo representa el área de estudio.

¹⁹ Molero, Emilio. Manual Básico de HEC-GeoRAS 10 (3ª edición) 2013, pg. 10-23.

4.3.1. Estratigrafía.

Como se mencionó en el anterior aparte, el área de estudio corresponde a la concurrencia de dos unidades estratigráficas de tiempos diferentes; en el caso del cauce se encuentra la unidad **Q2al** del Cuaternario y la **E3N1or** correspondiente a la edad de transición entre el Paleógeno / Neógeno superior.

Aluviones (Q2al)

En el Departamento del Putumayo se encuentran depósitos aluviales extensos, especialmente en el piedemonte y la llanura amazónica, asociados a los valles de los ríos Caquetá y Putumayo. Estos depósitos aluviales se encuentran siempre relacionados a los cauces actuales y activos de los diferentes ríos que drenan la zona y descargan su caudal a la llanura amazónica. Los depósitos de este tipo más extensos se encuentran al oriente de la ciudad de Mocoa, en el sector de Villagarzón - Puerto Limón; el río Putumayo y sus afluentes Vides, Orito, **San Juan**, Conejo y otros menores y el río San Miguel con sus tributarios Churuyaco, Rumiyaco y Gavilanes²⁰.

Las acumulaciones aluviales están conformadas por partículas tamaño bloque, canto, grava, arena, limo y arcilla, de muy variada composición litológica, con o sin matriz, y refleja la constitución geológica de las áreas drenadas. El espesor de estas acumulaciones es muy variable y su edad es holocénica a reciente y están en permanente proceso de acumulación y reorganización.

Dentro de estas acumulaciones aluviales se incluyen algunos niveles de terrazas bajas, que constituyen las geoformas más recientes y, por tanto, de menor altura sobre el nivel actual de las corrientes, tanto que en numerosas ocasiones se confunden con los depósitos aluviales actuales (**Núñez, 2003a**)²¹. Estos depósitos están constituidos por gravas, arenas y limos de composición muy variada que refleja, como es obvio, la constitución litológica del área drenada por la corriente asociada. Niveles de terraza bajas (aluviones) se encuentran sobre el río Putumayo, principalmente en el área de descenso hacia la llanura amazónica y las áreas de concurrencia con los afluentes que tienen su origen en las áreas aferentes del valle de Sibundoy; así como entre Villagarzón y Puerto Limón. Terrazas bajas – (aluviones) también se encuentran asociadas a los cauces actuales de los ríos Caldero, Caquetá, Conejo, Churuyaco, Fragua, Fragüita, Inchiyaco, Indiyaco, Luna, Mandiyaco, Orito, Putumayo, Rumiyaco, San Juan, San Miguel, Vides y Yurayaco.

Grupo Orito (E3N1or)

²⁰ Geología del Departamento del Putumayo, Memoria Explicativa, INGEOMINAS 2003

²¹ *Ibíd.* 2

Según **McGirk (1949)**, el Grupo Orito fue definido por **Miley & McGirk (1948)** en el río Orito; las primeras referencias, en la cuenca del Putumayo, se remontan a reportes de Texas Petroleum Company, en los cuales el Grupo Orito está conformado por las formaciones Orteguzaza y Belén (**McGirk, 1949**). Otros reportes internos de la Texas indican que el grupo está constituido por las formaciones Orteguzaza, Belén y Orito, aunque algunas veces nombran la unidad como Formación Orito solamente. Reportes de Shell subdividen el Grupo Orito en las formaciones Orteguzaza y Belén - Orito. Con estas consideraciones y como lo hizo **Núñez (2003 a)**, en este trabajo se hace referencia al Grupo Orito en el sentido de la **Shell**, es decir, conformado por las formaciones Orteguzaza y Belén - Orito, aunque no fueron separadas en el mapa geológico. Su localidad tipo, de acuerdo con **McGirk (1949)**, se localiza al norte del Anticlinal Orito, aunque no se tienen detalles acerca de la definición original.

Localización: Los afloramientos del Grupo Orito, en el Departamento del Putumayo, están restringidos al valle del río Mocoa y a la **llanura amazónica**, en donde forma un relieve ondulado, debido fundamentalmente a su composición litológica que no permite generar relieves sobresalientes. El Grupo Orito conforma toda la zona suroriental del área departamental, pero sus exposiciones, por lo regular, son pobres y están enmascaradas por depósitos cuaternarios; adicionalmente, salvo los afloramientos cercanos al piedemonte, la estratificación de la unidad tiene un buzamiento muy bajo a subhorizontal y horizontal, lo que imposibilita determinar con detalle la secuencia estratigráfica.

Descripción: El Grupo Orito está conformado por estratos delgados a gruesos de lodolitas, limolitas y lodolitas arenosas de color gris, rojo, morado, amarillo y moteadas, con intercalación de estratos gruesos lenticulares a ondulados no paralelos y no continuos de litoarenitas de textura variable, inmaduras a submaduras, con ondulitas y laminación inclinada en artesa, plana paralela y localmente macizas. Las litoarenitas presentan micas, laminillas y restos de materia orgánica, óxidos de hierro, yeso y localmente bioperturbación.

En algunos sectores se encuentran niveles de conglomerados finos, granosoportados, cuya composición principal es chert y cuarzo, así como niveles arcillosos oscuros, con abundante materia orgánica, delgadas láminas de yeso y capas centimétricas de carbón. Algunos horizontes fosilíferos han sido reportados por diferentes autores (**McGirk, 1949; Cáceres & Teatín, 1985**; entre otros), en los cuales se registra la presencia de foraminíferos arenáceos, ostrácodos, gastrópodos y fragmentos de plantas.

Espesor. **Núñez (2003 a)** indica que una secuencia afectada por fallamiento, en el río San Juan, dio un espesor de 1.546 m, mientras que en la quebrada La Chorrera se midieron 946 m sin que se hubiera podido observar el tope de la secuencia. Con anterioridad se tiene el reporte de **McGirk (1949)**, que indicaba un rango entre 1.000 y 1.300 m de espesor.

Contactos. El contacto inferior con el segmento superior de la Formación Pepino es neto, paraconforme y gradual; en la base del Grupo Orito las capas de arcillolitas arenosas grises marcan un cambio transicional con el Miembro Superior de la Formación Pepino. El límite superior del Grupo Orito con los depósitos cuaternarios que lo suprayacen es una discordancia, comúnmente de tipo angular. También se reportan límites paraconforme y disconforme.

Paleontología: **Cucalón & Camacho (1966)** indican la existencia de ostrácodos, gasterópodos, pelecípedos y foraminíferos (*Nonion*, *Sigmoilina*, *Spiroculina* y *Amobaculites*), dentro de la unidad.

Edad: Las asociaciones fosilíferas encontradas en las sedimentitas del Grupo Orito corresponden al intervalo Oligoceno - Mioceno Medio (**McGirk, 1949**). En el área cercana al Municipio de Orito (**Plancha 449 Orito**), las unidades correspondientes a la secuencia que se considera como Grupo Orito (formaciones La Paloma, Ospina y San Miguel) tienen edad que va del Oligoceno medio al Plioceno según **Miley & McGirk (1948)**.

A partir del análisis palinológico de muestras provenientes de las secciones estratigráficas del río San Juan y el suroriente de Mocoa, se obtuvo una asociación palinológica que indica una edad del Eoceno tardío al Oligoceno (**Núñez, 2003 a**). **Higley (2001)**, con base en la información de diversos autores, incluye el Grupo Orito en el Oligoceno y parte más baja del Mioceno.

Génesis: Las características litológicas del Grupo Orito indican una deposición en un ambiente de llanuras costeras, tipo paludal. Un ambiente similar, con predominio de condiciones lacustres, pantanosas y de aguas salobres, predominó hasta finales del Mioceno, e incluyó la deposición de las arcillolitas abigarradas y arenitas de las formaciones Orito-Belén y Ospina, según Mora et al. (1998)²².

4.3.2. Tectónica.

Falla San Pedro

La Falla San Pedro, con dirección general N50°W, hacia el norte se comporta como una falla de rumbo de movimiento siniestral que afecta a las unidades desde la Formación Saldaña hasta el Grupo Orito; hacia el sur se insinúa como un gran lineamiento. Por el norte es truncada por el Sistema de Fallas Conejo. Dentro del área del proyecto la falla tiene rumbo N60°W, con intervención directa de 645 metros en la referencia orográfica, de los cuales 428 se representan como falla cubierta.

²² *Ibíd.* 2

Falla Blanca

La Falla Blanca es de movimiento siniestral y dirección N50-60°W; afecta todas las unidades que afloran desde la llanura amazónica hasta la parte alta de la Cordillera Central. Para el caso del área de estudio la Falla Blanca se encuentra a 4.34 Km de la zona de confluencia, con rumbo S18°W. Aparentemente, éste rasgo geológico es una de las fallas más recientes del área departamental.

Anticlinal Guayabal

El anticlinal de Guayabal dentro del área de estudio se dispone con rumbo S18°W; afecta principalmente las áreas de deposición de los afluentes hídricos de la margen derecha aguas debajo del Río Putumayo, principalmente aquí se encuentran los ríos San Juan y Orito. Éste anticlinal se encuentra a 4.6 Km de la zona de concurrencia en origen N46°W.

Sinclinal San Pedro

El pliegue de San Pedro, se encuentra fisiográficamente más representativo en el municipio de Puerto Caicedo, en especial porque se distribuye desde las áreas de deposición intermedias del Río Platanillo, sigue de forma paralela a la Quebrada Venado hasta su desembocadura. Éste rasgo tectónico de encuentra en rumbo S72°E a 6.3 Km. Ver figura 2.

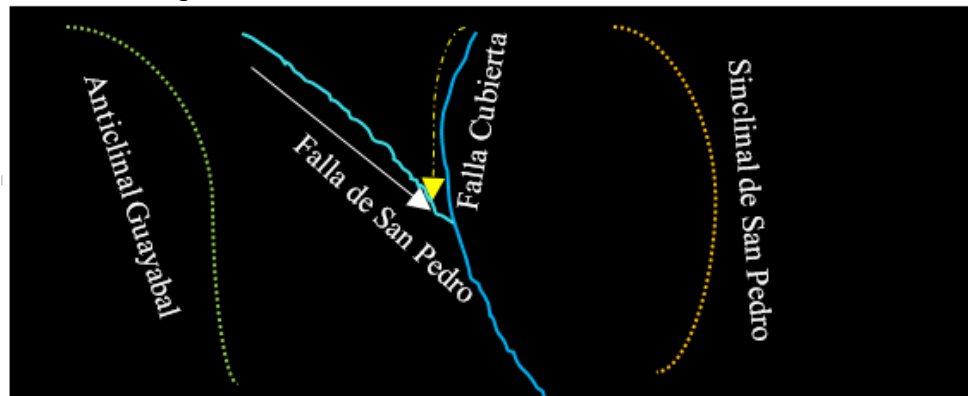


Figura 2. Diagrama de esfuerzos del área de influencia

De acuerdo a la figura 3, se puede observar que el gradiente de presiones y esfuerzos ha generado áreas de aislamiento hídrico compuesto de bancos de arena (huella) que de cierto modo se convierten en las barreras naturales que limitan la transición directa del cauce del Río San Juan sobre la población ribereña del casco urbano del Municipio de Puerto Caicedo. Las implicaciones que tiene la falla junto al rumbo que presenta, se asocia a la posibilidad que las corrientes sean conducidas hacia la cabecera urbana del municipio, operando este pliegue como un control que limita la energía cinética de la zona de confluencia de los dos ríos.

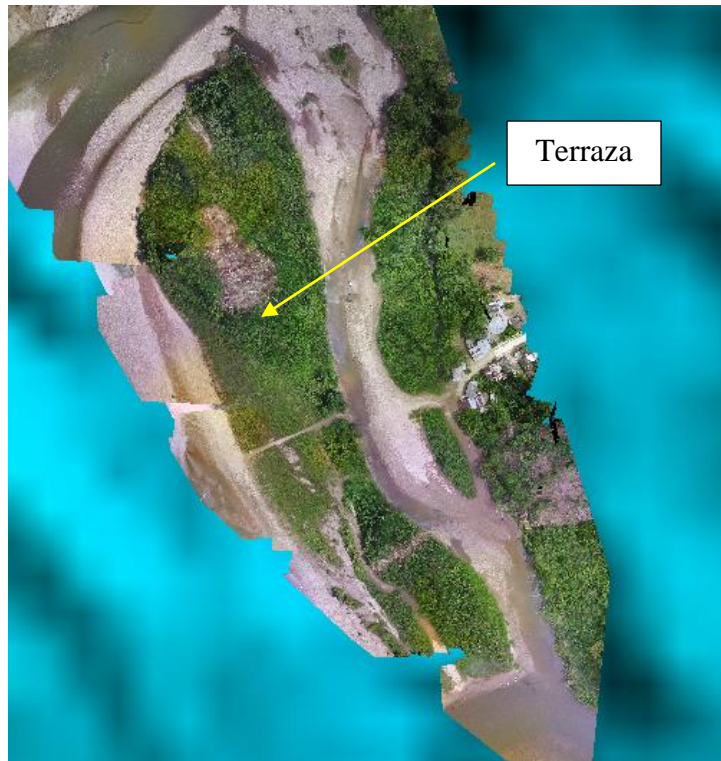


Figura 3. Localización del bloque de terraza aluvial ubicado en la zona de extensión urbana, Imagen adquirida mediante Unidad Aérea no Tripulada, 2015 (Sep.)

5. METODOLOGÍA

5.1. TIPO DE TRABAJO

El trabajo de grado según el objeto de estudio se enmarca en el concepto de investigación aplicada en cuanto a la funcionalidad de los resultados, que se espera sean de beneficio directo para la población del municipio de Puerto Caicedo.

De acuerdo con el análisis de información, el trabajo de grado es investigación descriptiva debido a que se describen datos que pueden tener impacto en la seguridad y bienestar de la comunidad en el área de estudio.

Según las técnicas de obtención de datos, el trabajo de grado es investigación proyectiva porque está orientada a dar respuesta acertada sobre la gestión del riesgo por inundaciones, con base en información de base del comportamiento hidrológico e hidráulico del área de estudio.

5.2. PROCEDIMIENTO

La metodología usada en el estudio consiste en la modelación hidráulica de varios eventos hidrológicos de grandes magnitudes, para distintos períodos de retorno, a través del análisis de información disponible y recolectada (información secundaria, restitución aerofotogramétrica, Modelo de elevación de terreno, registros de estaciones), con la aplicación del programa HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System),

El estudio se basa en distintos momentos, que comprende: (i) recopilación de información secundaria, (ii) trabajo de campo, (iii) cálculo hidrológico de caudales máximos del río Putumayo en el área de estudio para períodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años, (iv) análisis de dinámica fluvial del área de estudio mediante el uso de productos de sensores remotos y unidad aérea no tripulada., (v) simulación y espacialización de las áreas de inundación probables para el área de estudio (vi) análisis y síntesis de resultados.

5.2.1. Recopilación de información secundaria. Existen en la literatura técnica diferentes informes que de alguna manera tienen que ver con la zona de estudio, siendo la mayoría de ellos de carácter geológico. Sólo unos pocos son de diagnósticos ambientales. Entre los estudios de carácter hidrológico se tuvo acceso al ESTUDIO DE HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA PARA GESTIÓN DEL RIESGO POR INUNDACIONES EN CUENCA DE LA QUEBRADA EL SÁBALO, MUNICIPIO DE ORITO, DEPARTAMENTO DEL PUTUMAYO desarrollado por la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonia CORPOAMAZONIA en agosto

de 2013, que desarrolló una aproximación preliminar soportada en marcos conceptuales aplicados en otros estudios en Colombia. En la modelización hidráulica se usó herramientas de sistemas de información geográfica para hidrología, así como el uso del software libre HEC-RAS. Con base en experiencias exitosas al nivel territorial como nacional, se diseñaron alternativas de intervención estructural y no estructural.

El modelo digital de elevación (DEM sigla en inglés). Es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Ver la figura 4.

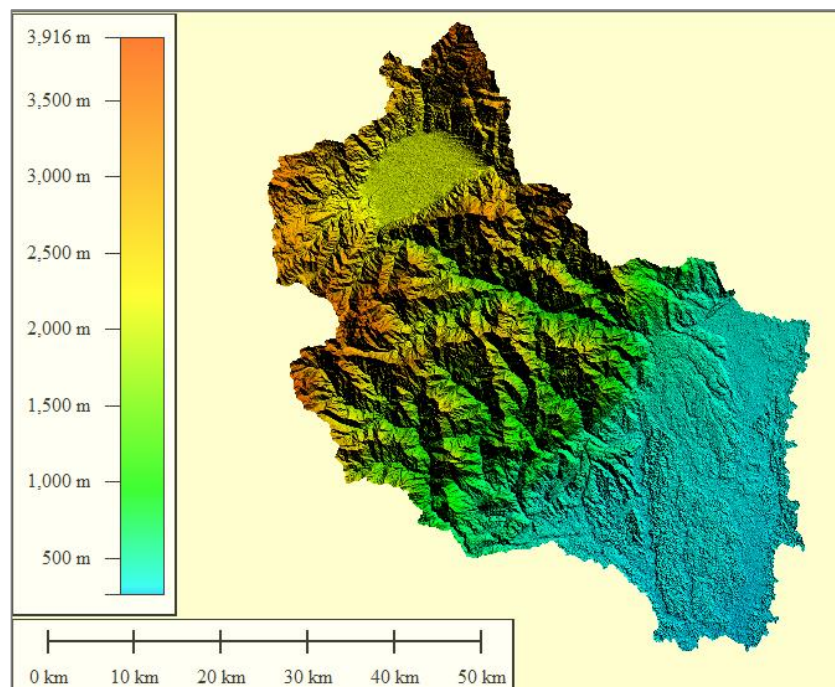


Figura 4. Modelo Digital de Elevaciones - DEM del área de cálculo. Fuente Imagen SRTMv3, NASA 2013 (Remuestreo)

La imagen SRTMv3 consiste es un producto del sistema de radar especialmente modificado que voló a bordo del transbordador espacial **Endeavour** durante la misión STS-99 de febrero de 2000. El sistema de apertura sintética empleado para obtener las alturas de la hoya geográfica tiene una resolución de 30 metros bajo remuestreo de *Voids*; rutina realizada como procesamiento de datos preliminares en éste estudio.

5.2.2. Trabajo de campo. Para el área de estudio específico asociado a la terraza aluvial presente en el área de confluencia hídrica se realizó un levantamiento fotogramétrico utilizando una UAV (Drone), dotado de una cámara RGB con ancho

de sensor de 6.16 mm y distancia focal de 4 mm, el cual se programó para vuelo autónomo a altura de 80 m sobre el suelo, para obtener capturas traslapadas de 80% con tamaño de 4000 x 2250 pixeles, con precisión horizontal de 2.71 cm y 4.28 cm vertical.

5.2.3. Cálculo hidrológico de caudales máximos del río Putumayo en el área de estudio para períodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años. El estudio hidrológico estructurado para esta investigación fue fundamentado en el principio de regionalización de caudales a través del cálculo de los datos de registro de precipitaciones máximas horarias, máximas diarias y precipitación media multianual de todas las estaciones pluviométricas localizadas desde la zona de confluencia aguas arriba del área hidrográfica del Río Putumayo Medio y Alto, hasta los límites con el departamento de Nariño.

La información meteorológica obtenida de las estaciones pluviométricas esinópticas fue obtenida a corte del 30 de junio de 2.015 a través de la solicitud Web tramitada ante IDEAM.

COD	NOMBRE	CAT	CLAS	DPTO	MUNICIPIO	LAT	LONG	ALTITUD
47010020	BALSAYACO [47010020]	PG	MET	PUTUMAYO	SANTIAGO	1.118	-76.981	2070
47010150	CARRIZAL [47010150]	PM	MET	PUTUMAYO	SANTIAGO	1.137	-77.037	2300
47010050	CHUNGACASPI [47010050]	PM	MET	PUTUMAYO	SAN FRANCISCO	1.134	-76.930	2100
47017150	JOYA LA [47017150]	LG	HID	PUTUMAYO	VILLAGARZÉN	0.789	-76.579	350
47015010	MENTA LA [47015010]	CO	MET	PUTUMAYO	SIBUNDOY	1.183	-76.933	2067
47015040	MICHOACAN [47015040]	CO	MET	PUTUMAYO	COLÉN	1.198	-76.961	2100
47010040	CHALET GUAMUES [47010040]	PG	MET	NARIÑO	PASTO	1.150	-77.117	2950
44010020	PEPINO EL [44010020]	PM	MET	PUTUMAYO	MOCOA	1.083	-76.667	760
44015020	PORVENIR [44015020]	CO	MET	PUTUMAYO	SAN FRANCISCO	1.183	-76.867	2230
47015100	ENCANO EL [47015100]	CP	MET	NARIÑO	PASTO	1.160	-77.161	2830
47010110	PTO CAICEDO [47010110]	PM	MET	PUTUMAYO	PUERTO CAICEDO	0.686	-76.605	300
44010110	PTO LIMON [44010110]	PM	MET	PUTUMAYO	MOCOA	1.027	-76.542	430
47010120	PTO UMBRIA [47010120]	PM	MET	PUTUMAYO	VILLAGARZÉN	0.900	-76.567	320
47010070	PUTUMAYO [47010070]	PM	MET	PUTUMAYO	SIBUNDOY	1.150	-76.933	2070
47010080	QUINCHOA [47010080]	PM	MET	PUTUMAYO	SANTIAGO	1.150	-77.000	2075
47010010	SAN ANTONIO [47010010]	PM	MET	PUTUMAYO	SAN FRANCISCO	1.150	-76.900	2135
47017060	SAN ANTONIO [47017060]	LM	HID	PUTUMAYO	MOCOA	1.133	-76.867	2105

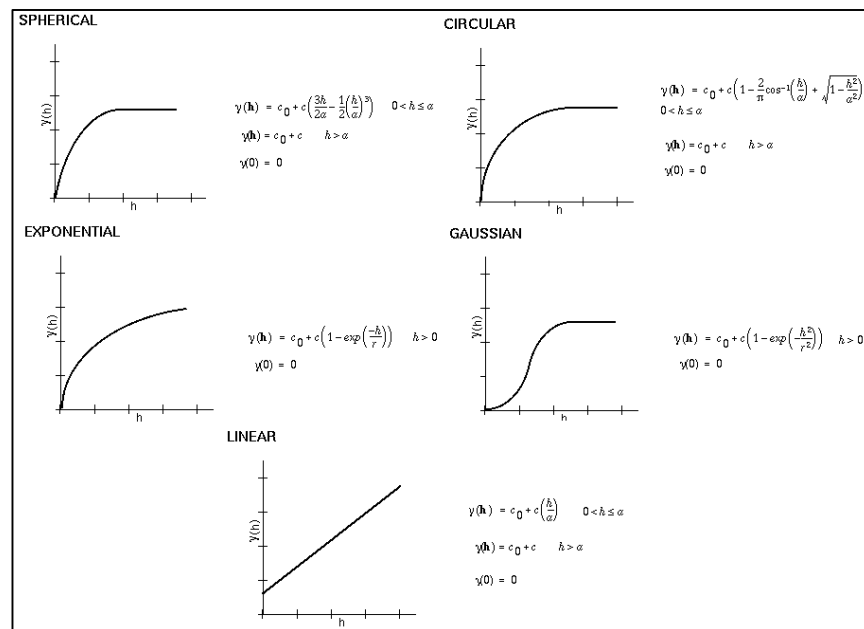
47010100	SAN PABLO [47010100]	PM	MET	PUTUMAYO	SIBUNDOY	1.167	-76.933	2065
47015030	SIBUNDOY [47015030]	CO	MET	PUTUMAYO	SIBUNDOY	1.183	-76.917	2100
47017050	SIBUNDOY [4701705]	LM	HID	PUTUMAYO	SAN FRANCISCO	1.200	-76.883	2113
47010180	TORRE TV SAN FCO [47010180]	PM	MET	PUTUMAYO	SAN FRANCISCO	1.145	-76.845	3000
47010170	VICHOY [47010170]	PM	MET	PUTUMAYO	COLÉN	1.183	-76.983	2280
44015010	VILLAGARZON [44015010]	AM	MET	PUTUMAYO	VILLAGARZÉN	1.034	-76.619	440

Tabla 1. Estaciones IDEAM Consultadas, 2015

5.3. APLICACIÓN METODOLÓGICA EN HIDROSIG

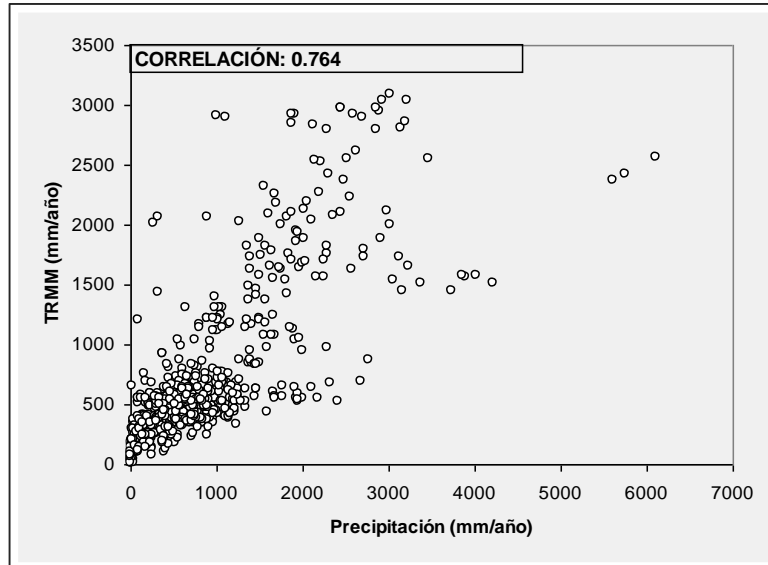
El desarrollo del cálculo meteorológico de distribución normal de **Gumbel** del cual trata la metodología aplicada mediante el software de procesamiento de datos meteorológicos tuvo como principal insumo el modelo digital de elevaciones del área de la cuenca descrita aguas arriba del sitio de confluencia de los Ríos San Juan y Putumayo.

Para los datos relacionados con los registros de precipitación, evaporación, evapotranspiración, punto de rocío, lluvias máximas, desviación standard y factor de incertidumbre se generaron archivos raster con celdas de 30 metros, previamente a la construcción de polígonos de **Thiessen** e interpolación mediante los diferentes métodos estadísticos teóricos ilustrados a continuación.



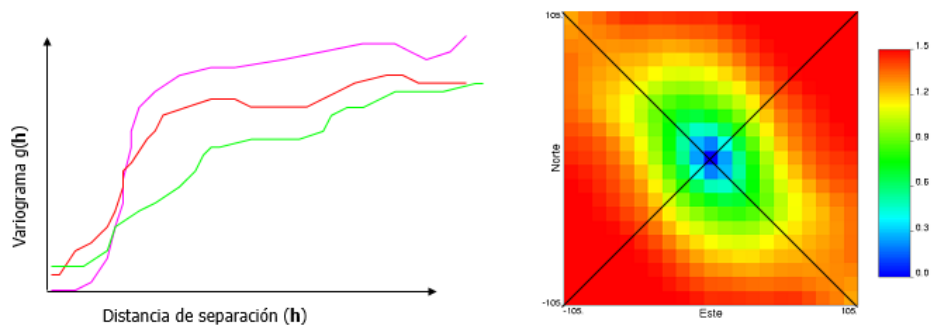
Gráfica 1. Variogramas de distribución empleados.

Mediante la diagramación de variables resultantes de los diferentes modelos de datos empleados para la hoya hidrográfica ajustados a la correlación máxima se decidió utilizar el método ordinario de **Kriging**.



Gráfica 2. Diagrama de correlación resultante.

La Gráfica 2, corresponde a un modelo normalizado al 0.5 de paso, empleado así para homogenizar los datos de precipitación que se comportan de manera exponencial al $X^{1.81}$ a $X^{1.68}$ sobre los registros de evapotranspiración. De modo que el modelo de variograma resultante estuvo en el orden admisible del cálculo.



Gráfica 3. Estructura del variograma resultante.

Como puede identificarse en la Gráfica 3, el variograma presenta un centroide con información baja sobre la sección NE, y es apenas obvio esta situación tendencial, puesto que para el cálculo se emplearon también estaciones externas a la cuenca del Río Putumayo (Como Puerto Limón, Pepino), la razón está sustentada porque los polígonos de Thiessen sugieren conectividad estructural del comportamiento

meteorológico, que es evidente por la cercanía porcentual del factor de forma entre la Cuenca Alta del Río Putumayo y la Zona Hidrográfica del Río Caquetá Alto.

5.3.1. Interoperabilidad de los cálculos informáticos. El campo de precipitación promedio multianual en la región de estudio es empleado para la estimación de caudales medios y extremos en las diferentes sub-cuencas de análisis que se delimiten en la hoya hidrográfica.

La obtención de un campo de precipitación no es trivial, pues en la mayoría de los casos se requiere de la interpolación espacial de datos puntuales de precipitación medidos en estaciones climatológicas, las cuales no siempre se encuentran en la cantidad necesaria y localizadas adecuadamente, de forma tal que no siempre es posible representar correctamente la variabilidad espacial de la precipitación promedio multianual en diferentes escalas espaciales, pero para el caso se tiene un factor de correlación de más del 76%, factor que no debe ser confundido como índice de confianza²³.

- El cálculo del mapa promedio anual de temperatura superficial del aire (T en °C) fue realizado utilizando la siguiente relación con la altura (H en m sobre el nivel del mar):

$$T = 29.42 - 0.0061H$$

- Para el caso del mapa de evapotranspiración real promedio anual (ETR en mm/año) se obtuvo empleando el método de **Turc**, el cual se describe a continuación:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad \text{Si} \quad P/L > 0.316.$$

$$ETR = P \quad \text{Si} \quad P/L < 0.316$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

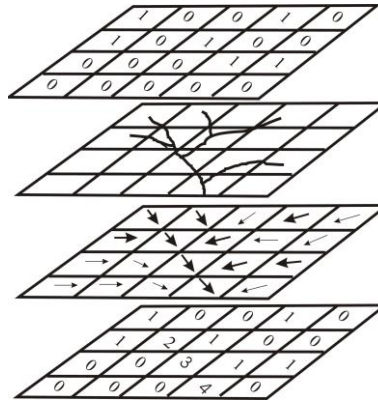
Donde, P es la precipitación media multianual (mm/año) y T la temperatura promedio anual (°C).

Como se puede apreciar en las ecuaciones previas, para obtener el mapa de Evapotranspiración Real es necesario saber si la relación P/L es mayor o menor que 0.316.

- Modelo de acumulación o agregación de flujo

²³ Manual de usuario HidroSIG, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, 2011

El procedimiento consiste en sumar una variable discretizada en el espacio (precipitación, evaporación, caudales de demanda, etc.), según el mapa de direcciones de drenaje. Este procedimiento se esquematiza en la Gráfica 4, donde se muestran en orden descendente: el mapa de la variable discretizada a agregar, el mapa que representa la red de drenaje, el mapa de direcciones de drenaje y el mapa de la variable agregada (mapa resultado).



Gráfica 4. Proceso de agregación de variables siguiendo la estructura de la red de drenaje

- Caudales medios: el método del balance hidrológico de largo plazo

Para la estimación de caudales medios se utilizó el método del balance hidrológico a largo plazo, donde se supone que en un período de tiempo largo (décadas) el almacenamiento en el suelo y en la atmósfera es despreciable. El caudal medio en una cuenca se calcula como:

$$Caudal\ Medio = \int_{\text{ÁreaCuenca}} [P(x, y) - E(x, y)] dA$$

Donde, $P(x, y)$ es la precipitación que recibe el punto (x, y) en el período considerado, $E(x, y)$ es la lámina de agua que se pierde por evapotranspiración en el punto (x, y) en el mismo período, y dA es un diferencial de área de la cuenca.

Esta ecuación se soluciona de forma discreta en los píxeles al interior de la cuenca, es decir se calcula la producción media de escorrentía que se produce en cada píxel del mapa que representa la región, y luego se suma el resultado según el procedimiento de agregación de variables y se obtiene el mapa de caudales medios.

- Caudales extremos: el método de análisis de frecuencia de eventos extremos.

Los caudales extremos (mínimos o máximos) en una cuenca hidrográfica para diferentes períodos de retorno, se calcularon mediante la ecuación

$$Q_{Tr} = \mu + K_{Tr} \sigma$$

Donde, K es el factor de frecuencia que depende de la función de distribución de probabilidad de valores extremos elegida y del período de retorno Tr , μ es la media de los caudales extremos considerados (máximos o mínimos) y σ es la desviación estándar asociada al evento extremos considerado.

La media y la desviación estándar de los caudales máximos o mínimos dependen del área (A), la precipitación (P) y la evaporación (E), y pueden calcularse como:

$$\mu = c_{\mu} (\bar{P} - \bar{E})^{\phi_{\mu}} A^{\theta_{\mu}}$$
$$\sigma = c_{\sigma} (\bar{P} - \bar{E})^{\phi_{\sigma}} A^{\theta_{\sigma}}$$

Donde los parámetros c_{μ} , c_{σ} , ϕ_{μ} , ϕ_{σ} , θ_{μ} y θ_{σ} son parámetros regionalizados y diferentes para caudales máximos o para mínimos.

Entendido todo de esta forma, los resultados de la aplicación de los diferentes modelos de álgebra de mapas permitieron generar automáticamente 29 subcuencas para el área.

5.4. APLICACIÓN METODOLÓGICA EN HEC-RAS Y HEC-GEORAS.

La presente simulación se realizó mediante la aplicación de la fórmula de energía, adaptada desde la metodología de Choquehuanca, N 2012. para la “Evaluación de Riesgo de Inundaciones Basado Sobre GIS y Modelamiento Hidráulico (Hec-GeoRAS)”, ajustado a los modelos matemáticos dispuestos de “*HEC-RAS River Analysis System*”, del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos, 2010.

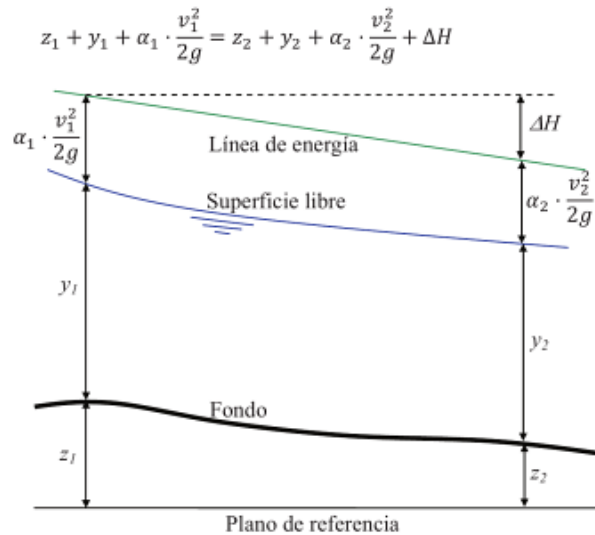
Para efectos asociados al cálculo de socavación se aplicó en HEC-RAS la función de transporte de *Ackers-White*, fusionada con el método de clasificación de *Exner 5* y método de caída de velocidad de *Ruby*, del mismo modo se realizó un rastreo numérico de los datos –reporte- software aplicando el criterio de *Lischtvan – Levediev* para socavación de fondo y estribos.

5.4.1. Modelo de Inundación (Balance de Energía). HEC-RAS resuelve el flujo gradualmente variado a partir de la ecuación de balance de energía (trinomio de Bernoulli) entre dos secciones dadas, excepto en los casos en los que se simule estructuras como puentes, vertederos o tramos cortos entubados (*culverts*). En tales casos HEC-RAS resuelve la ecuación de conservación de la cantidad de

movimiento, así como ciertas ecuaciones de carácter empírico establecidas *ad hoc* para estas estructuras²⁴.

- **Ecuación de Energía**

La ecuación básica para la estimación de la posición de la superficie libre del agua, en régimen permanente, es la ecuación de balance de energía, esto es, el Trinomio de Bernoulli. HEC-RAS considera el caso en que la pendiente longitudinal del río o canal es suficiente pequeña²⁵, como para poder aceptar que la vertical y la perpendicular en un punto cualquiera coincidan. Si la sección 1 es una sección aguas arriba de la 2, HEC-RAS considera el balance de energía entre ambas secciones transversales como siguiente distribución:



Gráfica 5. Representación de los términos de balance de energía. Fuente: (HEC 2014)

Donde:

- z_1 y z_2 son la cota de la sección respecto a un plano de referencia arbitrario. En caso de geometrías irregulares, como en general sucede en un río, se toma la cota del punto más bajo de la sección.
- y_1 y y_2 son los calados en cada una de las secciones consideradas. En caso de geometrías irregulares, la profundidad respecto del punto más bajo de la sección.

²⁴ Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable. Una visión a partir del modelo HEC-RAS

²⁵ En general HEC-RAS acepta como límite que el cauce del río forme, a lo sumo, una pendiente del 10%.

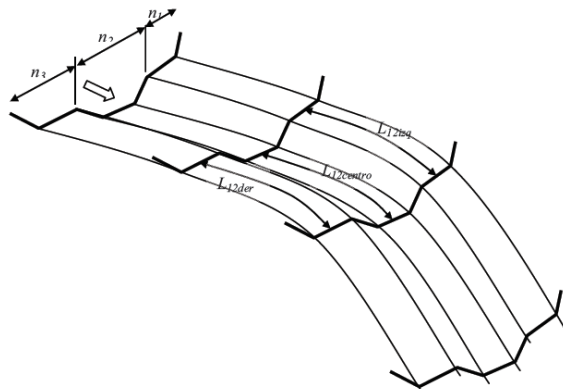
- v_1 y v_2 son las velocidades medias en cada sección. En el caso de régimen permanente se obtienen como el cociente entre el caudal y el área de la sección.
- α_1 y α_2 son los coeficientes de *Cirolis* estimados en cada sección, que permiten corregir el hecho de que la distribución de velocidad en la sección se aleja de una distribución uniforme.
- ΔH es el término que estima la energía por unidad de peso que se disipa entre las secciones 1 y 2. En concreto, dicha energía debe incluir las pérdidas continuas por rozamiento con el contorno, así como las pérdidas localizadas que se den entre ambas:

$$\Delta H = I \cdot L_{12} + AH_{local}$$

Las pérdidas continuas se determinan como el producto de la pendiente (I) por la distancia entre ambas secciones (L_{12}). Así es como a continuación se parametrizó el modelo de cálculo de HEC-RAS.

Como es sabido, la suma (1) de los tres términos, en cada miembro, representa la energía mecánica total por unidad de peso del flujo en cada sección, y tiene dimensiones de longitud. La suma de los términos de cota y presión constituye la energía piezométrica y, en su representación gráfica, la línea piezométrica, mientras que la suma de los tres términos define la energía mecánica total y, gráficamente, la línea de energía.

Si bien una de las hipótesis básicas es la unidimensionalidad del flujo, HEC-RAS permite representar la sección caracterizándola según las llanuras de inundación derecha (*right over bank*) e izquierda (*left over bank*), separadas ambas por el cauce principal (*main channel*). Así, cada una de dichas partes hay que describirla con su valor del coeficiente de Manning y su distancia a la sección inmediatamente aguas abajo.



Gráfica 6. División por defecto de las secciones en HEC-RAS. Fuente: (HEC 2002)

- **Pendiente motriz. Ecuación de Manning**

Se ha parametrizado HEC-RAS para cálculo de las pérdidas de carga continuas a partir de la fórmula de Manning:

$$I = \frac{n^2 \cdot v^2}{R_h^{4/3}}$$

Que ajustada al valor de caudal calculado en los diferentes tiempos de retorno se aplica:

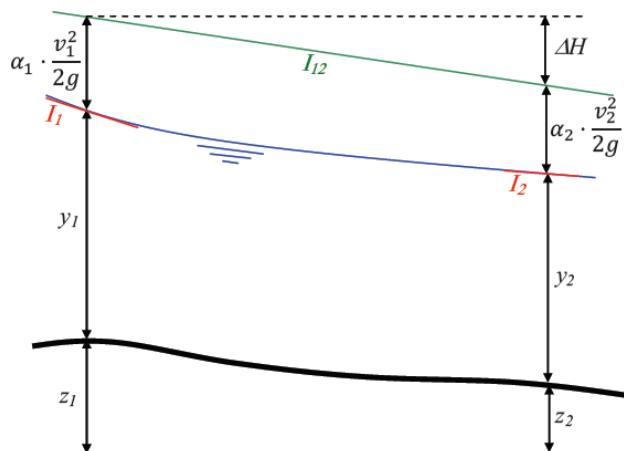
$$I = \frac{n^2}{R_h^{4/3}} \cdot \frac{Q^2}{A^2}$$

Del mismo modo se aplicó la función de transporte para Manning

$$I = \frac{Q^2}{K^2}$$

$$K = \frac{R_h^{4/3}}{n} \cdot A$$

Estas expresiones se obtienen a partir de los valores de calado y velocidad particularizados a una cierta sección. Es decir, corresponde a los valores puntuales en ella. En general, la resolución numérica del perfil de la superficie libre, ya sea a partir de HEC-RAS o de cualquier otro modelo, se establece a partir de la hipótesis de que la energía que se disipa entre dos secciones se puede estimar a partir de las respectivas pendientes motrices.



Gráfica 7. Interpretación de la pendiente motriz en cada sección.

5.4.2. Simulación y espacialización de las áreas de inundación probables para el área de estudio. Es necesario un DEM en formato vectorial TIN (Triangulated Irregular Network) lo más detallado posible. Este modelo puede generarse con la extensión 3d Analyst a partir de un fichero .dbf (dbase) de puntos acotados o a partir de un fichero de Cad de curvas de nivel en cualquier formato (dxf o dwg). En nuestro caso usaremos como insumo la imagen SRTMv3.

De este TIN se extrae en la etapa del preproceso la línea del cauce, se definen los márgenes, se hacen los centroides de las zonas por donde preveamos que circula el flujo de agua, se proyectan las secciones transversales se añade la topología y elevación al cauce, se añade topología y elevación a las secciones transversales y se genera el archivo de importación a HEC-RAS.

En la etapa de modelización del flujo, se importa el archivo de geometría generado en el preproceso, Los resultados del estudio hidrológico son incluidos para que el modelo HEC-RAS calcule seis perfiles de flujo de los seis caudales, correspondientes a los períodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años, el coeficiente de rugosidad en el fondo y laderas del cauce se ha estimado 0.05 y para el cauce de 0.028 el cual se considera adecuado ya que se trata de una estimación conservadora, presentando mayor resistencia al flujo y permitiendo obtener niveles mayores de flujo, los coeficientes de expansión y contracción hidráulica empleados en el estudio se corresponden con los propuestos por el modelo, que son 0.1 y 0.3 respectivamente, el modelo HEC-RAS permite realizar una ejecución de los perfiles de flujo mixto, que incluye y combina los resultados del perfil supercrítico y del perfil subcrítico.

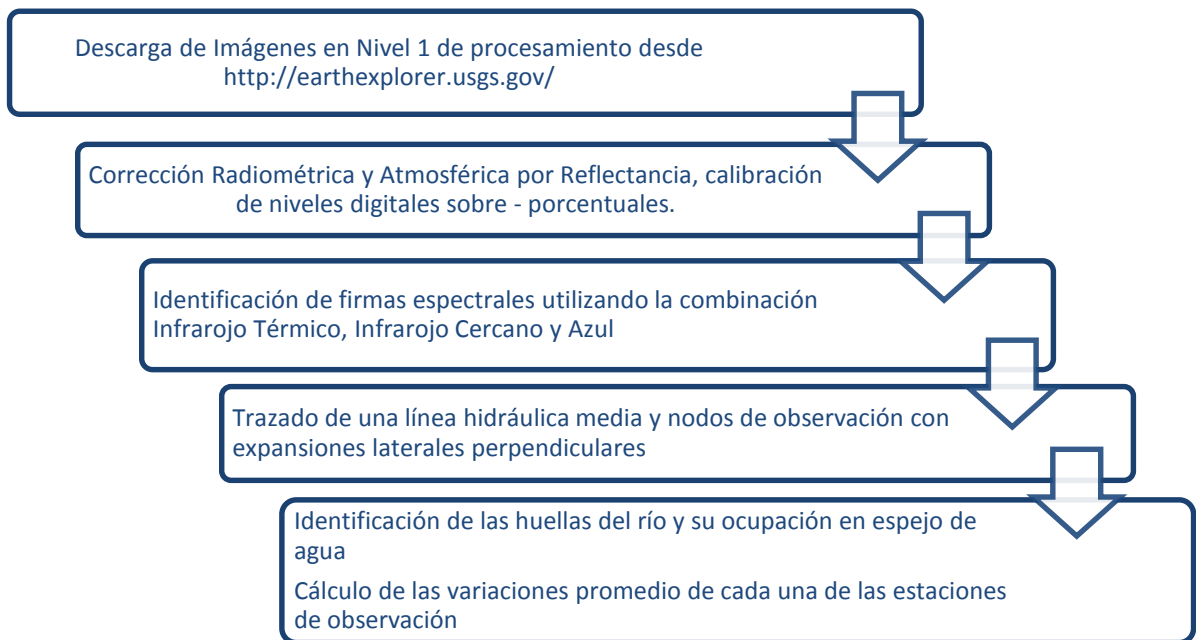
El modelo hidráulico requiere adicionalmente de unas condiciones de borde y de unas condiciones iniciales, ya que se trata de un esquema de solución por diferencias finitas. En el caso de los perfiles mixtos se considera que el flujo está en condiciones normales, tanto para la sección aguas abajo, en el caso del perfil de flujo subcrítico, como para la sección aguas arriba, en el caso del perfil supercrítico, el modelo HEC-RAS necesita la pendiente del cauce para la estimación de la condición de flujo inicial, como los resultados del modelo se obtienen en diferentes tablas donde se describe para cada sección transversal las principales características del flujo, siendo las que presentan mayor interés para este estudio los niveles de flujo, la velocidad del flujo y las condiciones del flujo crítico, que indican el tipo de régimen de flujo que se presenta en el tramo de río estudiado y, generación del archivo de exportación para ArcGIS.

En el Postproceso, con HEC-Geo RAS en ArcGIS, se generan los resultados finales de superficies de inundación para cada período de retorno, grids de profundidad, visualización 3d. (Manual Básico de HEC-GeoRAS 10 (3ª edición) 2013

5.5. ESTUDIO DE DINÁMICA FLUVIAL

El énfasis de éste aparte del documento fue realizado a partir de la aplicación de una de las tecnologías más recientes para conocer el espacio geográfico de cualquier superficie del planeta. Se planteó el uso de la Teledetección como técnica para identificar la dinámica fluvial del Río Putumayo siendo la más viable y seguro. Al implementar el sensoriamente remoto en el tramo 8 Km aguas arriba y 3 Km aguas abajo del municipio de Puerto Caicedo, con éste modelo se identificará los lugares por donde el cauce del río ha transitado y con los resultados encontrados se esperará en qué lugar del municipio se deberán localizar las medidas de reducción y mitigación del riesgo.

La metodología a empleada consiste en la colección, procesamiento, interpretación, y postprocesamiento de imágenes producto del sensor remoto Landsat, en sus versiones 5, 7 y 8. En el Gráfica 8 se describe el modelo lógico empleado para clasificar las imágenes de satélite empleadas para el análisis multitemporal de dinámica fluvial.



Gráfica 8. Metodología General del Análisis de cambio fluvial

5.5.1. Imágenes utilizadas. Las imágenes utilizadas para el presente informe son de carácter gratuito, obtenidas desde el sitio web del Servicio Geológico de los Estados Unidos – USGS.

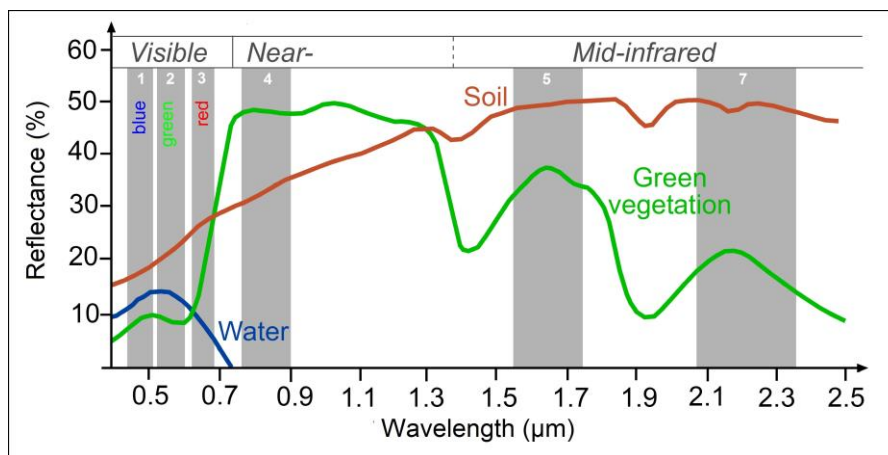
Nombre del Tile	Tipo de sensor	Fecha de captura	Resolución espacial	Resolución espectral	Resolución con <i>pan sharpen</i>
LT50090601999175CPE03	Landsat 5	17/may/1999	30 m	RGB, IRC	30 m
LE70090602002287EDC00	Landsat 7	28/jul/2015	30 m	7 B	15 m
LE70090592003050EDC00	Landsat 7	30/may/2003	30 m	7 B	15 m
LE70090592004341ASN00	Landsat 7	03/abr/2004	30 m	7 B	15 m
LE70090592005055ASN00	Landsat 7	05/may/2005	30 m	7 B	15 m
LE70090602006298ASN00	Landsat 7	29/ago/2006	30 m	7 B	15 m
LE70090602009306EDC01	Landsat 7	30/jun/2009	30 m	7 B	15 m
LE70090592010261ASN00	Landsat 7	26/ene/2010	30 m	7 B	15 m
LE70090592011232ASN00	Landsat 7	23/feb/2011	30 m	7 B	15 m
LC80090602013245LGN00	Landsat 8	24/may/2013	30 m	8 B	15 m
LC80090602014216LGN00	Landsat 8	21/jun/2014	30 m	8 B	15 m
LC80090602015251LGN00	Landsat 8	25/ene/2015	30 m	8 B	15 m

Tabla 2. Compendio de imágenes de satélite empleadas para el análisis

En relación a la Tabla 2, se identifica que existe un modelo de evaluación de cambios para un periodo de 16 años, contados desde el año 1999 hasta el presente, adicionalmente que se adquirió una imagen del sector con una unidad aérea no tripulada para el día 11 de junio de 2015.

De las imágenes anteriores se requirió realizar procesamientos adicionales para el caso del sensor Landsat en los productos del 2003 a 2011, puesto que las imágenes obtenidas en ese lapso de tiempo presentan errores por destemporización del registro, lo que ha generado los llamados “gaps” o lineamientos oscuros de la imagen.

5.5.2. Colección de firmas espectrales. Haciendo uso del software ENVI y teniendo imágenes en valores de reflectancia se pasó a identificar las coberturas de entrenamiento para el análisis multivariado de cambio.



Gráfica 9. Modelo espectral utilizado para identificación de coberturas²⁶

²⁶ http://www.seos-project.eu/modules/classification/images/spectral_signatures_landsat.jpg

6. RESULTADOS

6.1. DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

6.1.1. Modelo Hidrológico. Como se mencionó en la metodología, para el cálculo del caudal máximo del área de estudio se dividió ésta en 29 secciones logarítmicas, estas secciones representan el conjunto de sub-cuencas de análisis de caudales medios, máximos y el factor de desviación estadística para ajuste del radio hiperbólico.

En éste acápite se representará de manera gráfica, numérica y espacial los diferentes datos obtenidos para cada una de las cuencas de estudio; para los cuales se obtuvo caudales distribuidos en 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Como uno de los productos especiales y sumamente útiles para la planificación del uso de las aguas y la definición de medidas estructurales y no estructurales de gestión del riesgo, se generó las fórmulas características de las cuencas, teniendo en cuenta el modelo de análisis de componentes principales.

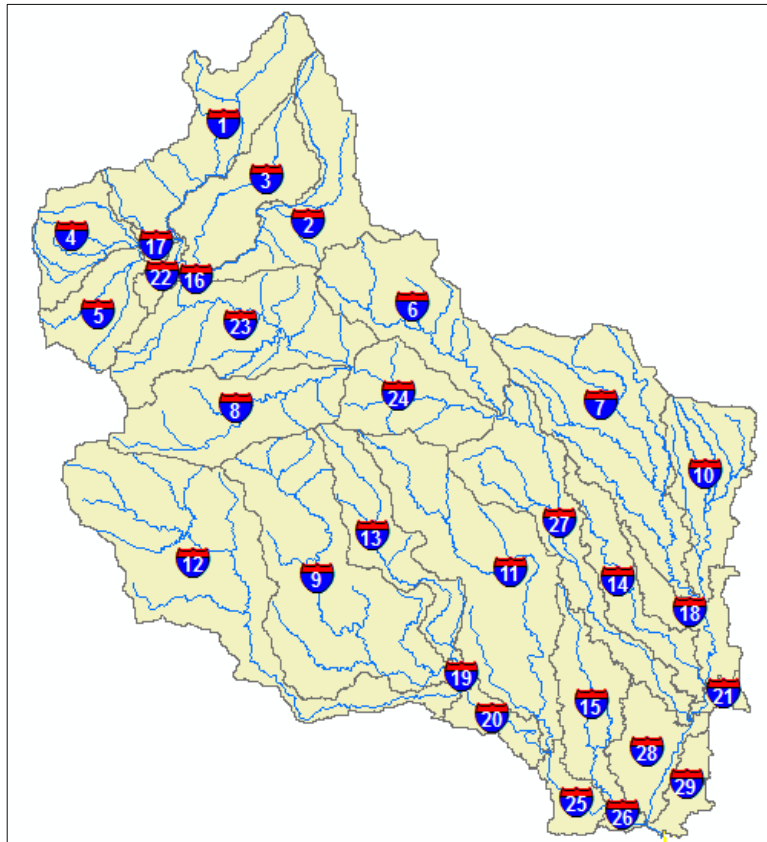
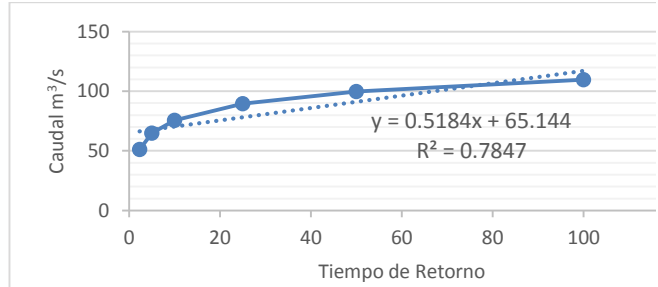


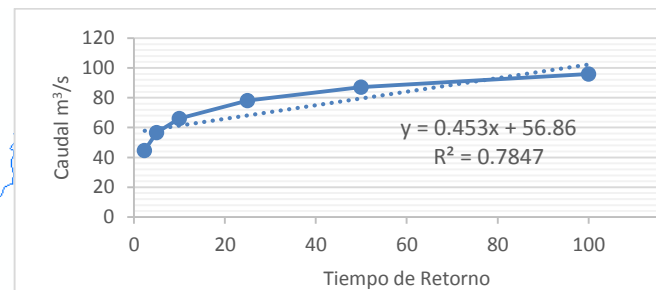
Figura 5. Modelo de espacialización de las subcuencas del área de cálculo hidrológico.

Subcuenca (2) – río San Francisco / Quebrada Solterayaco



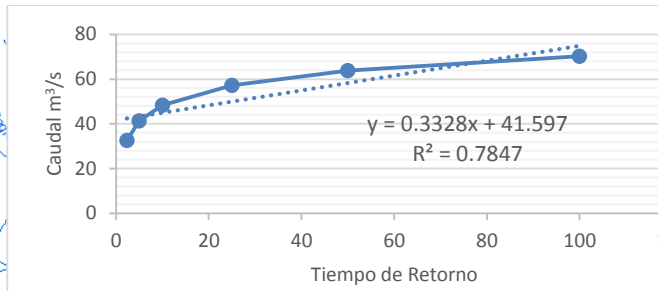
Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	51.386	18.618	51.157
5			64.79
10			75.688
25			89.457
50			99.672
100			109.811

Subcuenca (3) – Quebrada La Hidráulica



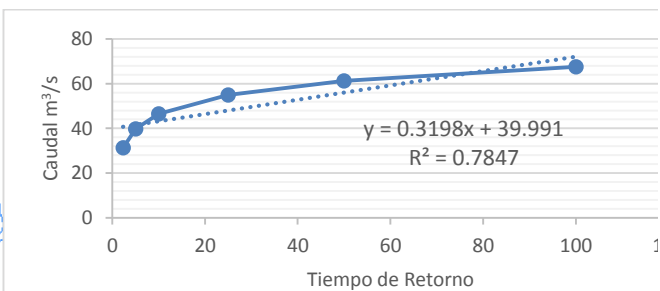
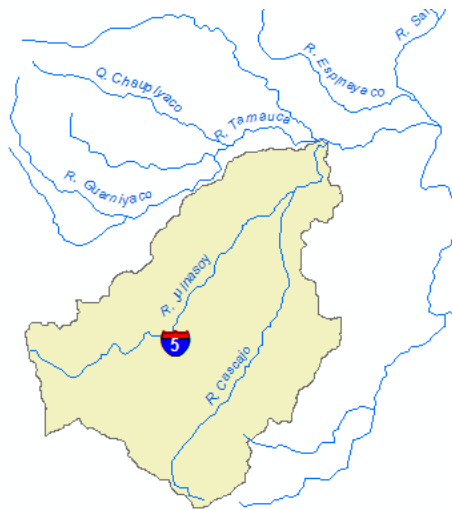
Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	44.836	16.27	44.636
5			56.55
10			66.073
25			78.106
50			87.033
100			95.893

Subcuenca (4) – río Tamauca



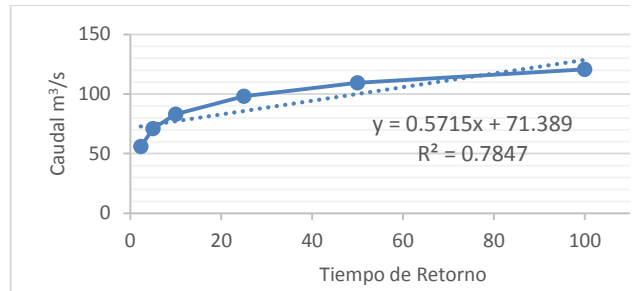
Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	32.765	11.951	32.618
5			41.369
10			48.365
25			57.203
50			63.761
100			70.269

Subcuenca (5) – río Jinsasoy / río Cascajo



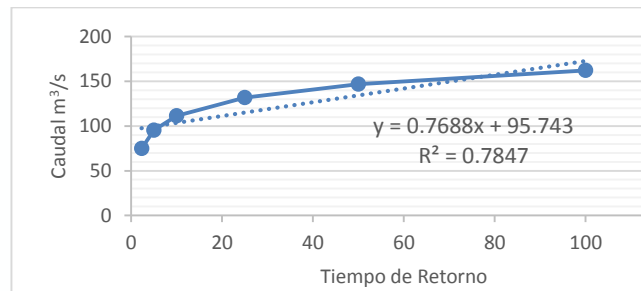
Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	31.504	11.486	31.362
5			39.773
10			46.496
25			54.99
50			61.292
100			67.547

Subcuenca (6) – río Blanco



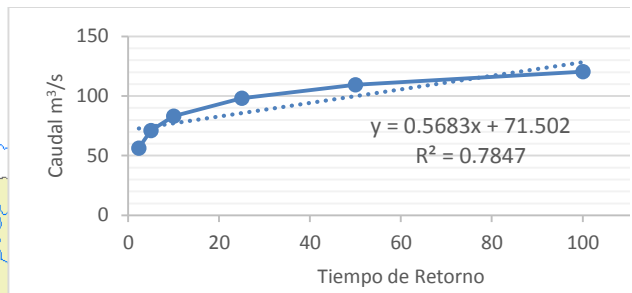
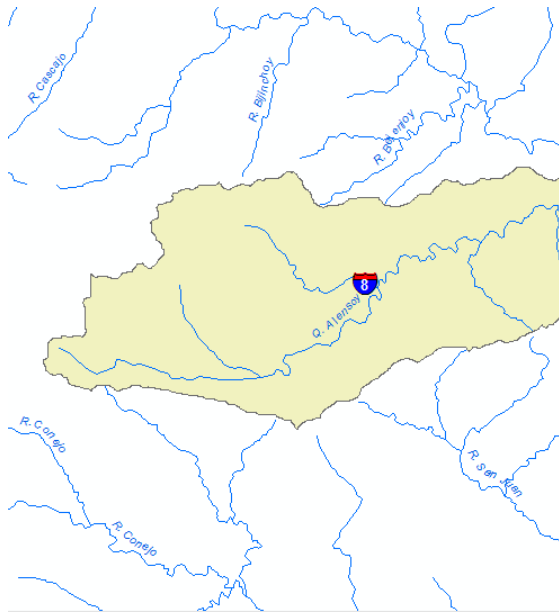
Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	56.233	20.523	55.971
5			70.999
10			83.011
25			98.19
50			109.45
100			120.627

Subcuenca (7) – río Guineo



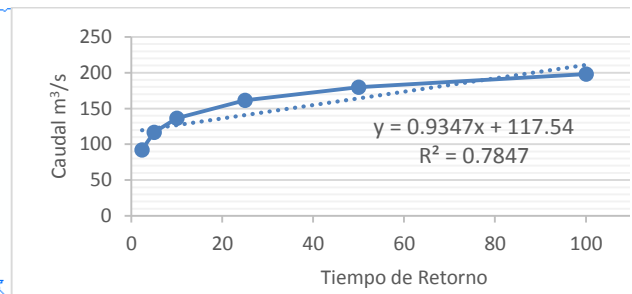
Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	75.388	27.611	74.999
5			95.217
10			111.379
25			131.799
50			146.948
100			161.985

Subcuenca (8) – Quebrada Alensoy



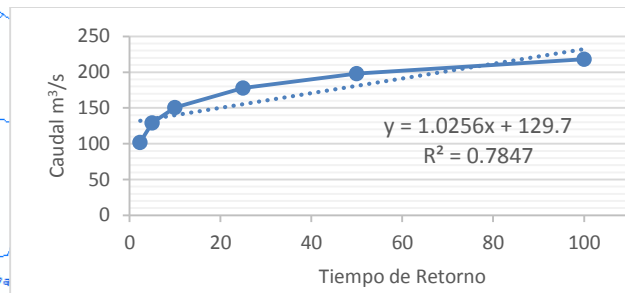
Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	56.42	20.409	56.169
5			71.114
10			83.06
25			98.154
50			109.352
100			120.467

Subcuenca (9) – río San Juan parte alta



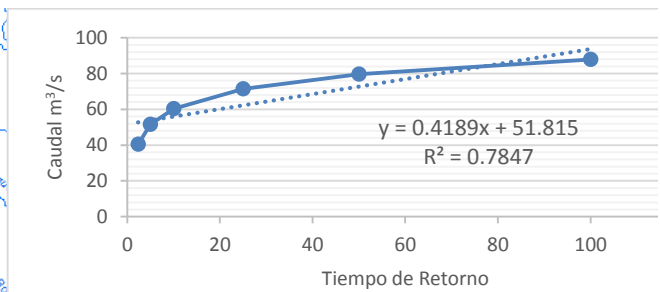
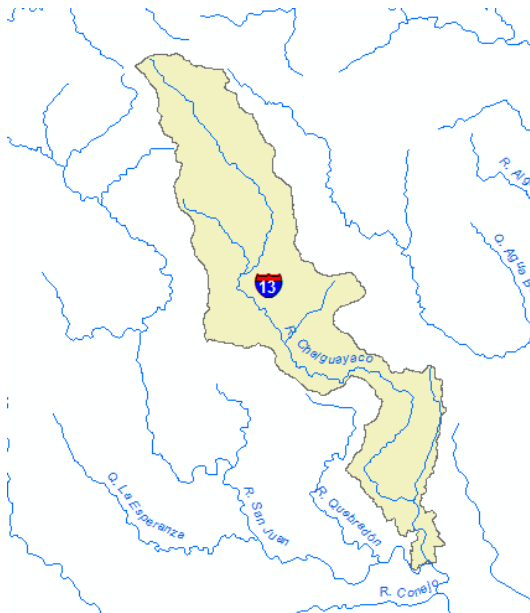
Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	92.731	33.568	92.318
5			116.898
10			136.546
25			161.372
50			179.789
100			198.07

Subcuenca (12) – río Conejo



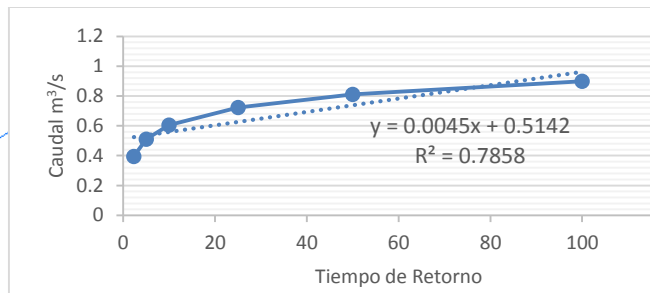
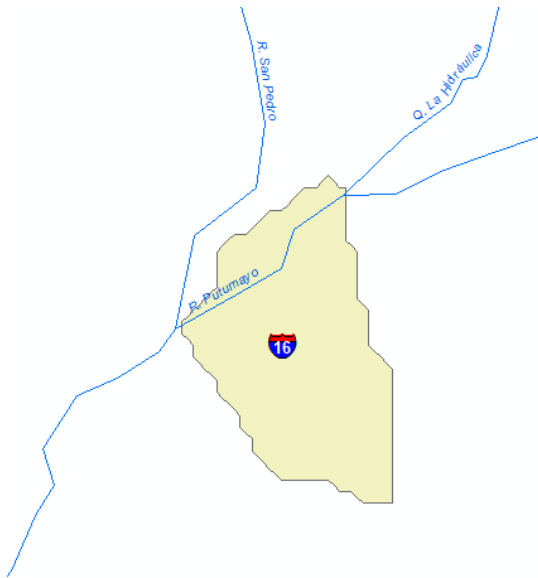
Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	102.487	36.83	102.034
5			129.003
10			150.561
25			177.8
50			198.007
100			218.065

Subcuenca (13) – río Chalguayaco



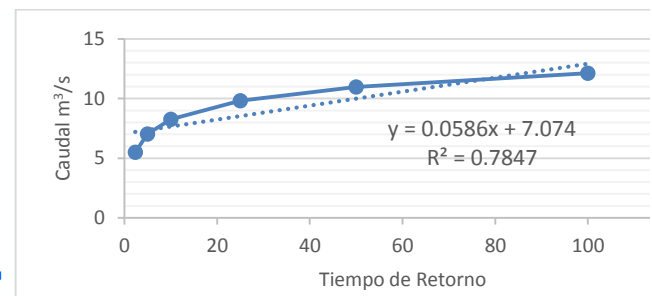
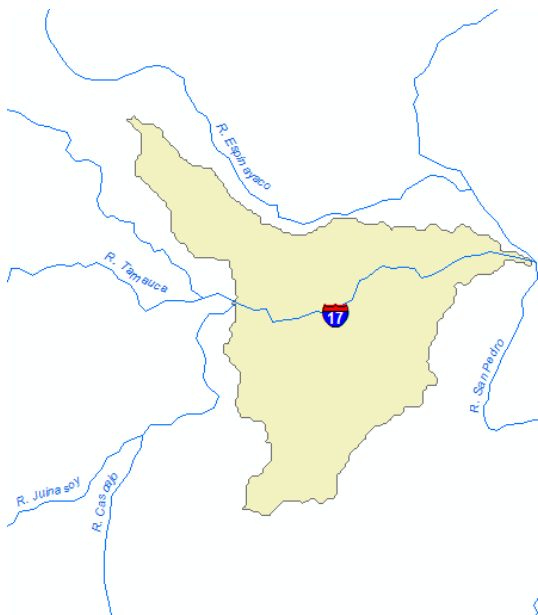
Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	40.698	15.043	40.513
5			51.529
10			60.334
25			71.46
50			79.714
100			87.906

Subcuenca (16) – Intercuenca Hidráulica / San Pedro / Putumayo



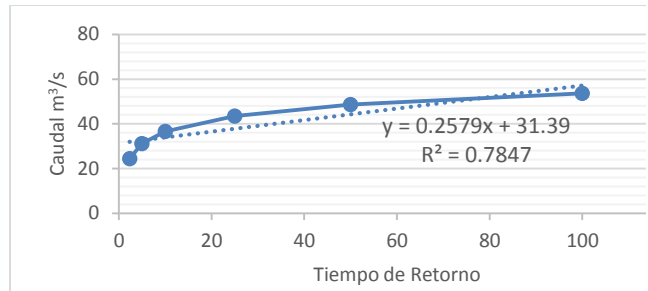
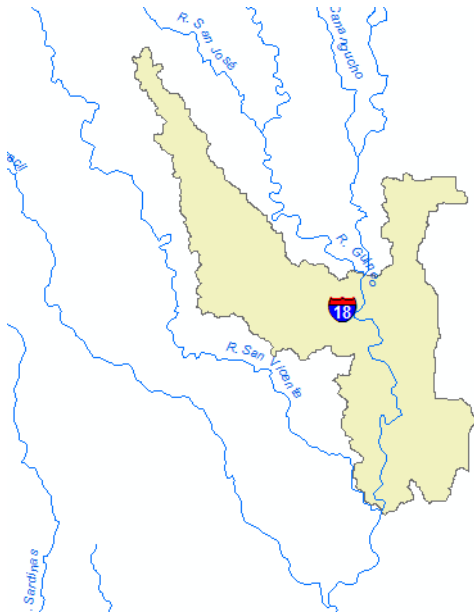
Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	0.386	0.161	0.394
5			0.511
10			0.605
25			0.724
50			0.812
100			0.9

Subcuenca (17) – río Tamauca (parte baja)



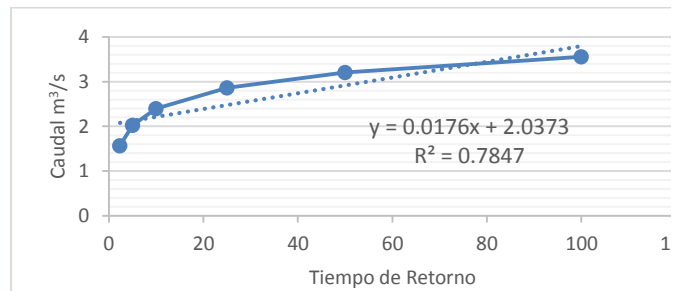
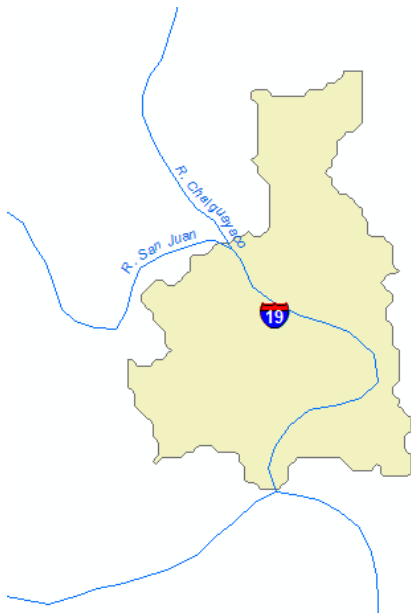
Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	5.52	2.103	5.494
5			7.034
10			8.265
25			9.82
50			10.974
100			12.119

Subcuenca 18 – Intercuenca río Guineo / río San Vicente



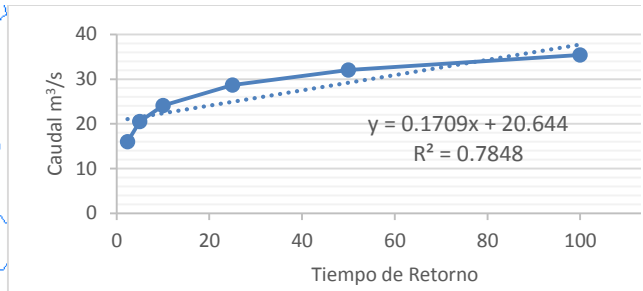
Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	24.546	9.262	24.432
5			31.214
10			36.635
25			43.485
50			48.567
100			53.611

Subcuenca (19) – Intercuenca río San Juan / río Conejo



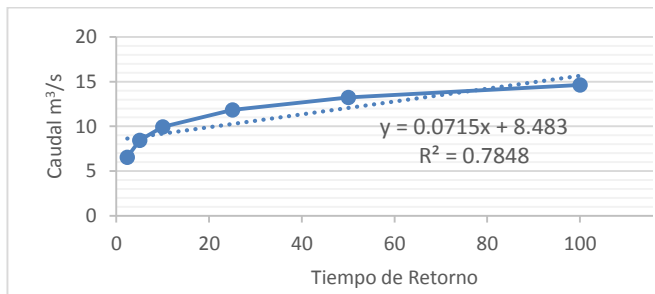
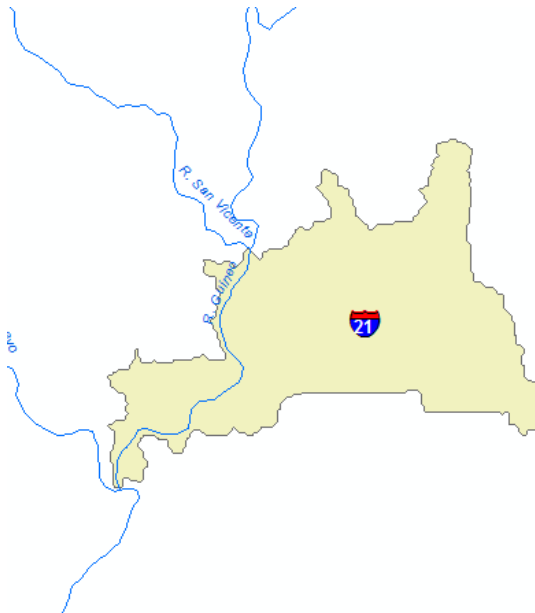
Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	1.571	0.631	1.563
5			2.025
10			2.395
25			2.862
50			3.208
100			3.552

Subcuenca (20) – Intercuenca río San Juan / río Vides



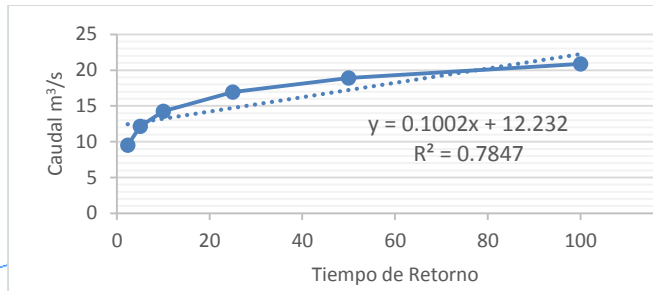
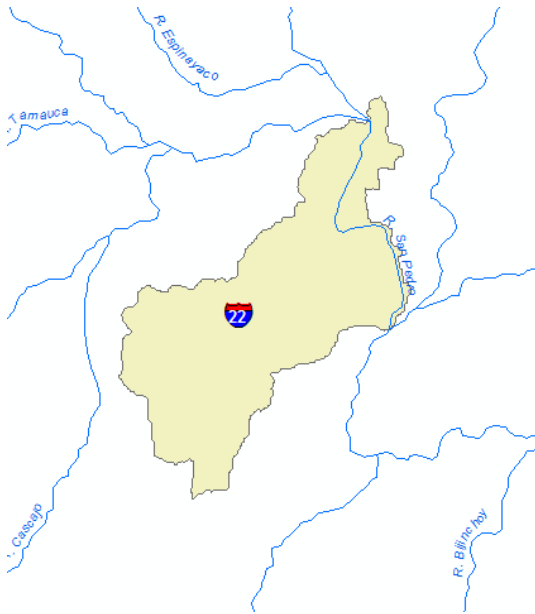
Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	16.108	6.137	16.033
5			20.527
10			24.119
25			28.657
50			32.025
100			35.367

Subcuenca (21) – Cuenca baja río Guineo



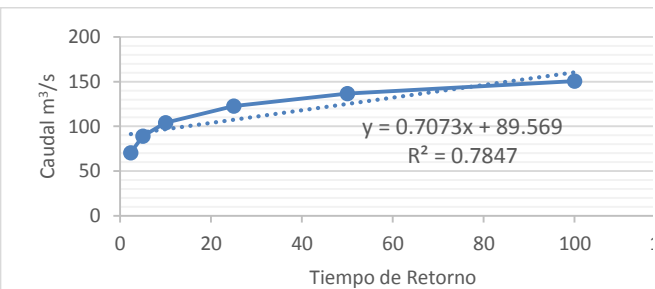
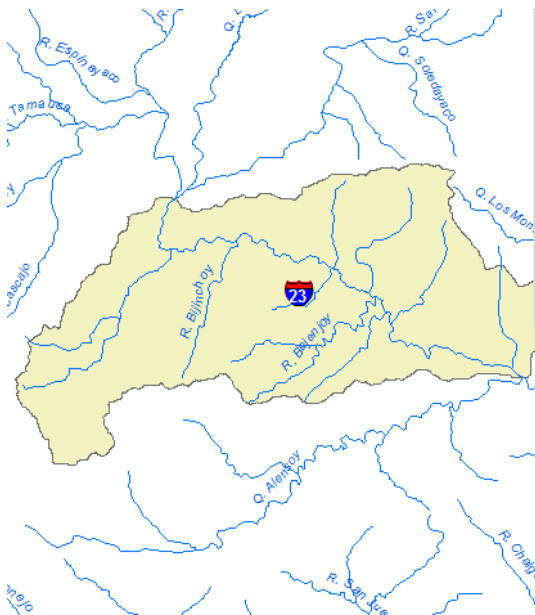
Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	6.585	2.569	6.553
5			8.434
10			9.938
25			11.838
50			13.248
100			14.647

Subcuenca (22) – Cuenca baja río San Pedro



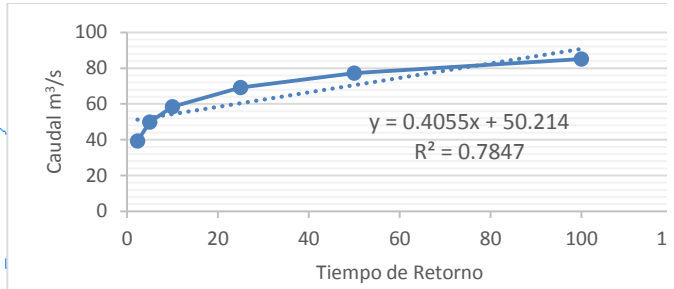
Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	9.575	3.597	9.53
5			12.164
10			14.269
25			16.929
50			18.903
100			20.861

Subcuenca (23) – río Bejenjoy / río Bijinchoy



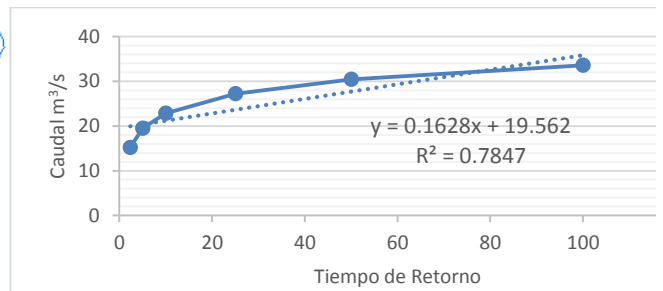
Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	70.799	25.4	70.487
5			89.086
10			103.954
25			122.739
50			136.675
100			150.509

Subcuenca (24) – Intercuenca río Putumayo / río Blanco / río Vides



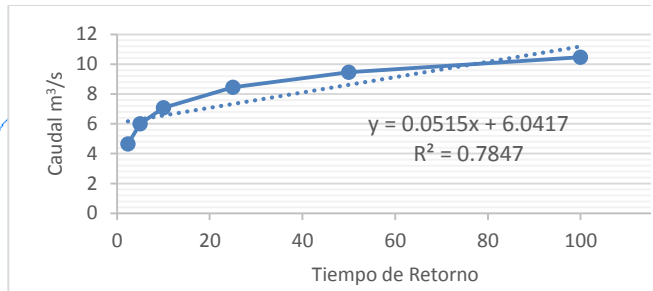
Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	39.453	14.561	39.274
5			49.937
10			58.46
25			69.229
50			77.219
100			85.149

Subcuenca (25) – río San Juan parte baja / Quebrada Sardinas



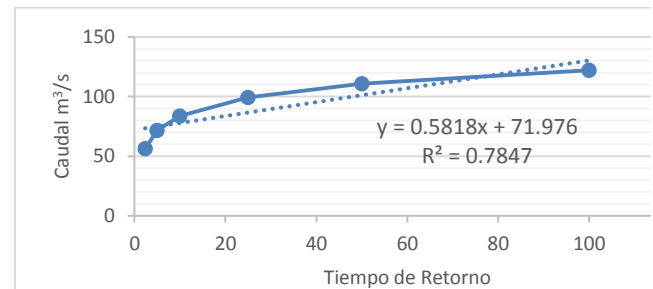
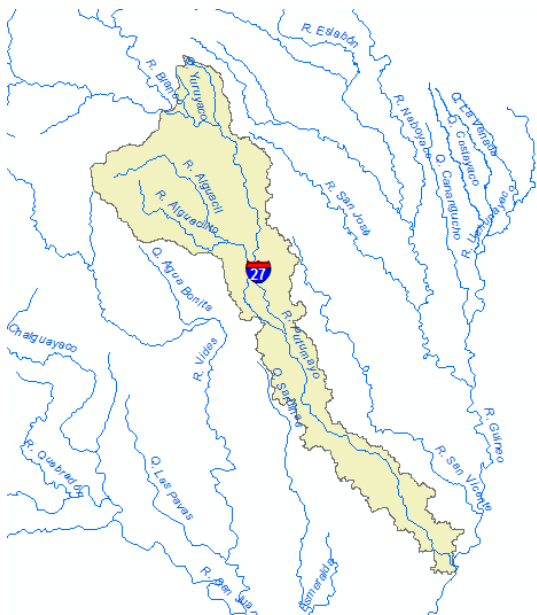
Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	15.241	5.847	15.169
5			19.451
10			22.873
25			27.197
50			30.405
100			33.589

Subcuenca (26) – Desembocadura río San Juan en río Putumayo



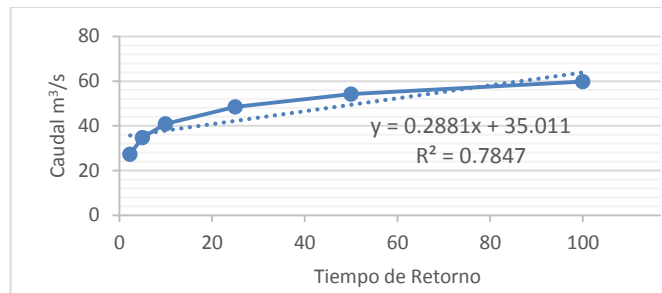
Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	4.676	1.848	4.653
5			6.007
10			7.088
25			8.455
50			9.469
100			10.475

Subcuenca (27) – río Alguacil / río Putumayo



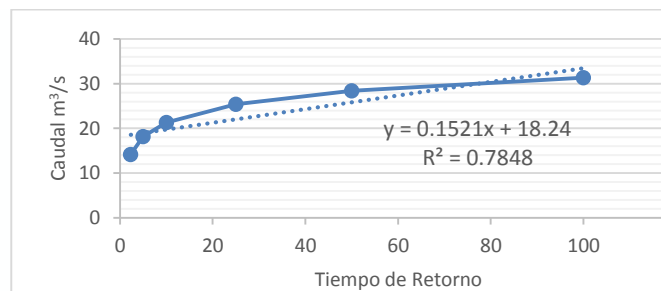
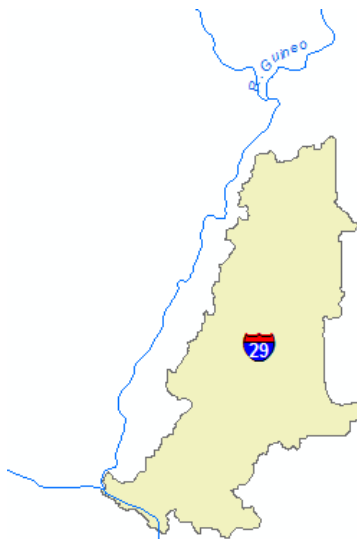
Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	56.535	20.894	56.278
5			71.578
10			83.808
25			99.261
50			110.725
100			122.104

Subcuenca (28) – Confluencia río Putumayo / río San Juan



Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	27.365	10.346	27.238
5			34.814
10			40.87
25			48.521
50			54.198
100			59.832

Subcuenca (29) – Quebrada El Achote



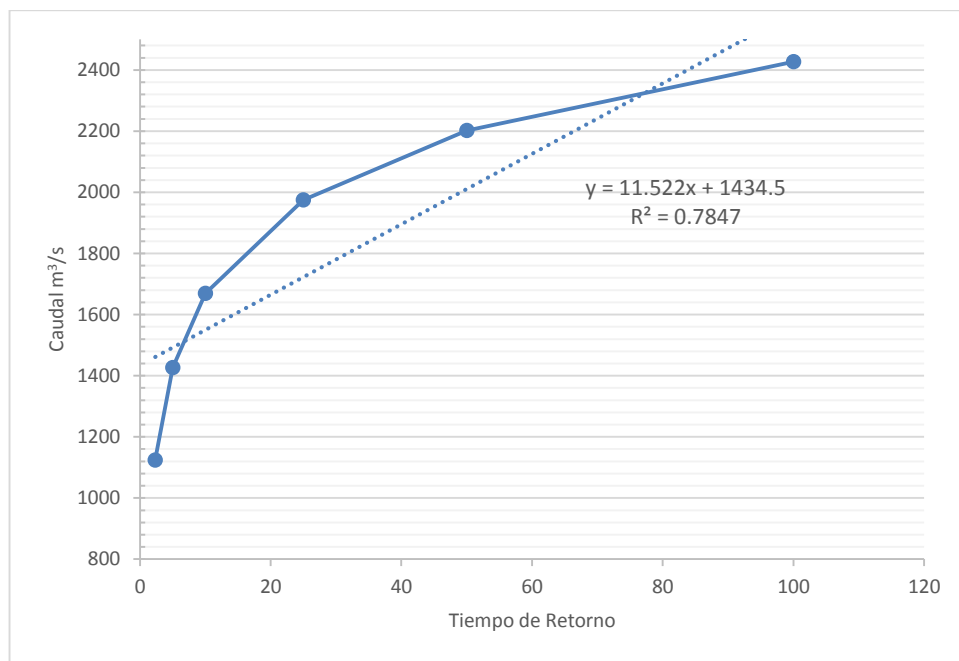
Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	14.203	5.463	14.136
5			18.136
10			21.334
25			25.374
50			28.372
100			31.347

Caudal Máximo del río Putumayo en el área de estudio.

Realizando la suma algebraica de los resultados consignados en los 29 numerales de las subcuencas se obtuvo que el río Putumayo; para un período de diseño de 100 años tendría un caudal de 2427.21 m³/s.

Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
2.33	1128.432	14.268	1123.673
5			1426.656
10			1668.844
25			1974.852
50			2201.874
100			2427.21

Tabla 3. Tabla de caudales calculados para el área de estudio.



Gráfica 11. Curva de distribución de caudales máximos para el área de estudio.

6.1.2. Modelo Hidráulico. Para la realización del modelo hidráulico a simular, se requiere de manera obligatoria contar con un modelo de elevaciones digital en estructura raster.

Para el caso que nos ocupa se emplea el levantamiento batimétrico realizado con nivel de precisión, el ajuste de triangulación del levantamiento fotogramétrico y se complementó para las áreas litorales con el DEM obtenido del SRTMv3 de la NASA.

Datos Generales del DEM

Triangulation Method: de la una y conforming

Number of Data Nodes: 487271
 Number of Data Triangles: 972444
 Z Range: (260.0, 320.5)

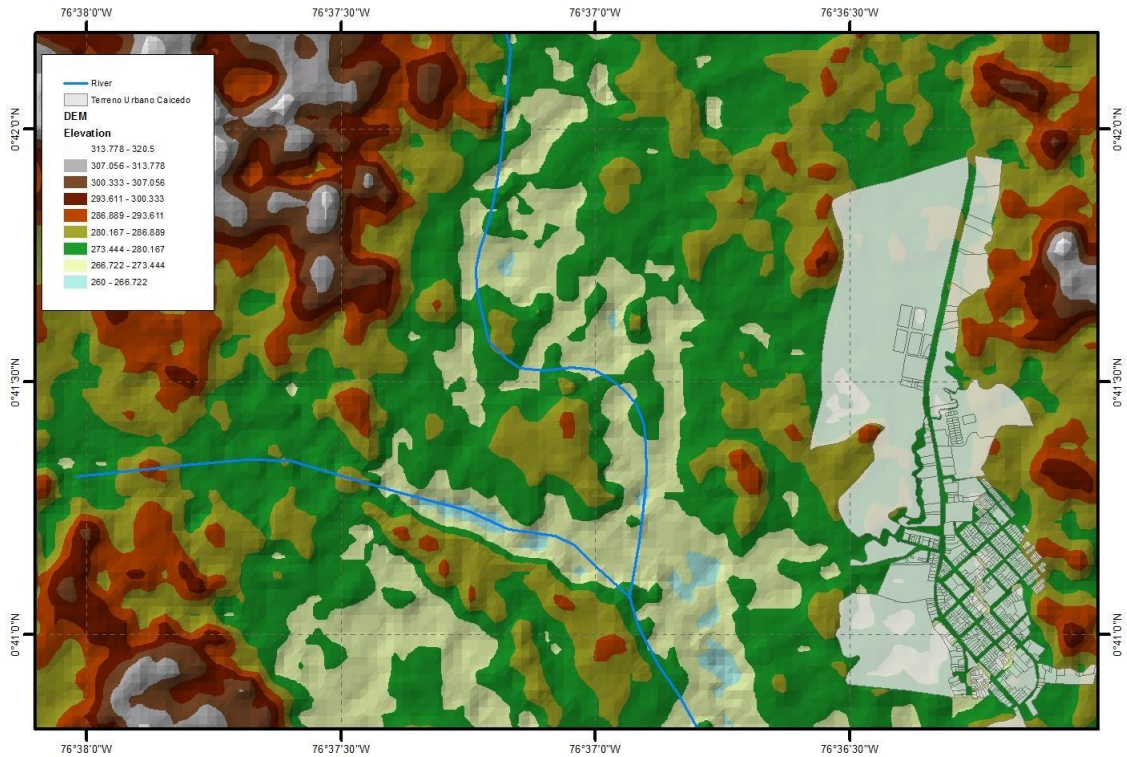


Figura 6. Modelo Digital de Elevaciones (DEM) del área de estudio

Digitalización de Hombros y Fondo del Talweg

Para la digitalización de las fronteras de la geometría del Talweg de los ríos se utilizó un control horizontal de 10 metros con pendiente no superior al 5% de los 180° (10m@±0.95,1.05-180°). Así las cosas se procedió a delimitar los hombros, dos laterales (izq. y der) para la sección hidráulica del nodo, más el fondo de la línea de energía hidráulica principal. Los datos geométricos del modelo son los siguientes:

Hidro_ID	Longitud (m)
Río Putumayo Alto	2492.65
Río San Juan	2150.15
Río Putumayo Aguas Abajo	642.25
Hombro Izquierdo Total	3121.54
Hombro derecho Total	2621.15
Hombro Izquierdo Medio	2382.54
Hombro Derecho Medio	2054.44

Tabla 4. Métricas del Talweg (Izq. Hombros, Der Cauces)

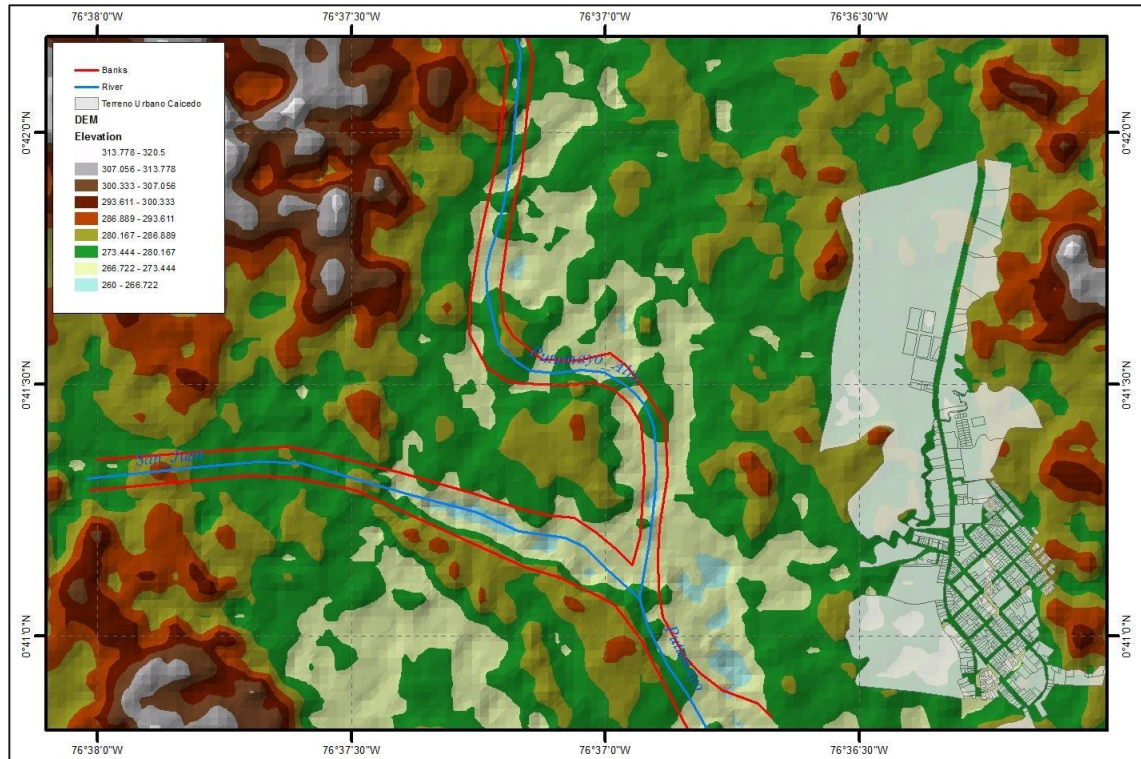


Figura 7. Localización de las geometrías del Talweg

Digitalización de Estaciones Transversales de análisis

Se digitalizó 18 estaciones transversales en total; al cauce denominado Putumayo Alto se le asignaron 11 unidades, con espaciamentos relativos entre los 85 y 110 metros en sentido del espejo de agua, para el caso del Río San Juan se asignaron 3 secciones, distanciadas cada una en 70 metros desde el punto de confluencia, para el caso del cauce resultante se asignaron 4 estaciones, distanciadas en 60 metros cada una, contada desde la confluencia en sentido aguas abajo. Las inclusiones horizontales insertadas no superan la tangente de 5° sobre los hombros, éste modelo de trazado permite que se tenga mayor cantidad de área de cobertura y los cálculos por motorización se ajustan entre cada una de las secciones.

La unidad de cobertura por superficie del *Folder* se estimó con distanciamentos remuestreados de 10.1 metros en promedio, alcanzando una cobertura general del área del 97.2%, del mismo modo, se digitalizó unidades de cauce principal de manera que manejase el ángulo de ataque remanente localizado en los diferentes productos de sensores remotos procesados con un período de 17 años.

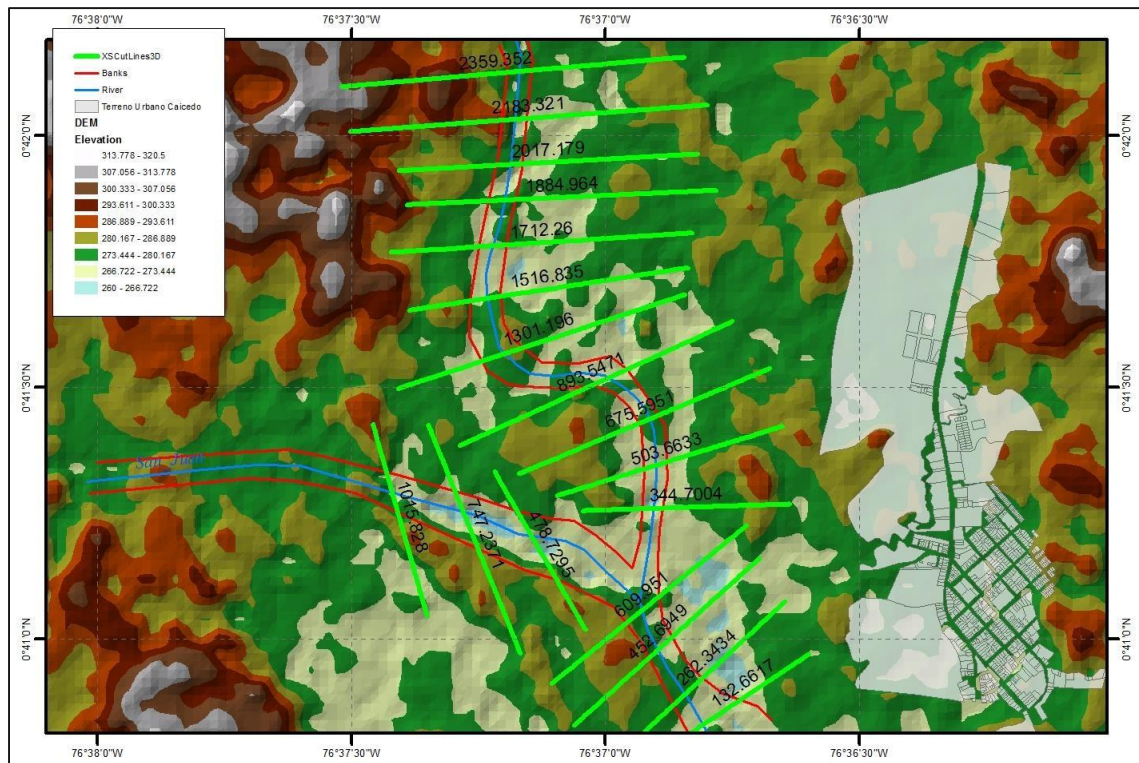


Figura 8. Distribución de estaciones transversales de análisis

Coeficientes de rugosidad

Para seleccionar las “n” de *Manning* se optó por homogenizar la información topográfica y estratigráfica del área de estudio. En los registros del estudio de gradación se constató que a lo largo del río la rugosidad del cauce y de las planicies de inundación se mantiene de forma similar, por lo que se decidió otorgar el mismo valor de “n” para todas las secciones. Según *Chow, V T. 1985*, valores de “n” para las planicies de inundación de 0.05 y para el cauce de 0.028. Así mismo se debe tener como elemento de consideración que el cauce maneja ese factor de rugosidad porque en la época de visita se identifica de manera clara que se encuentra afectado por un proceso de sedimentación ligera, el cual hace que se formen depósitos que actúan como freno para el flujo del agua (*contracción hidráulica*).

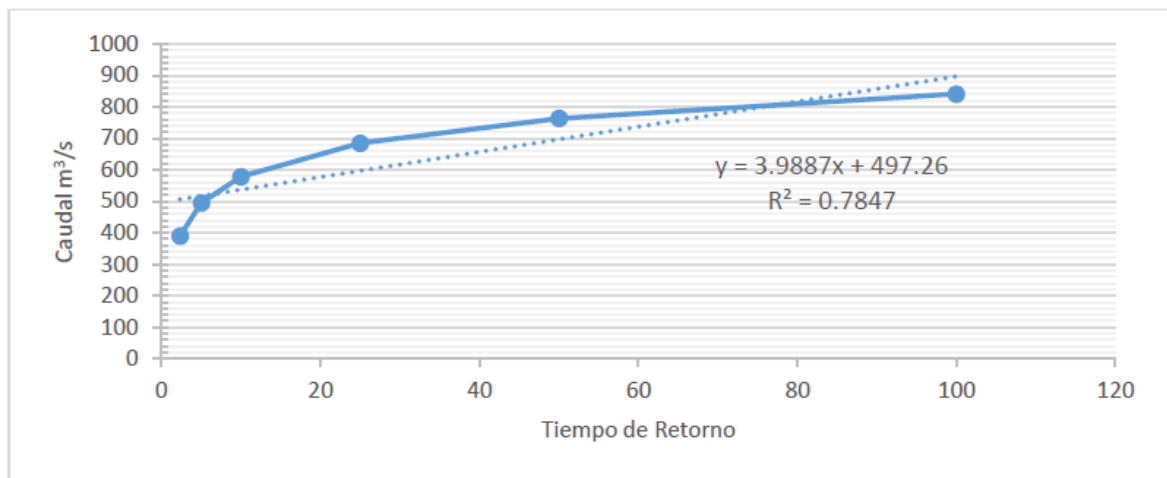
Caudales

Para el ajuste de flujo mixto (permanente-subcrítico) del área a simular se tomó como referencia los resultados del estudio hidrológico realizado en el numeral principal anterior. Sin embargo, como se pudo notar en el numeral 4.2, se realizaron cálculos a nivel de subcuenca para obtener el dato definitivo del caudal de entrega, esto obligo a dividir la sección hidráulica de análisis en 3 vectores;

el primero al conjunto de subcuencas que componen el nivel subsiguiente hidrográfico del Río San Juan, el segundo bajo el mismo criterio, pero ésta ocasión ajustado al Río Putumayo Alto, denominado así por encontrarse antes de la zona de desembocadura del río San Juan, y un tercer vector correspondiente a la suma de la magnitud de las dos anteriores corrientes. De modo que los caudales ingresados al software de simulación fueron los siguientes:

ID	Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
San Juan (9-11-12- 13-15-20- 25-26)	2.33	391.025	17.9055	389.643
	5			494.535
	10			578.378
	25			684.317
	50			762.91
	100			840.92

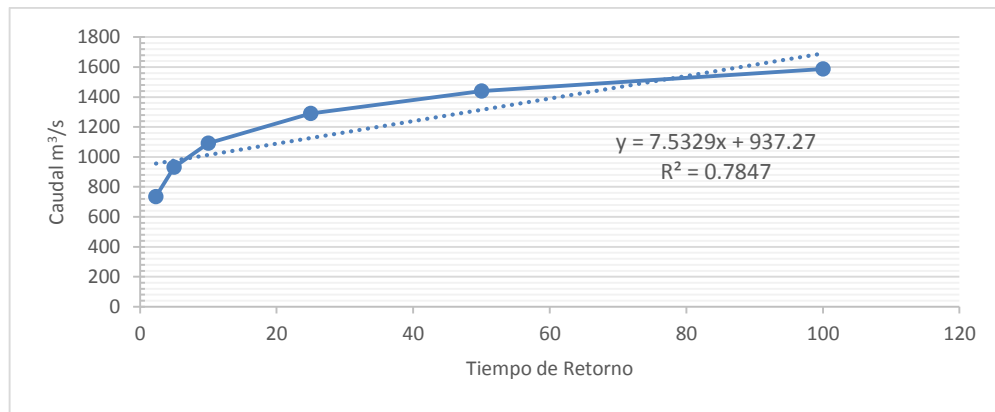
Tabla 5. Caudal resultante para la cuenca del Río San Juan



Gráfica 12. Curva de distribución de caudales máximos cuenca del Río San Juan

ID	Tr	Q-Media	Q-Desv	QMáx
Putumayo Alto	2.33	723.204	9.865	734.03
	5			932.121
	10			1090.466
	25			1290.535
	50			1438.964
	100			1586.29

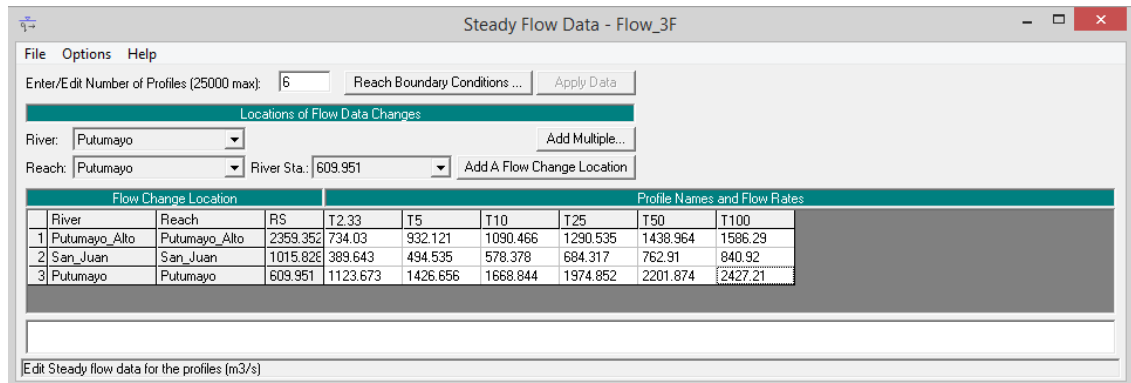
Tabla 6. Caudal resultante para la cuenca del Río Putumayo Alto



Gráfica 13. Curva de distribución de caudales máximos cuenca del Río Putumayo Alto

Para el caso del caudal resultante se utilizó los caudales aritméticos de suma de las fuentes anteriormente perfiladas, lo que es equivalente a los registros dispuestos en la Tabla 5 y Gráfica 12.

Así de este modo de ingresaron los caudales al módulo de flujo de HEC-RAS, como aparece en la Gráfica 13.



Gráfica 14. Asociación de caudales y períodos de retorno para las fuentes

Reportes de la simulación

Los resultados de simulación del presente estudio se han compilado de manera gráfica y numérica por cada una de las secciones transversales de análisis del proyecto, esto con la finalidad de proveer de los datos de análisis necesarios para el diseño de la medida estructural que se plantee como estrategia de mitigación y reducción de la amenaza por riesgo natural.

Modelación de régimen subcrítico

Se simuló el comportamiento de las secciones en planta para el modelo hidráulico definido. Se pretende facilitar en estos reportes gráficos analizar el comportamiento hidráulico de un canal que, por sus características geométricas y las condiciones de contorno que se impondrán, funcionará enteramente en régimen lento, o que en alguna de sus particularidades, tenga características de flujo supercrítico.

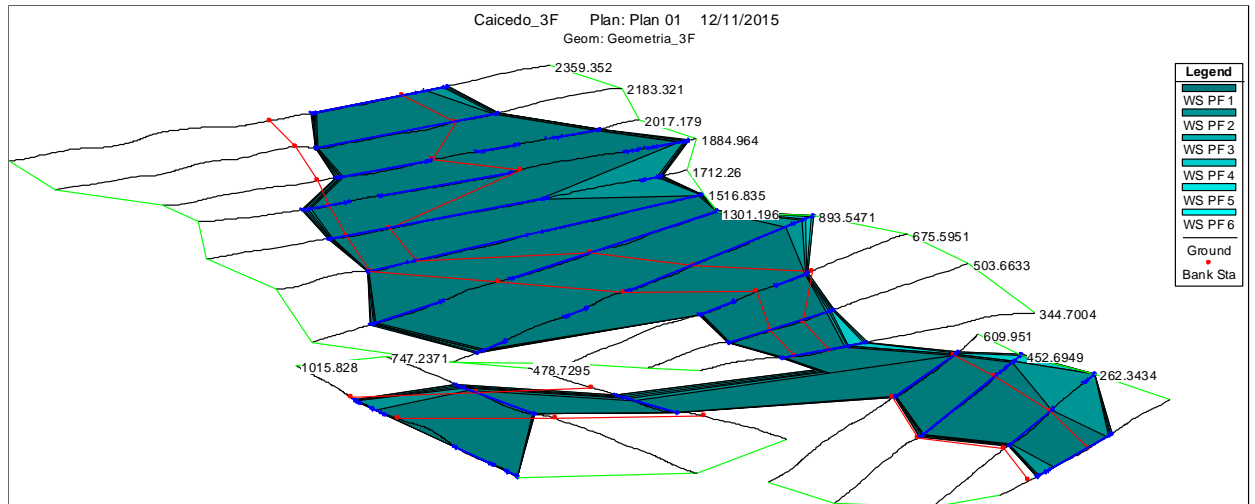


Figura 9. Modelo Multianual de inundación del área de estudio

Modelo de inundación

Para identificar las áreas susceptibles a ser inundables, se modelizó la red de drenajes con estado de disipación natural por laderas, ajustados a los cocientes de rugosidad y capacidad de gradación. La simulación da como resultado que para períodos máximos > 25 años con un caudal extremo inicial de 1974 m³/s se presenta efectos de desborde sobre el río, lo cual indica la susceptibilidad a una amenaza por inundación. Para efectos del informe se generó las salidas gráficas y numéricas del modelo de simulación por cada sección para un tiempo de retorno de 100 años, haciendo de éste modo compatible los resultados con la naturaleza de la obra a diseñar y construir.

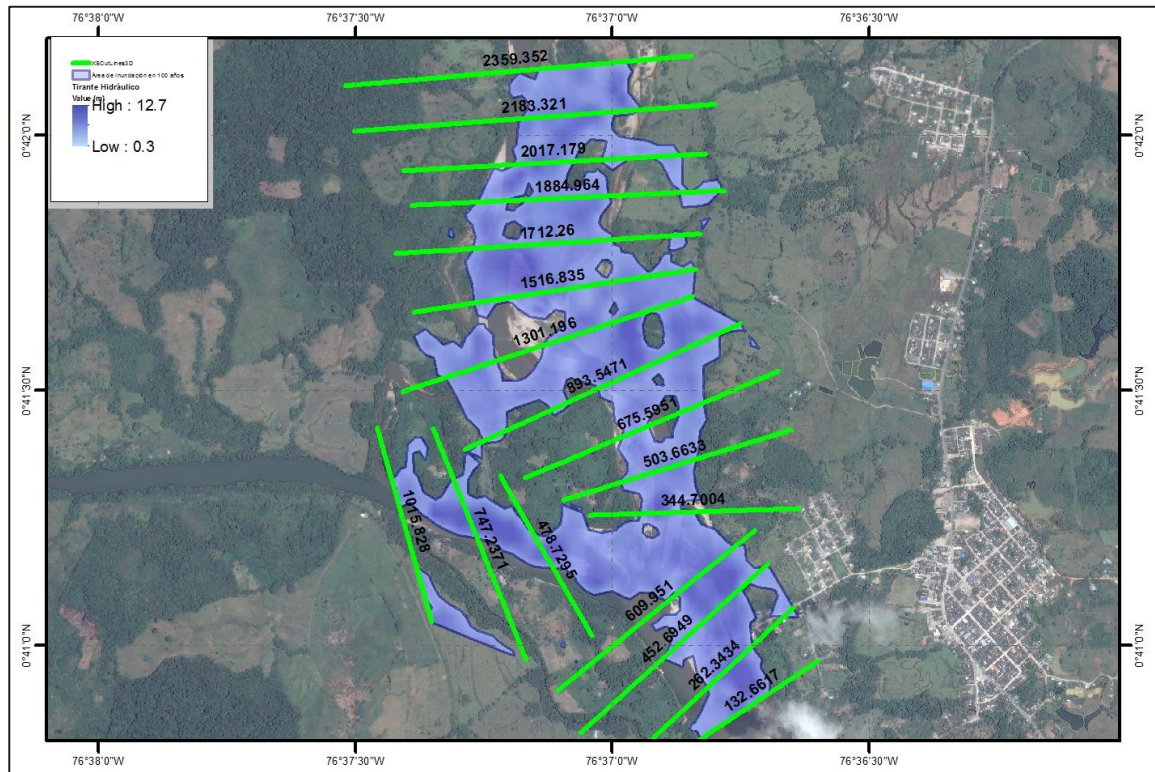


Figura 10. Esquema gráfico de Inundación en período de 100 años.

Para el caso de los perfiles propios de inundación se ha desarrollado un compendio de imágenes y record de datos que se adjuntan a continuación.

Indicaciones:

E.G. Elev (m)	: Rasante energía para elevación de la superficie del agua dada
Vel Head (m)	: Velocidad de cabeza
W.S. Elev (m)	: Superficie del agua calculada de la Ecuación energética
Crit W.S. (m)	: Elevación crítica de la superficie del agua
E.G. Slope (m/m)	: Pendiente de la línea de energía de la sección
Q Total (m ³ /s)	: Caudal Total
Top Width (m)	: Ancho Total
Vel Total (m/s)	: Velocidad Total
Max Chl Dpth (m)	: Máxima profundidad del canal principal
Conv. Total (m ³ /s)	: Transporte de la sección transversal total
Length Wtd. (m)	: Longitud ponderada de la base de distribución de flujo (Canal, Margen izquierda y derecha)
Min Ch El (m)	: Elevación mínima del canal
Wtd Sco Ch El (m)	: Elevación Ponderada de Socavación en el Canal

Frctn Loss (m)	: Pérdidas por fricción en las dos secciones continuas
C & E Loss (m)	: Contracción (-) o expansión de pérdidas entre las dos secciones continuas
Wt. n-Val.	: Valor ponderado de Manning
Reach Len. (m)	: Longitud alcanzada aguas abajo de la sección (Canal, margen izquierda y derecha)
Flow Área (m ²)	: Área de flujo aguas abajo de la sección
Área (m ²)	: Área de flujo aguas abajo se la sección (Incluye áreas inefectivas)
Flow (m ³ /s)	: Caudal aguas abajo
Top Width (m)	: Ancho total aguas abajo
Avg. Vel. (m/s)	: Velocidad media aguas abajo
Hydr. Depth (m)	: Máxima profundidad aguas abajo
Conv. (m ³ /s)	: Transporte de la sección aguas abajo
Wetted Per. (m)	: Perímetro húmedo aguas abajo
Shear (N/m ²)	: Tensión de cizallamiento
Stream Power (N/m s)	: Potencia Total de la Corriente
Cum Volume (1000 m ³)	: Volumen total de agua acumulada aguas abajo – entre sección
Cum SA (1000 m ²)	: Área total de agua acumulada aguas abajo – entre sección

Descrito de esta manera, a continuación se presenta el perfil horizontal de la sección transversal de análisis y los resultados numéricos de cálculo.

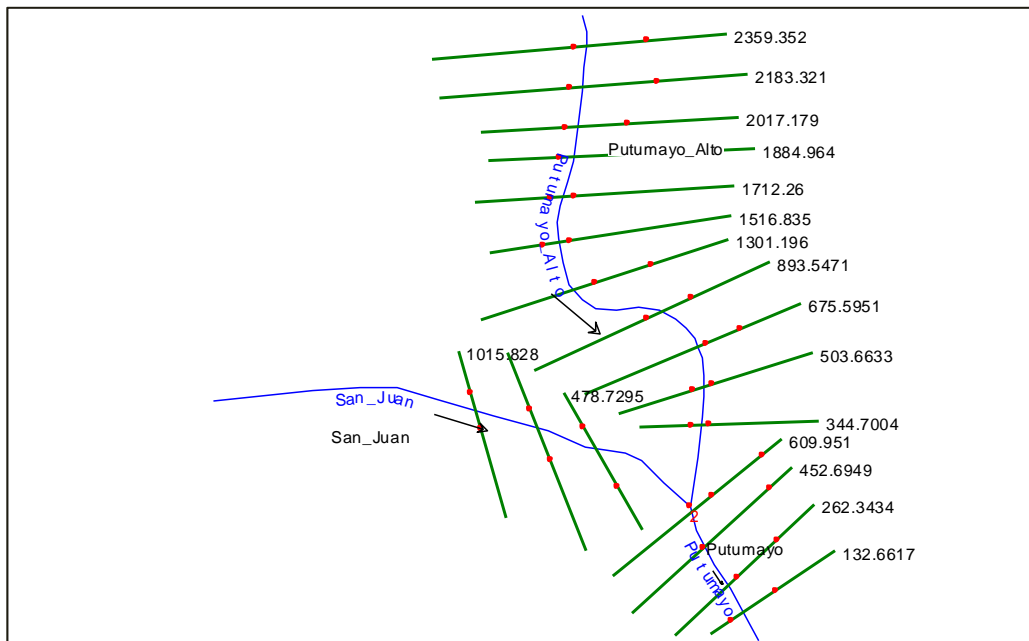
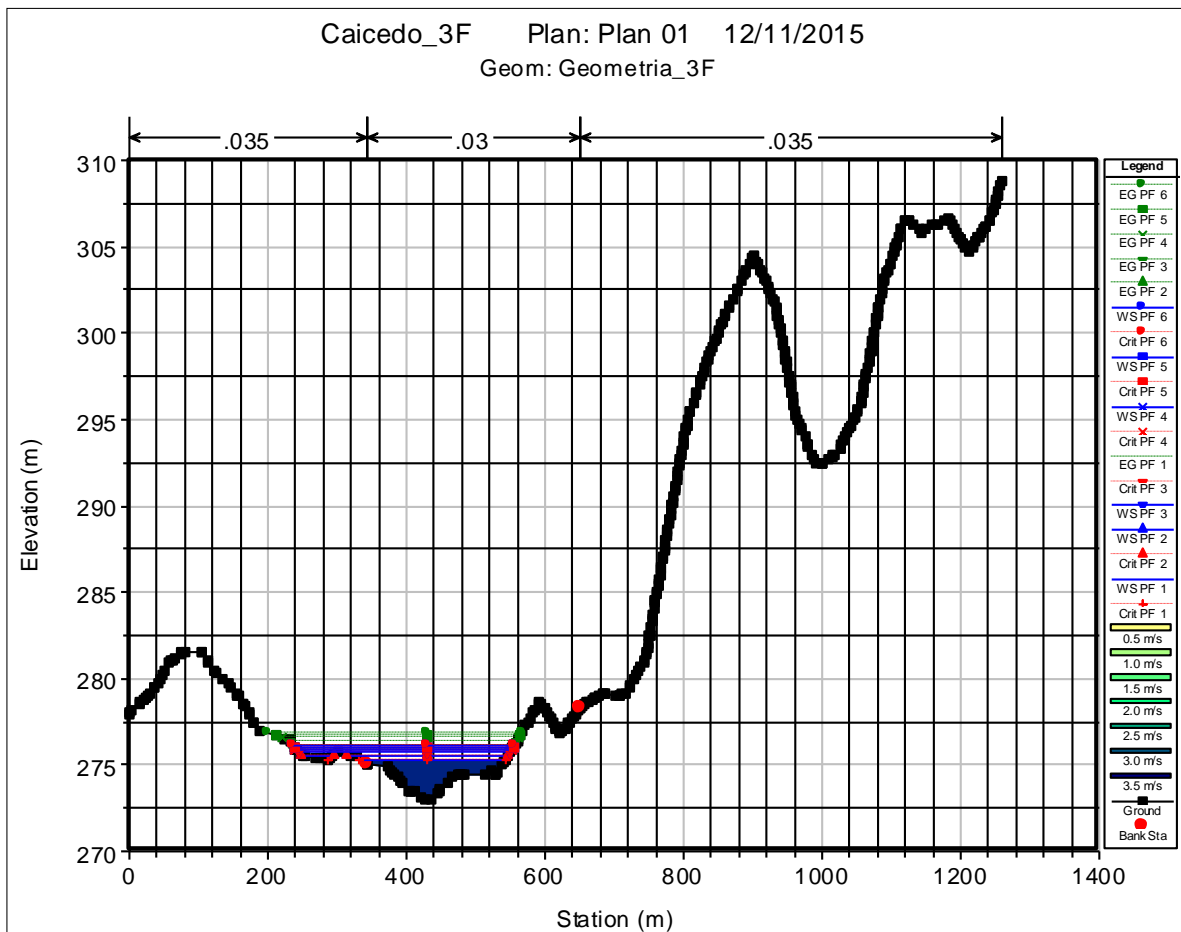
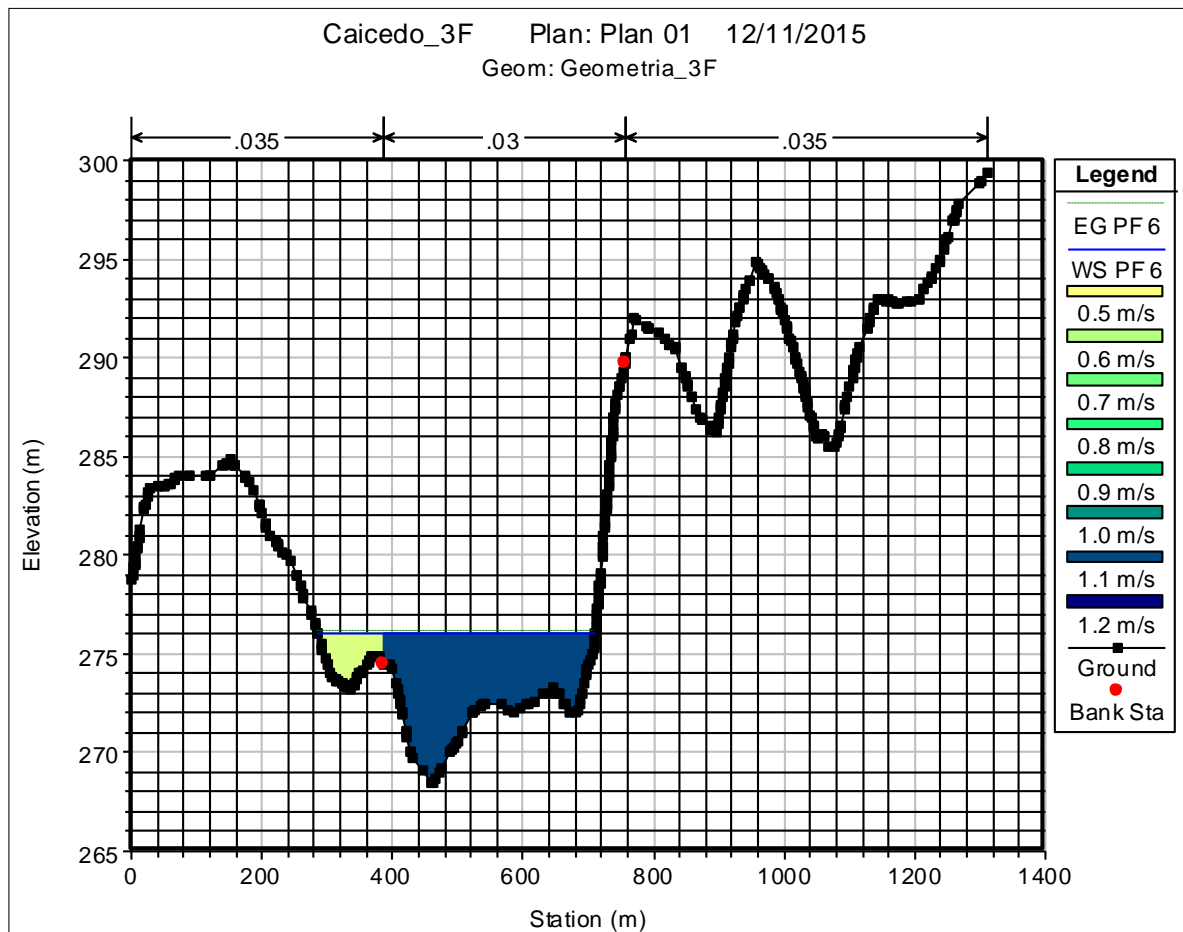


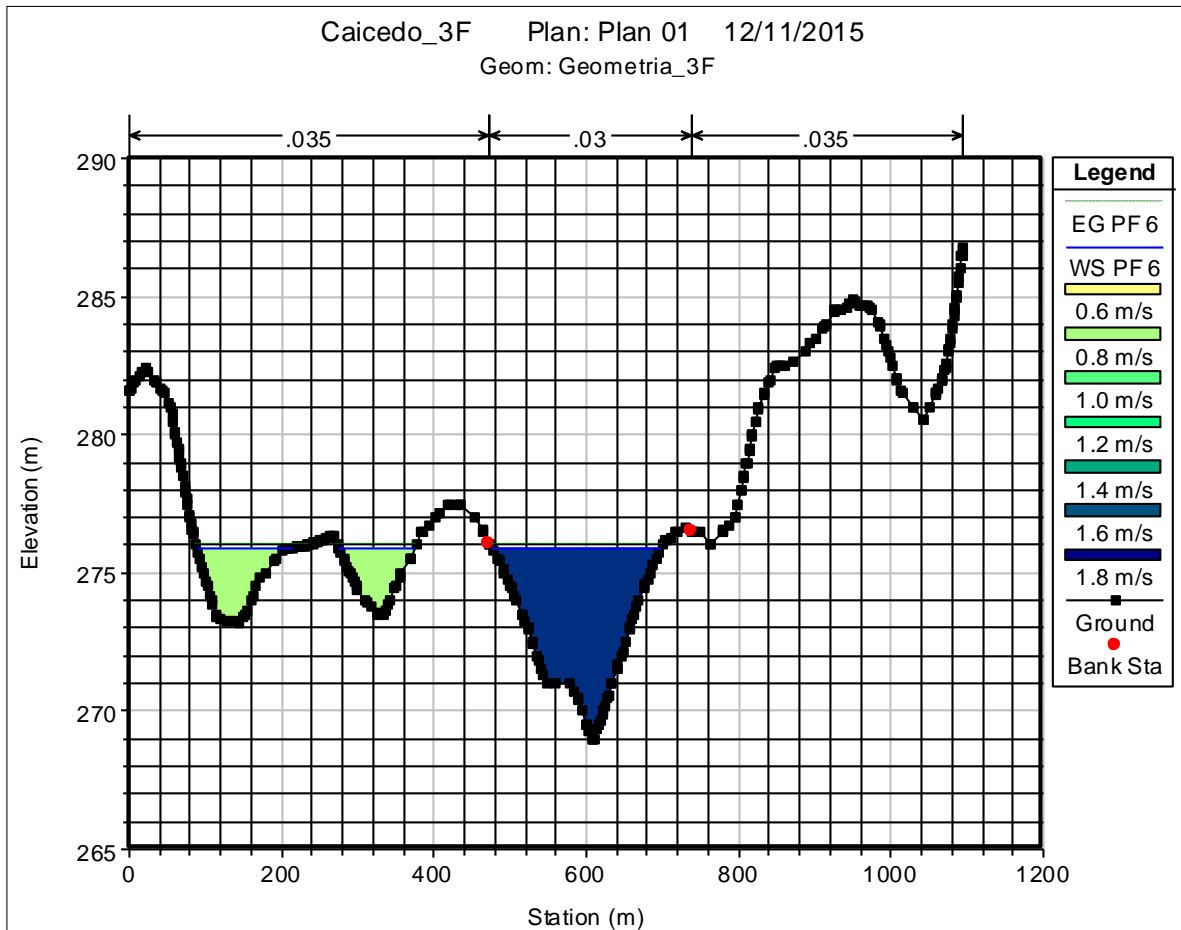
Figura 11. Distribución perfilada del modelo gráfico del sistema.



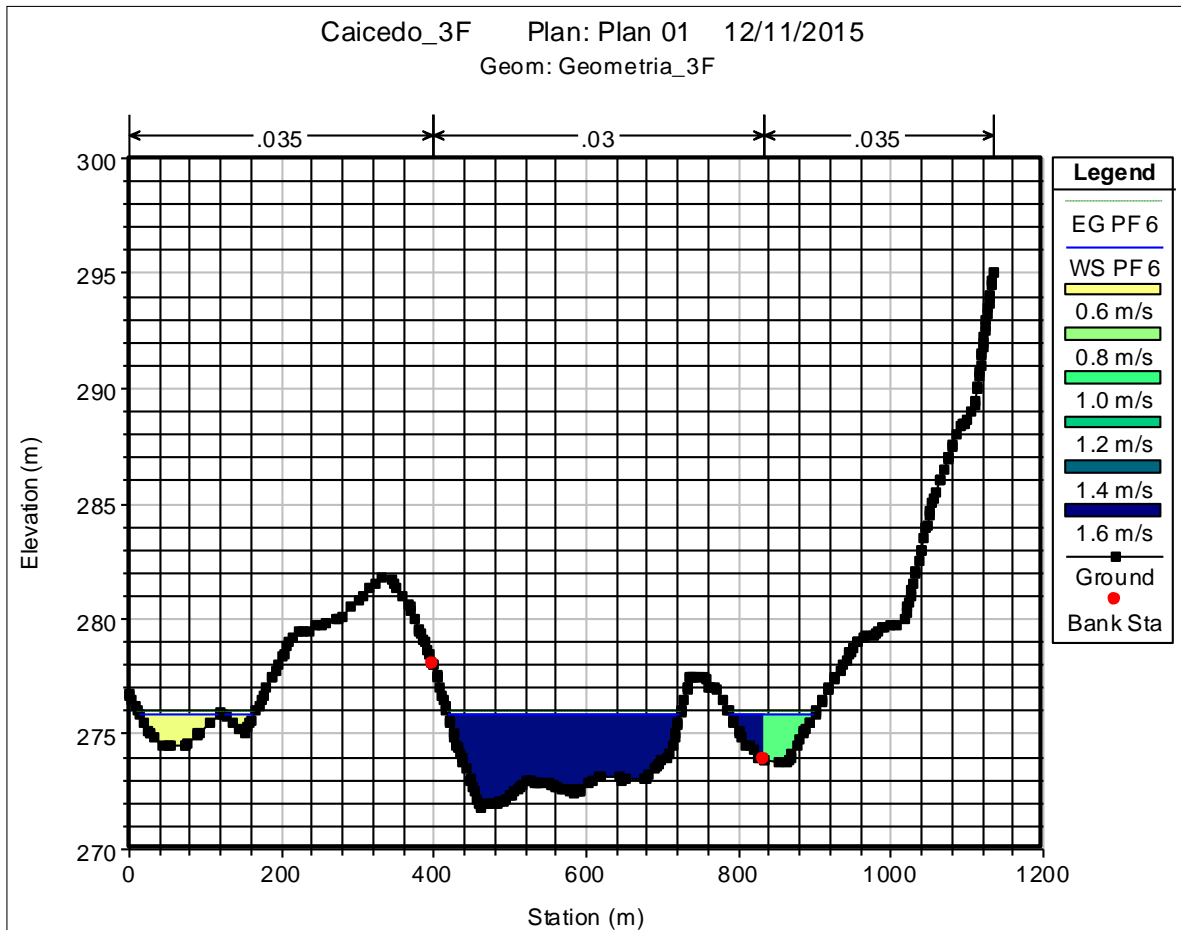
Plan: Plan 01 Putumayo_Alto RS: 2359.352 Profile: PF 6					
E.G. Elev (m)	276.83	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.72	Wt. n-Val.	0.035	0.03	
W.S. Elev (m)	276.12	Reach Len. (m)	176.81	176.03	175.98
Crit W.S. (m)	3.83	Flow Area (m2)	67.07	382.53	
E.G. Slope (m/m)	0.006083	Area (m2)	67.07	382.53	
Q Total (m3/s)	1586.29	Flow (m3/s)	109.31	1476.98	
Top Width (m)	318.46	Top Width (m)	107.22	211.24	
Vel Total (m/s)	3.53	Avg. Vel. (m/s)	1.63	3.86	
Max Chl Dpth (m)	3.12	Hydr. Depth (m)	0.63	1.81	
Conv. Total (m3/s)	20338.1	Conv. (m3/s)	1401.5	18936.6	
Length Wtd. (m)	176.08	Wetted Per. (m)	107.25	211.36	
Min Ch El (m)	273	Shear (N/m2)	37.31	107.97	
Wtd Sco Ch El (m)	1.87	Stream Power (N/m s)	60269.15	0	0
Frctn Loss (m)	692.56	Cum Volume (1000 m3)	1378.7	1567.01	398.21
C & E Loss (m)	1.07	Cum SA (1000 m2)	540.53	375.52	183.2



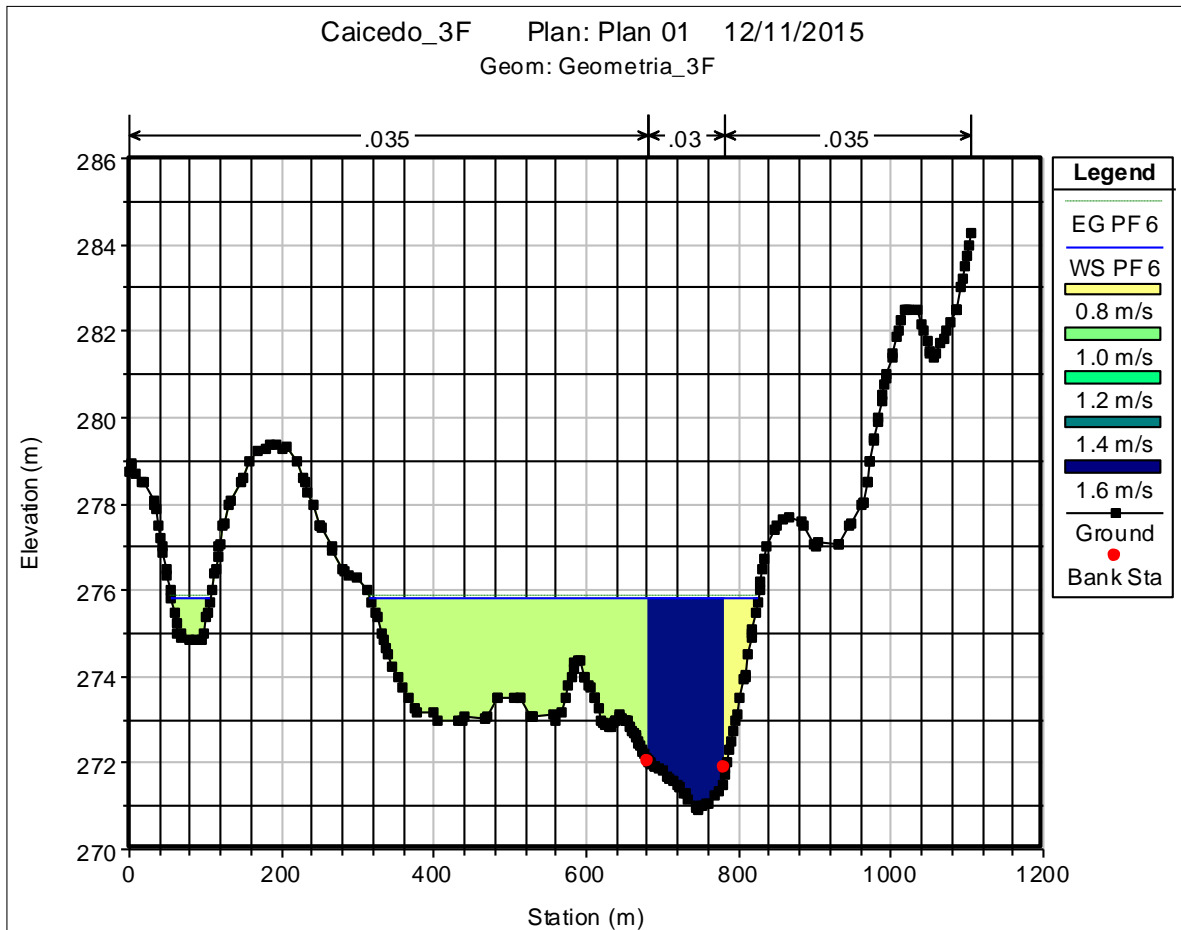
Plan: Plan 01 Putumayo_Alto RS: 2183.321 Profile: PF 6					
E.G. Elev (m)	276.09	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.06	Wt. n-Val.	0.035	0.03	
W.S. Elev (m)	276.03	Reach Len. (m)	166.72	166.14	165.9
Crit W.S. (m)	7.59	Flow Area (m2)	182.9	1344.59	
E.G. Slope (m/m)	0.000166	Area (m2)	182.9	1344.59	
Q Total (m3/s)	1586.29	Flow (m3/s)	100.42	1485.87	
Top Width (m)	425.12	Top Width (m)	100.23	324.89	
Vel Total (m/s)	1.04	Avg. Vel. (m/s)	0.55	1.11	
Max Chl Dpth (m)	7.53	Hydr. Depth (m)	1.82	4.14	
Conv. Total (m3/s)	123115	Conv. (m3/s)	7793.8	115321.2	
Length Wtd. (m)	166.2	Wetted Per. (m)	100.41	325.78	
Min Ch El (m)	268.5	Shear (N/m2)	2.97	6.72	
Wtd Sco Ch El (m)	1.41	Stream Power (N/m s)	62753.53	0	0
Frctn Loss (m)	24.88	Cum Volume (1000 m3)	1356.6	1415	398.21
C & E Loss (m)	2.85	Cum SA (1000 m2)	522.19	328.33	183.2



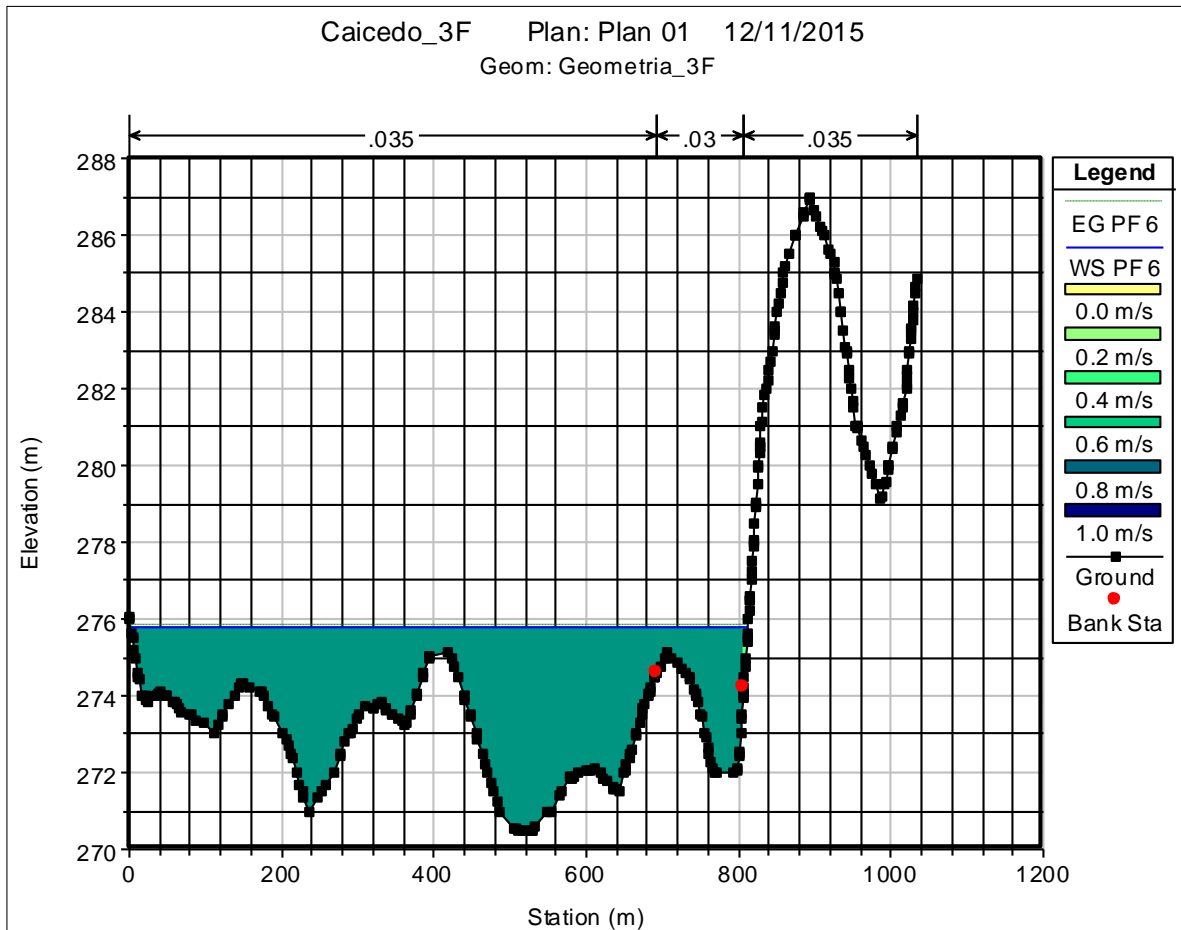
Plan: Plan 01 Putumayo_Alto Putumayo_Alto RS: 2017.179 Profile: PF 6					
E.G. Elev (m)	276.04	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.13	Wt. n-Val.	0.035	0.03	
W.S. Elev (m)	275.91	Reach Len. (m)	133.88	132.22	133.08
Crit W.S. (m)	7.08	Flow Area (m2)	320.51	787.97	
E.G. Slope (m/m)	0.000479	Area (m2)	320.51	787.97	
Q Total (m3/s)	1586.29	Flow (m3/s)	253.34	1332.96	
Top Width (m)	448.3	Top Width (m)	225.6	222.7	
Vel Total (m/s)	1.43	Avg. Vel. (m/s)	0.79	1.69	
Max Chl Dpth (m)	6.95	Hydr. Depth (m)	1.42	3.54	
Conv. Total (m3/s)	72465.1	Conv. (m3/s)	11572.9	60892.2	
Length Wtd. (m)	132.41	Wetted Per. (m)	225.94	223.23	
Min Ch El (m)	268.96	Shear (N/m2)	6.67	16.59	
Wtd Sco Ch El (m)	1.12	Stream Power (N/m s)	52398.5	0	0
Frctn Loss (m)	43.77	Cum Volume (1000 m3)	1314.63	1237.85	398.21
C & E Loss (m)	2.99	Cum SA (1000 m2)	495.03	282.84	183.2



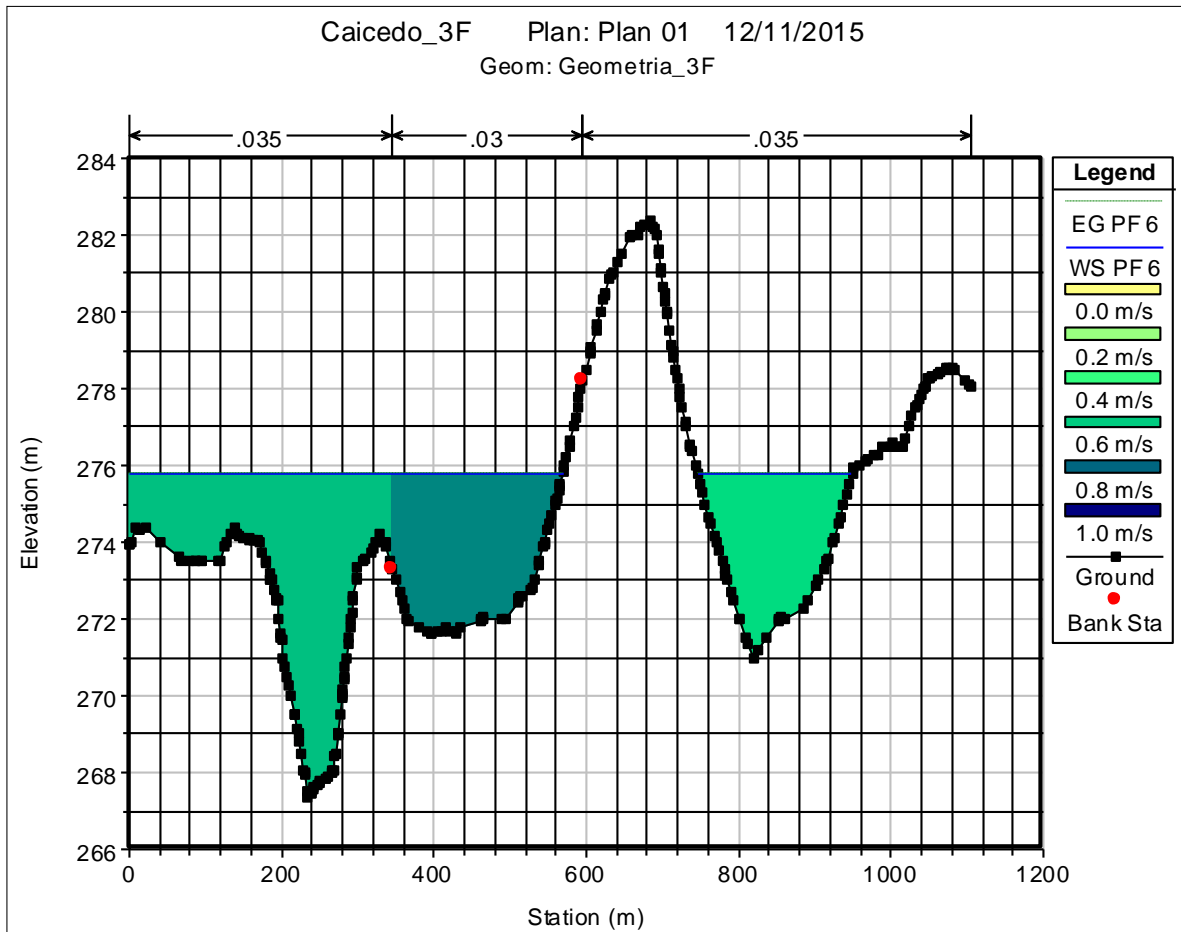
Plan: Plan 01		Putumayo_Alto		Putumayo_Alto RS: 1884.964		Profile: PF 6	
E.G. Elev (m)	275.96	Element	Left OB	Channel	Right OB		
Vel Head (m)	0.12	Wt. n-Val.	0.035	0.03	0.035		
W.S. Elev (m)	275.85	Reach Len. (m)	169.03	172.7	171.31		
Crit W.S. (m)	4.13	Flow Area (m2)	109.13	905.49	95.67		
E.G. Slope (m/m)	0.000634	Area (m2)	109.13	905.49	95.67		
Q Total (m3/s)	1586.29	Flow (m3/s)	68.86	1428.61	88.82		
Top Width (m)	558.22	Top Width (m)	141.96	351.04	65.22		
Vel Total (m/s)	1.43	Avg. Vel. (m/s)	0.63	1.58	0.93		
Max Chl Dpth (m)	4.02	Hydr. Depth (m)	0.77	2.58	1.47		
Conv. Total (m3/s)	62986.5	Conv. (m3/s)	2734.2	56725.4	3526.9		
Length Wtd. (m)	171.6	Wetted Per. (m)	142.06	351.45	65.28		
Min Ch El (m)	271.83	Shear (N/m2)	4.78	16.03	9.12		
Wtd Sco Ch El (m)	1.23	Stream Power (N/m s)	54276.75	0	0		
Frctn Loss (m)	78.33	Cum Volume (1000 m3)	1285.87	1125.89	391.85		
C & E Loss (m)	1.77	Cum SA (1000 m2)	470.42	244.91	178.86		



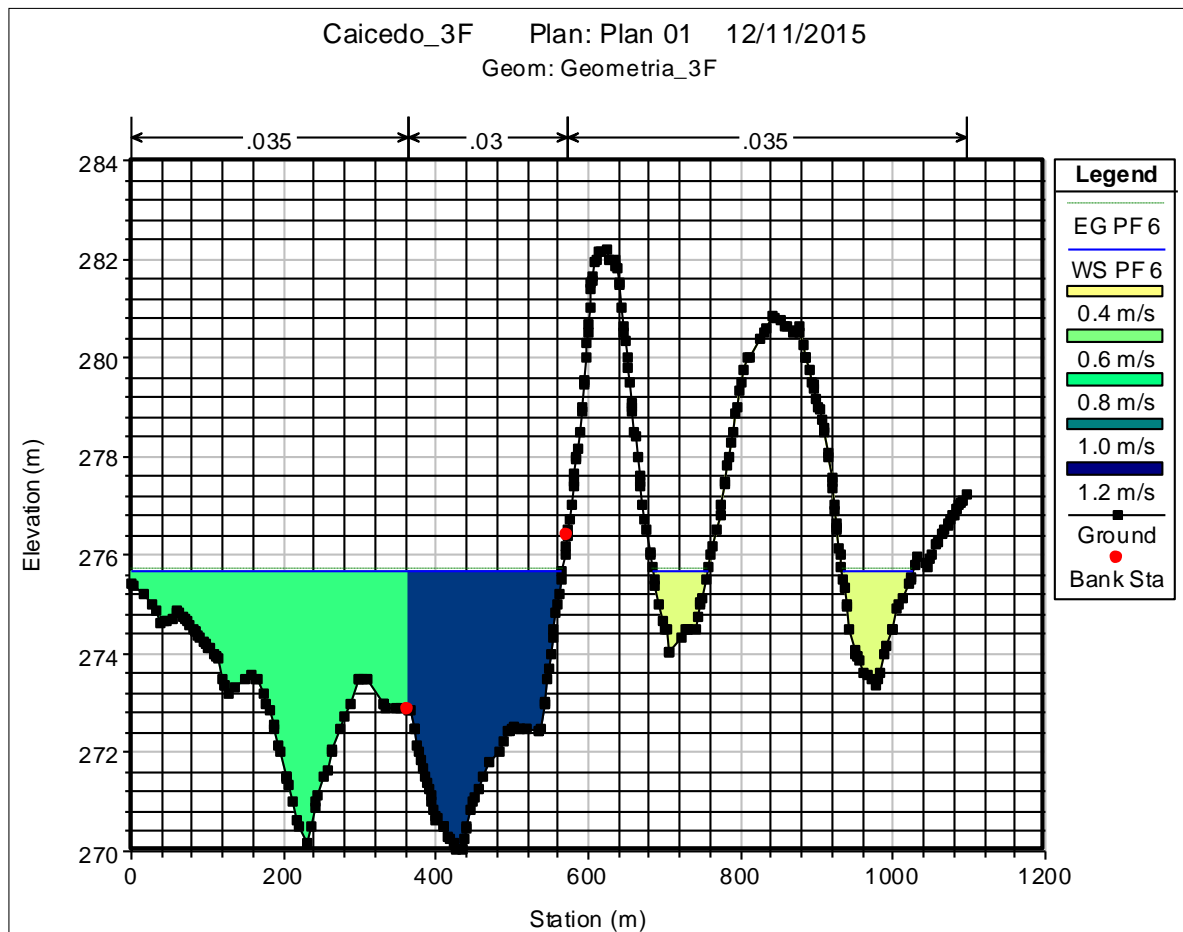
Plan: Plan 01 Putumayo_Alto Putumayo_Alto RS: 1712.26 Profile: PF 6					
E.G. Elev (m)	275.88	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.08	Wt. n-Val.	0.035	0.03	0.035
W.S. Elev (m)	275.8	Reach Len. (m)	188.82	195.42	200.85
Crit W.S. (m)	4.95	Flow Area (m2)	924.98	438.29	86.52
E.G. Slope (m/m)	0.000313	Area (m2)	924.98	438.29	86.52
Q Total (m3/s)	1586.29	Flow (m3/s)	824.36	691.46	70.47
Top Width (m)	558.41	Top Width (m)	416.26	100.06	42.09
Vel Total (m/s)	1.09	Avg. Vel. (m/s)	0.89	1.58	0.81
Max Chl Dpth (m)	4.87	Hydr. Depth (m)	2.22	4.38	2.06
Conv. Total (m3/s)	89708.5	Conv. (m3/s)	46619.7	39103.7	3985
Length Wtd. (m)	190.91	Wetted Per. (m)	416.53	100.09	42.28
Min Ch El (m)	270.93	Shear (N/m2)	6.81	13.43	6.28
Wtd Sco Ch El (m)	9.10	Stream Power (N/m s)	52934.73	0	0
Frctn Loss (m)	30.30	Cum Volume (1000 m3)	1198.48	1009.86	376.24
C & E Loss (m)	4.40	Cum SA (1000 m2)	423.24	205.96	169.67



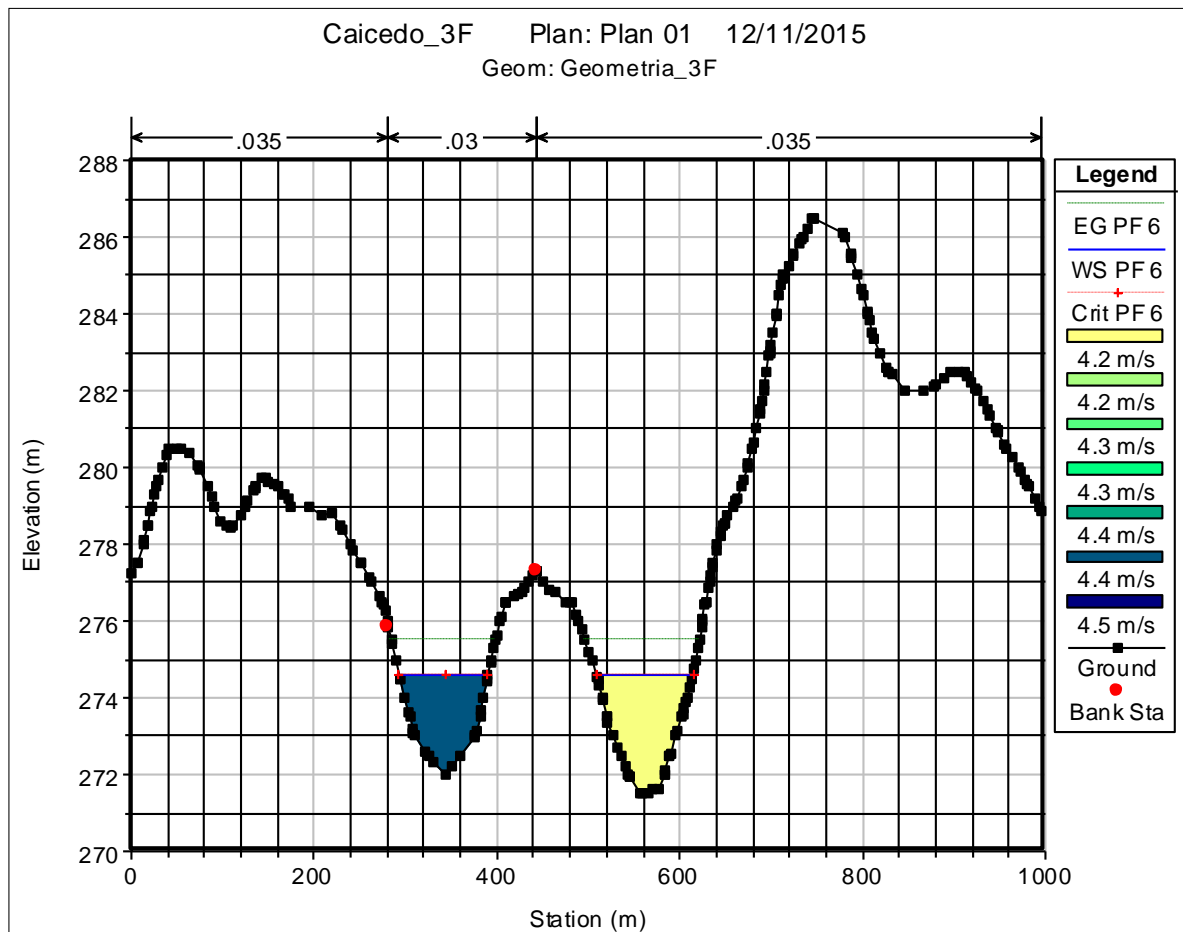
Plan: Plan 01		Putumayo_Alto		Putumayo_Alto RS: 1516.835		Profile: PF 6	
E.G. Elev (m)	275.82	Element	Left OB	Channel	Right OB		
Vel Head (m)	0.03	Wt. n-Val.	0.035	0.03	0.035		
W.S. Elev (m)	275.8	Reach Len. (m)	215.14	215.64	230.55		
Crit W.S. (m)	3.82	Flow Area (m2)	1980.04	260.05	4.32		
E.G. Slope (m/m)	0.000151	Area (m2)	1980.04	260.05	4.32		
Q Total (m3/s)	1586.29	Flow (m3/s)	1401.53	183.49	1.27		
Top Width (m)	809.72	Top Width (m)	689.95	114.41	5.36		
Vel Total (m/s)	0.71	Avg. Vel. (m/s)	0.71	0.71	0.3		
Max Chl Dpth (m)	5.3	Hydr. Depth (m)	2.87	2.27	0.81		
Conv. Total (m3/s)	129227.9	Conv. (m3/s)	114176.3	14947.8	103.8		
Length Wtd. (m)	216.85	Wetted Per. (m)	690.58	114.84	5.6		
Min Ch El (m)	272	Shear (N/m2)	4.24	3.35	1.14		
Wtd Sco Ch El (m)	5.55	Stream Power (N/m s)	49465.51	0	0		
Frctn Loss (m)	27.43	Cum Volume (1000 m3)	924.21	941.62	367.12		
C & E Loss (m)	20.66	Cum SA (1000 m2)	318.81	185	164.9		



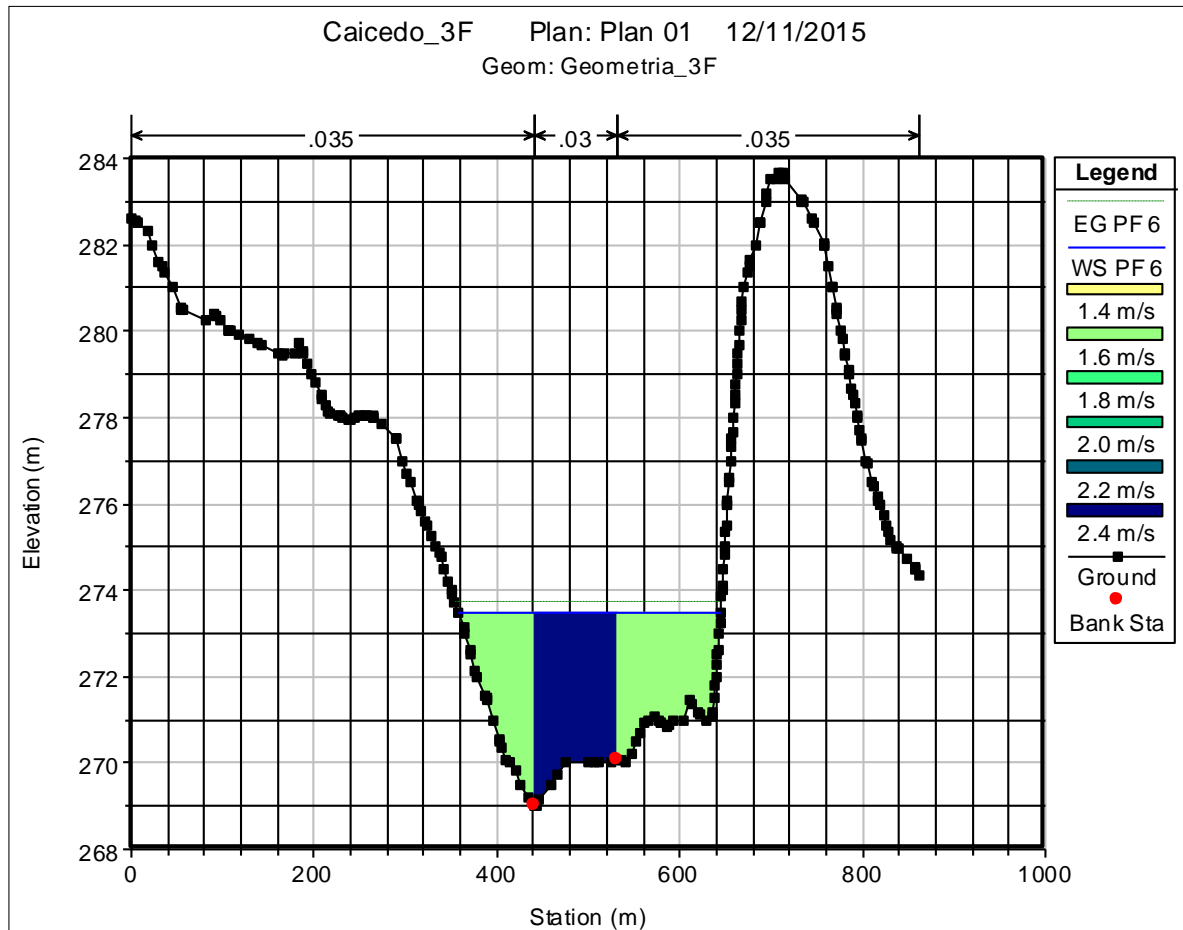
Plan: Plan 01 Putumayo_Alto Putumayo_Alto RS: 1301.196 Profile: PF 6					
E.G. Elev (m)	275.79	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.02	Wt. n-Val.	0.035	0.03	0.035
W.S. Elev (m)	275.77	Reach Len. (m)	418.1	407.65	431.24
Crit W.S. (m)	4.16	Flow Area (m2)	1137.98	745.98	575.44
E.G. Slope (m/m)	0.000098	Area (m2)	1137.98	745.98	575.44
Q Total (m3/s)	1586.29	Flow (m3/s)	709.77	549.61	326.91
Top Width (m)	770.87	Top Width (m)	345.11	223.67	202.09
Vel Total (m/s)	0.64	Avg. Vel. (m/s)	0.62	0.74	0.57
Max Chl Dpth (m)	8.43	Hydr. Depth (m)	3.3	3.34	2.85
Conv. Total (m3/s)	160123	Conv. (m3/s)	71645.9	55478.5	32998.7
Length Wtd. (m)	415.21	Wetted Per. (m)	347.9	223.84	202.38
Min Ch El (m)	271.63	Shear (N/m2)	3.15	3.21	2.74
Wtd Sco Ch El (m)	12.04	Stream Power (N/m s)	52918.46	0	0
Frctn Loss (m)	28.63	Cum Volume (1000 m3)	588.81	833.15	300.28
C & E Loss (m)	10.81	Cum SA (1000 m2)	207.47	148.55	140.99



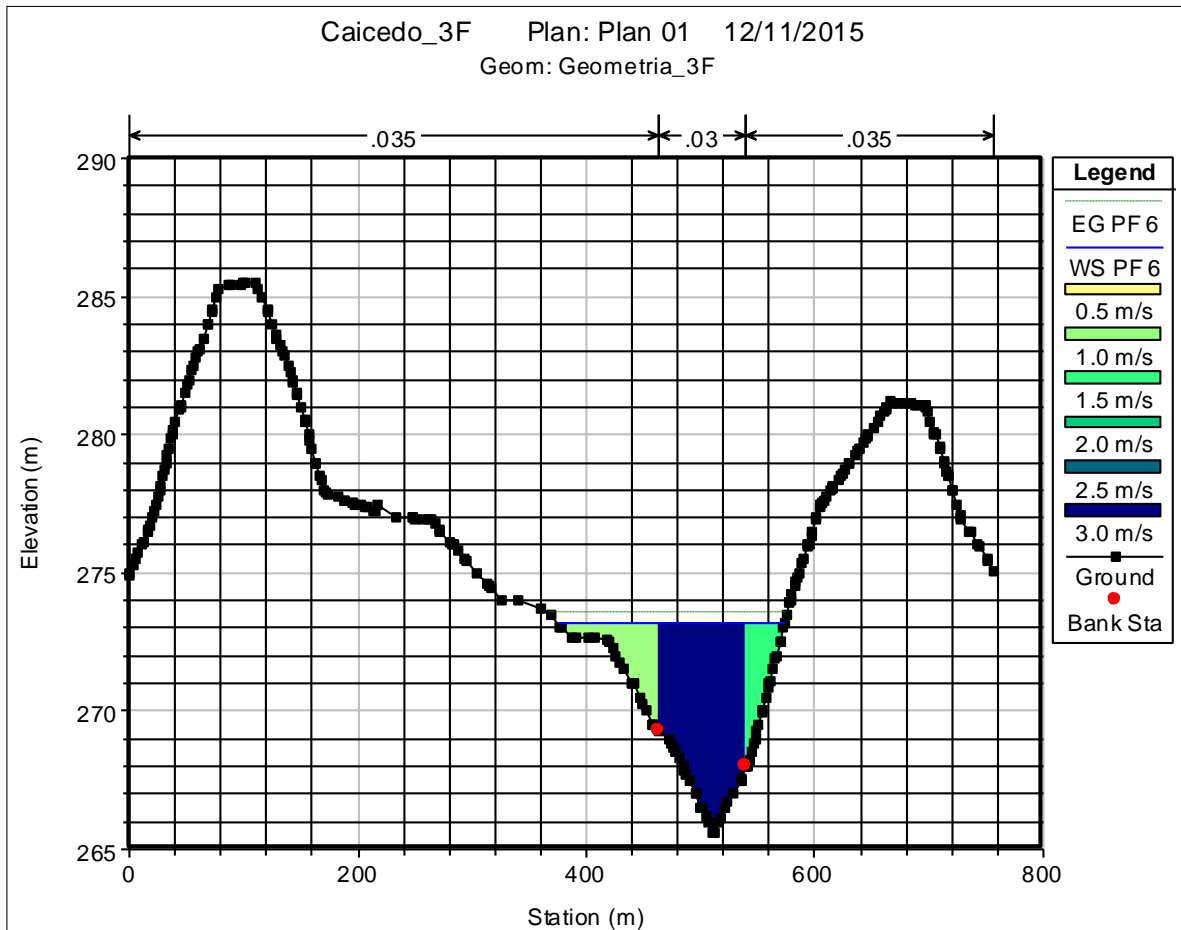
Plan: Plan 01 Putumayo_Alto Putumayo_Alto RS: 893.5471 Profile: PF 6					
E.G. Elev (m)	275.74	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.05	Wt. n-Val.	0.035	0.03	0.035
W.S. Elev (m)	275.69	Reach Len. (m)	203.46	217.95	238.25
Crit W.S. (m)	5.71	Flow Area (m ²)	899.72	763.53	198.76
E.G. Slope (m/m)	0.00019	Area (m ²)	899.72	763.53	198.76
Q Total (m ³ /s)	1586.29	Flow (m ³ /s)	647.63	849.64	89.01
Top Width (m)	731.83	Top Width (m)	363.71	202.3	165.82
Vel Total (m/s)	0.85	Avg. Vel. (m/s)	0.72	1.11	0.45
Max Chl Dpth (m)	5.66	Hydr. Depth (m)	2.47	3.77	1.2
Conv. Total (m ³ /s)	115064.3	Conv. (m ³ /s)	46977.2	61630.5	6456.7
Length Wtd. (m)	221.08	Wetted Per. (m)	364.2	202.62	166.1
Min Ch El (m)	270.03	Shear (N/m ²)	4.6	7.02	2.23
Wtd Sco Ch El (m)	9.38	Stream Power (N/m s)	52492.82	0	0
Frctn Loss (m)	23.88	Cum Volume (1000 m ³)	162.83	525.48	133.35
C & E Loss (m)	4.63	Cum SA (1000 m ²)	59.29	61.73	61.66



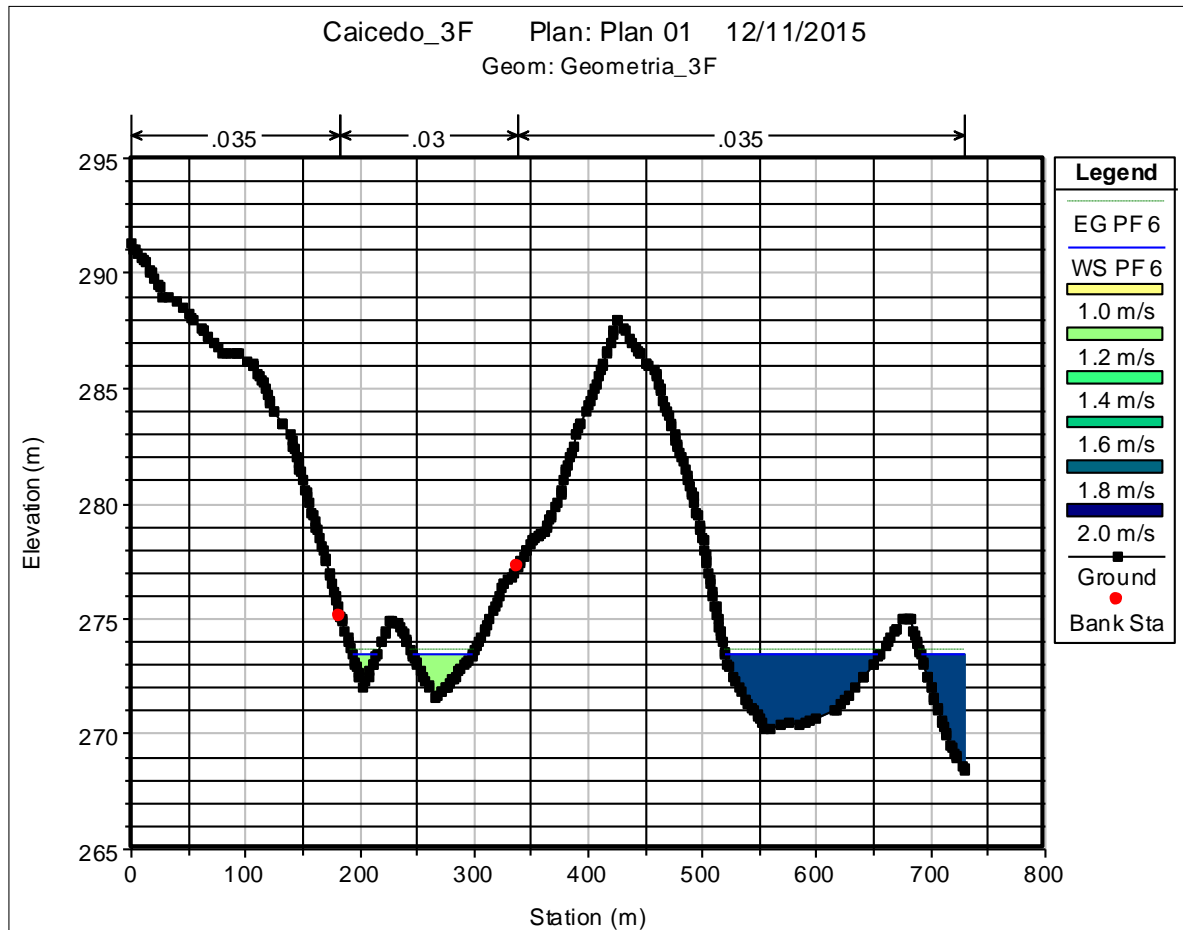
Plan: Plan 01 Putumayo_Alto Putumayo_Alto RS: 675.5951 Profile: PF 6					
E.G. Elev (m)	275.52	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.93	Wt. n-Val.		0.03	0.035
W.S. Elev (m)	274.59	Reach Len. (m)	177.08	171.93	168.82
Crit W.S. (m)	3.52	Flow Area (m2)		164.61	207.51
E.G. Slope (m/m)	0.008637	Area (m2)		164.61	207.51
Q Total (m3/s)	1586.29	Flow (m3/s)		724.3	861.99
Top Width (m)	202.84	Top Width (m)		97.03	105.81
Vel Total (m/s)	4.26	Avg. Vel. (m/s)		4.4	4.15
Max Chl Dpth (m)	3.09	Hydr. Depth (m)		1.7	1.96
Conv. Total (m3/s)	17069	Conv. (m3/s)		7793.7	9275.3
Length Wtd. (m)	171.2	Wetted Per. (m)		97.24	106.05
Min Ch El (m)	272	Shear (N/m2)		143.38	165.73
Wtd Sco Ch El (m)	13.16	Stream Power (N/m s)	47689.23	0	0
Frctn Loss (m)	1053.23	Cum Volume (1000 m3)	71.3	424.34	84.95
C & E Loss (m)	1.79	Cum SA (1000 m2)	22.29	29.11	29.3



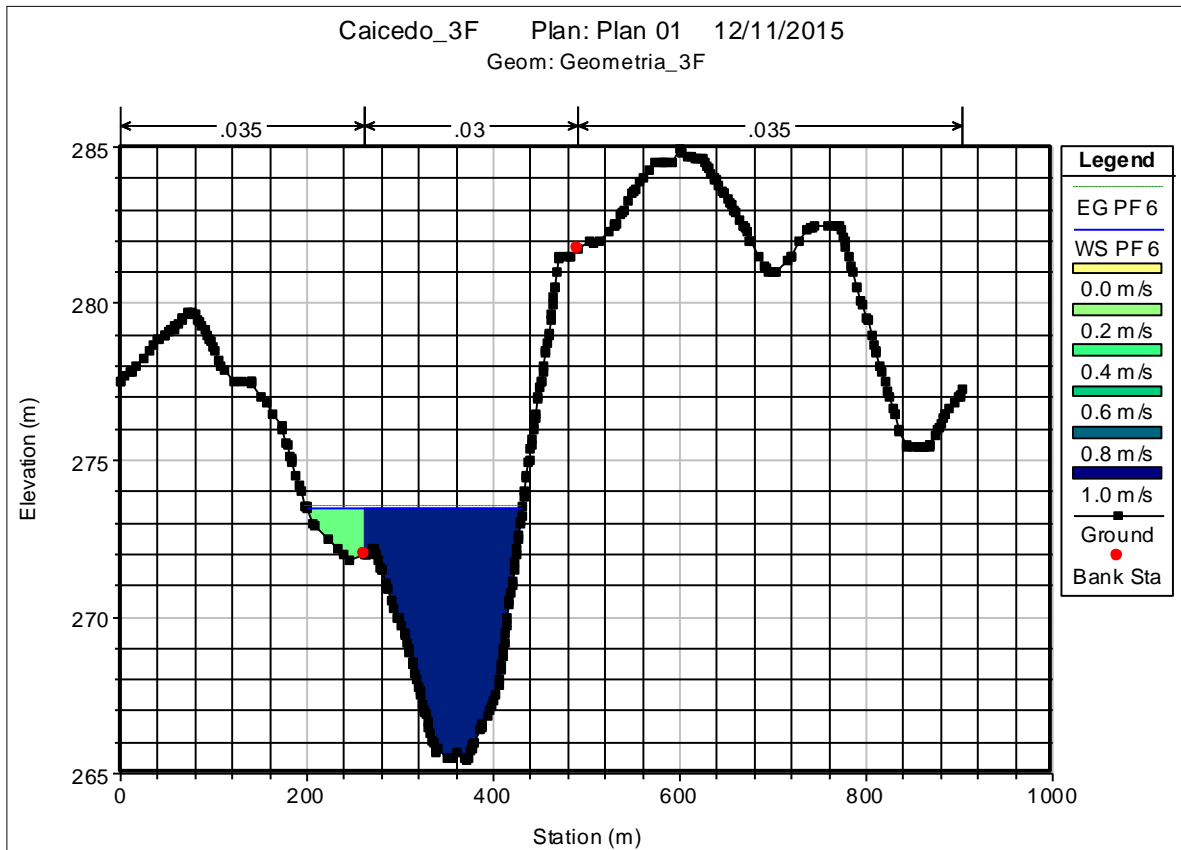
Plan: Plan 01		Putumayo_Alto		Putumayo_Alto RS: 503.6633		Profile: PF 6	
E.G. Elev (m)	273.7	Element	Left OB	Channel	Right OB		
Vel Head (m)	0.21	Wt. n-Val.	0.035	0.03	0.035		
W.S. Elev (m)	273.49	Reach Len. (m)	171.51	158.96	146.46		
Crit W.S. (m)	4.70	Flow Area (m2)	217.18	325.98	289.46		
E.G. Slope (m/m)	0.0009	Area (m2)	217.18	325.98	289.46		
Q Total (m3/s)	1586.29	Flow (m3/s)	348.57	776.53	461.19		
Top Width (m)	287.02	Top Width (m)	84.6	88.63	113.79		
Vel Total (m/s)	1.91	Avg. Vel. (m/s)	1.61	2.38	1.59		
Max Chl Dpth (m)	4.49	Hydr. Depth (m)	2.57	3.68	2.54		
Conv. Total (m3/s)	52884.1	Conv. (m3/s)	11620.8	25888.1	15375.2		
Length Wtd. (m)	158.45	Wetted Per. (m)	84.74	88.65	114.19		
Min Ch El (m)	269	Shear (N/m2)	22.61	32.45	22.37		
Wtd Sco Ch El (m)	13.47	Stream Power (N/m s)	41230.99	0	0		
Frctn Loss (m)	90.12	Cum Volume (1000 m3)	52.07	382.16	43.01		
C & E Loss (m)	2.78	Cum SA (1000 m2)	14.8	13.15	10.77		



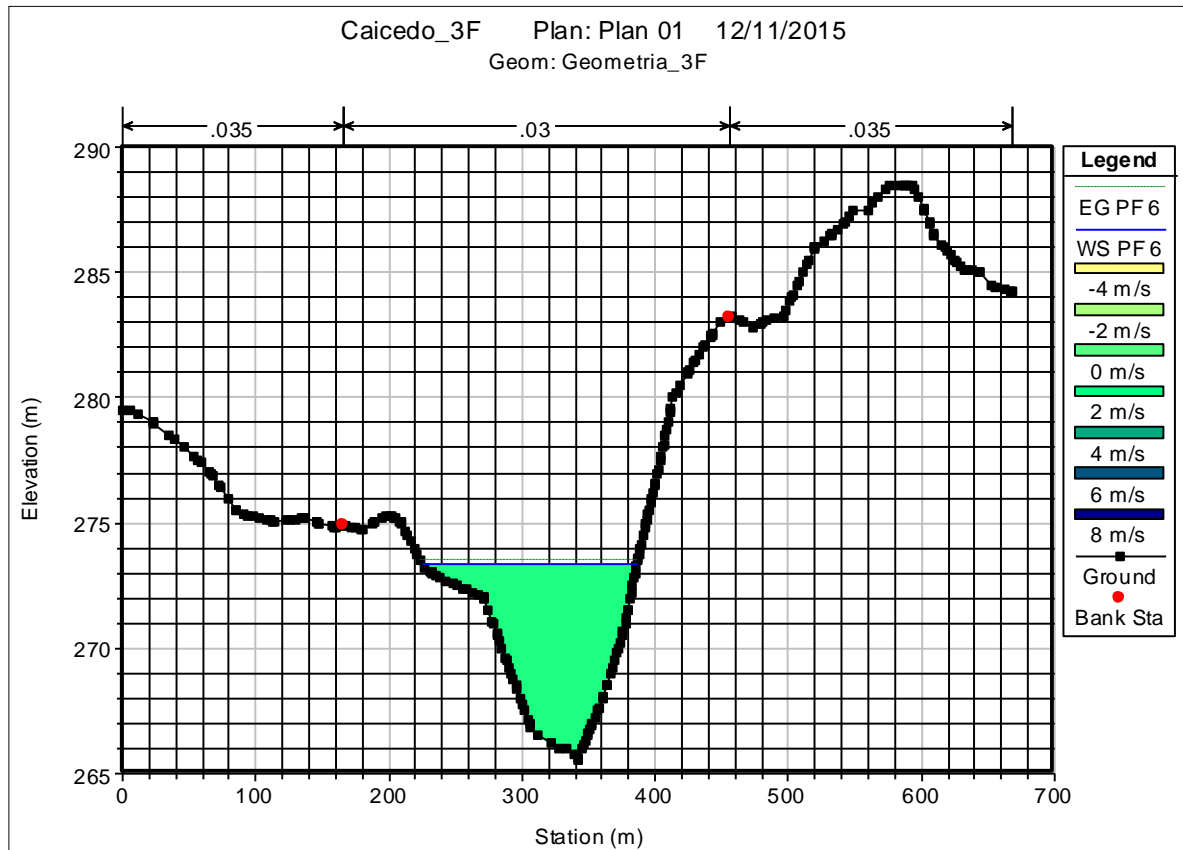
Plan: Plan 01 Putumayo_Alto Putumayo_Alto RS: 344.7004 Profile: PF 6					
E.G. Elev (m)	273.55	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.4	Wt. n-Val.	0.035	0.03	0.035
W.S. Elev (m)	273.15	Reach Len. (m)	344.7	344.7	344.7
Crit W.S. (m)	7.97	Flow Area (m2)	119.81	446.83	88.8
E.G. Slope (m/m)	0.000771	Area (m2)	119.81	446.83	88.8
Q Total (m3/s)	1586.29	Flow (m3/s)	116.72	1335.01	134.56
Top Width (m)	197.97	Top Width (m)	87.93	76.8	33.24
Vel Total (m/s)	2.42	Avg. Vel. (m/s)	0.97	2.99	1.52
Max Chl Dpth (m)	7.57	Hydr. Depth (m)	1.36	5.82	2.67
Conv. Total (m3/s)	57118.7	Conv. (m3/s)	4202.9	48070.7	4845.1
Length Wtd. (m)	344.7	Wetted Per. (m)	88.07	77.07	33.65
Min Ch El (m)	265.58	Shear (N/m2)	10.29	43.85	19.96
Wtd Sco Ch El (m)	12.06	Stream Power (N/m s)	36247.38	0	0
Frctn Loss (m)	198.97	Cum Volume (1000 m3)	23.17	320.74	15.31
C & E Loss (m)	2.35	Cum SA (1000 m2)			



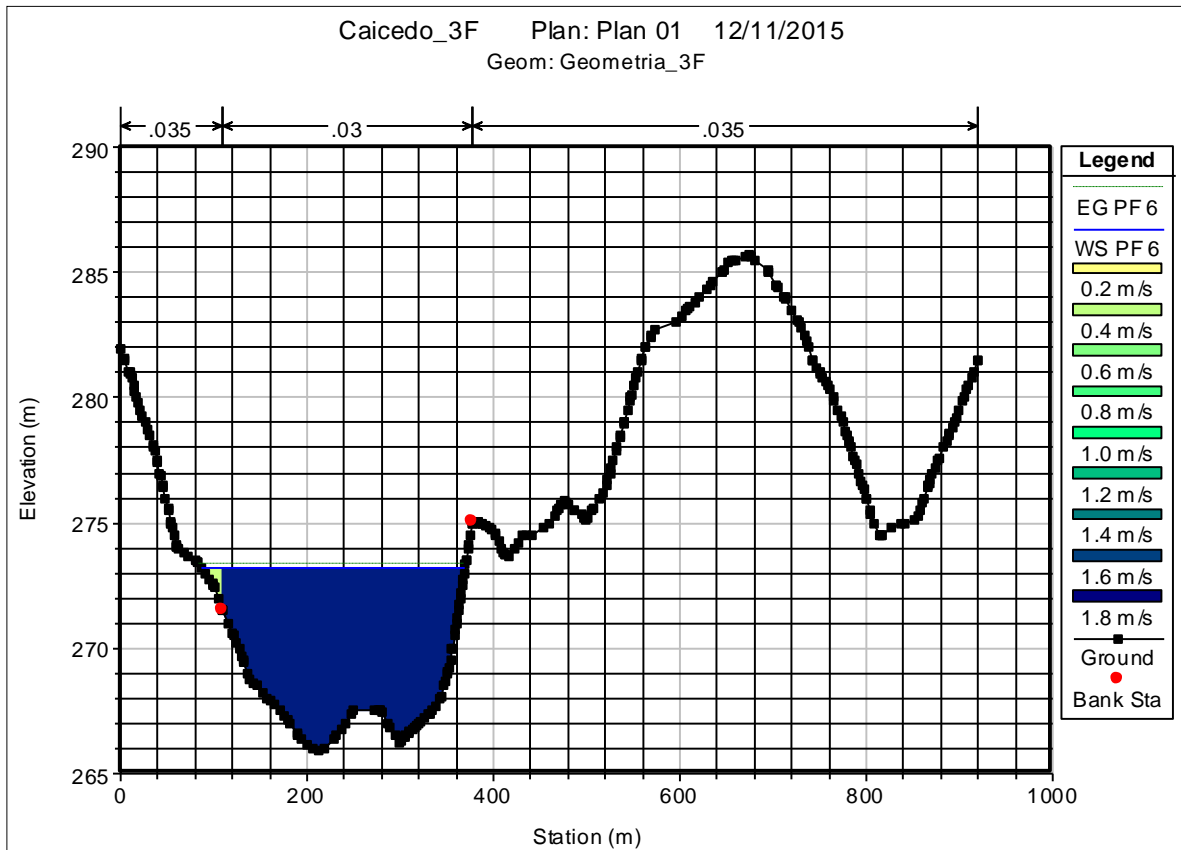
Plan: Plan 01 San_Juan San_Juan RS: 1015.828 Profile: PF 6					
E.G. Elev (m)	273.62	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.17	Wt. n-Val.		0.03	0.035
W.S. Elev (m)	273.45	Reach Len. (m)	259.89	268.59	323.21
Crit W.S. (m)	2.00	Flow Area (m2)		67.6	405.75
E.G. Slope (m/m)	0.001441	Area (m2)		67.6	405.75
Q Total (m3/s)	840.92	Flow (m3/s)		80.44	760.48
Top Width (m)	247.41	Top Width (m)		73.76	173.66
Vel Total (m/s)	1.78	Avg. Vel. (m/s)		1.19	1.87
Max Chl Dpth (m)	5	Hydr. Depth (m)		0.92	2.34
Conv. Total (m3/s)	22156	Conv. (m3/s)		2119.3	20036.8
Length Wtd. (m)	293.18	Wetted Per. (m)		74.11	179.29
Min Ch El (m)	271.62	Shear (N/m2)		12.89	31.97
Wtd Sco Ch El (m)	2.23	Stream Power (N/m s)	34948.93	0	0
Frctn Loss (m)	533.12	Cum Volume (1000 m3)	20.83	817.37	65.57
C & E Loss (m)	1.89	Cum SA (1000 m2)	15.52	77.14	28.06



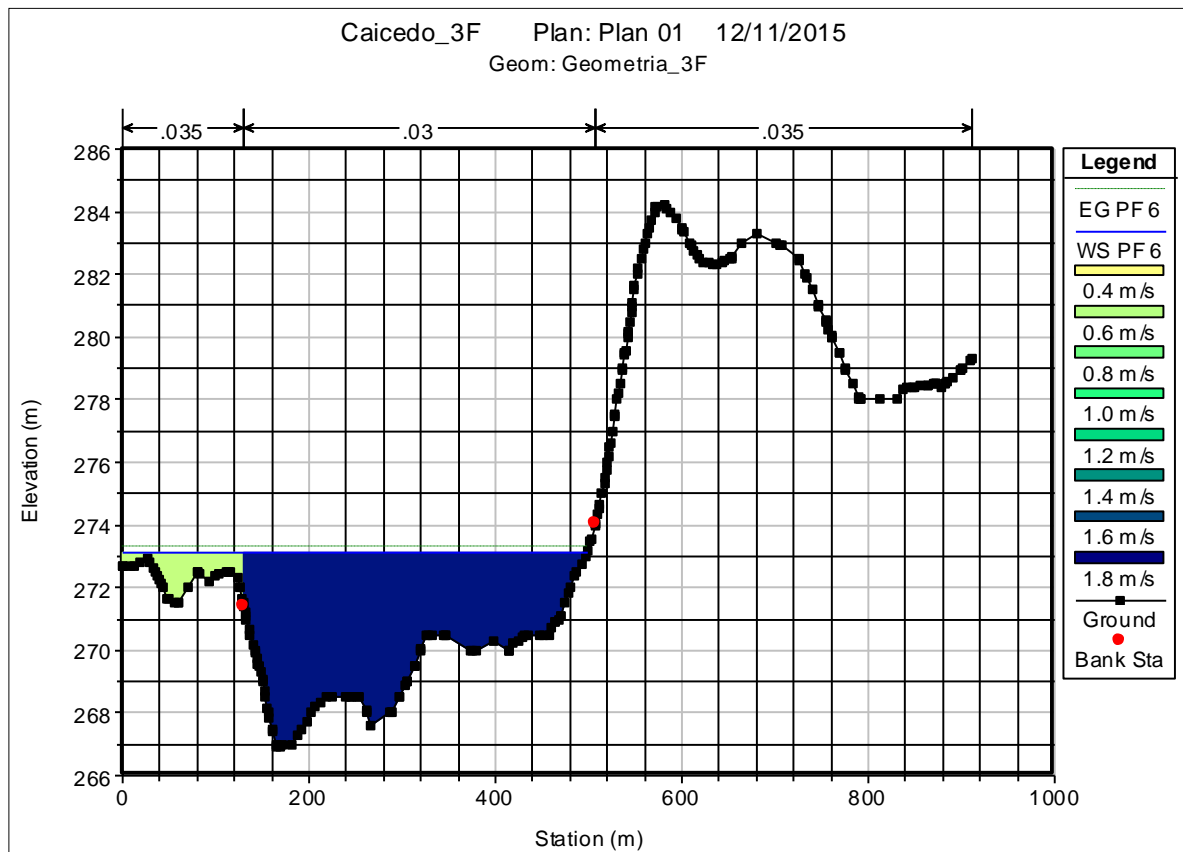
Plan: Plan 01 San_Juan San_Juan RS: 747.2371 Profile: PF 6					
E.G. Elev (m)	273.52	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.04	Wt. n-Val.	0.035	0.03	
W.S. Elev (m)	273.47	Reach Len. (m)	238.42	268.51	306.79
Crit W.S. (m)	8.09	Flow Area (m ²)	69.55	869.86	
E.G. Slope (m/m)	0.000091	Area (m ²)	69.55	869.86	
Q Total (m ³ /s)	840.92	Flow (m ³ /s)	20.42	820.5	
Top Width (m)	231.79	Top Width (m)	62.29	169.5	
Vel Total (m/s)	0.9	Avg. Vel. (m/s)	0.29	0.94	
Max Chl Dpth (m)	8.04	Hydr. Depth (m)	1.12	5.13	
Conv. Total (m ³ /s)	88052.7	Conv. (m ³ /s)	2138.1	85914.7	
Length Wtd. (m)	268.14	Wetted Per. (m)	62.33	170.55	
Min Ch El (m)	265.43	Shear (N/m ²)	1	4.56	
Wtd Sco Ch El (m)	2.18	Stream Power (N/m s)	43224.14	0	0
Frctn Loss (m)	24.37	Cum Volume (1000 m ³)	11.79	691.47	
C & E Loss (m)	2.95	Cum SA (1000 m ²)	7.43	44.47	



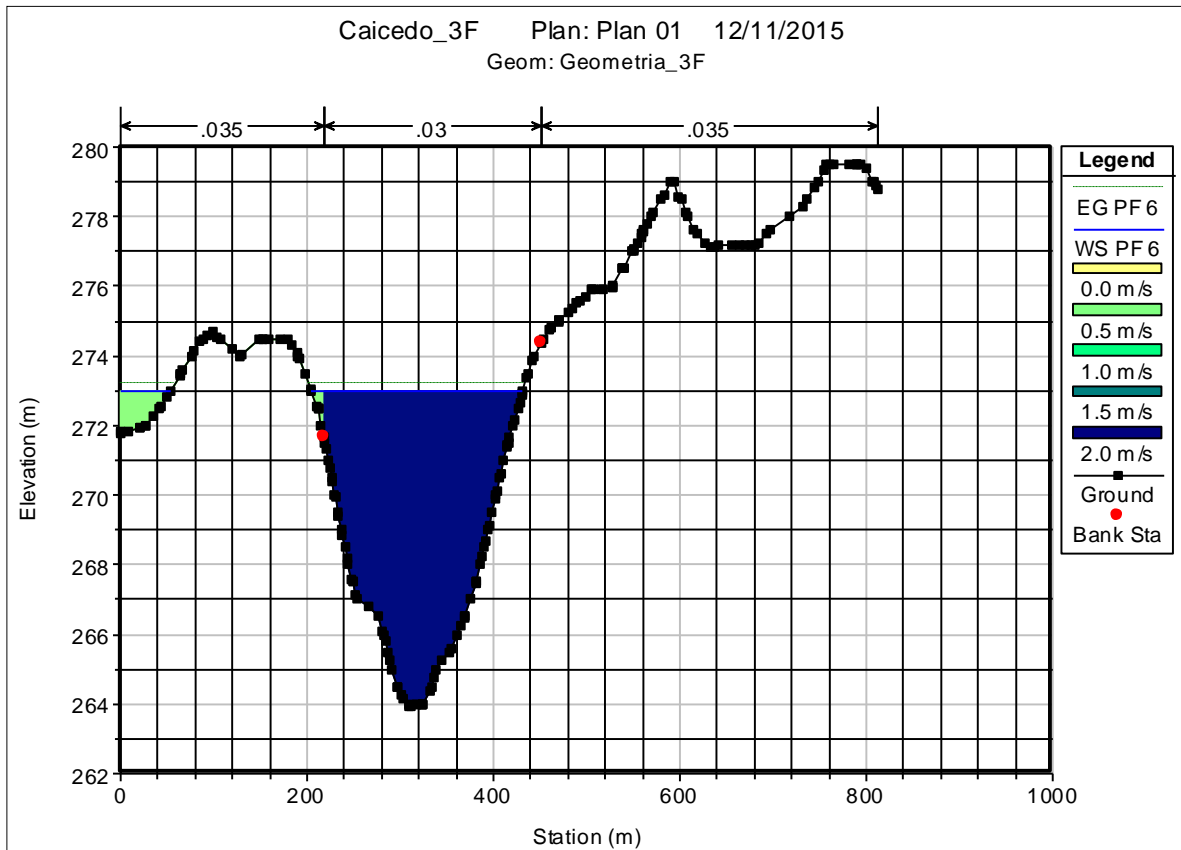
Plan: Plan 01 San Juan San_Juan RS: 478.7295 Profile: PF 6					
E.G. Elev (m)	273.47	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.09	Wt. n-Val.		0.03	
W.S. Elev (m)	273.38	Reach Len. (m)	478.73	478.73	478.73
Crit W.S. (m)	7.91	Flow Area (m2)		632.17	
E.G. Slope (m/m)	0.000261	Area (m2)		632.17	
Q Total (m3/s)	840.92	Flow (m3/s)		840.92	
Top Width (m)	161.72	Top Width (m)		161.72	
Vel Total (m/s)	1.33	Avg. Vel. (m/s)		1.33	
Max Chl Dpth (m)	7.82	Hydr. Depth (m)		3.91	
Conv. Total (m3/s)	52039.1	Conv. (m3/s)		52039.1	
Length Wtd. (m)	478.73	Wetted Per. (m)		162.89	
Min Ch El (m)	265.56	Shear (N/m2)		9.94	
Wtd Sco Ch El (m)	4.13	Stream Power (N/m s)	32006.35	0	0
Frctn Loss (m)	124.69	Cum Volume (1000 m3)	3.5	489.81	
C & E Loss (m)	2.43	Cum SA (1000 m2)			



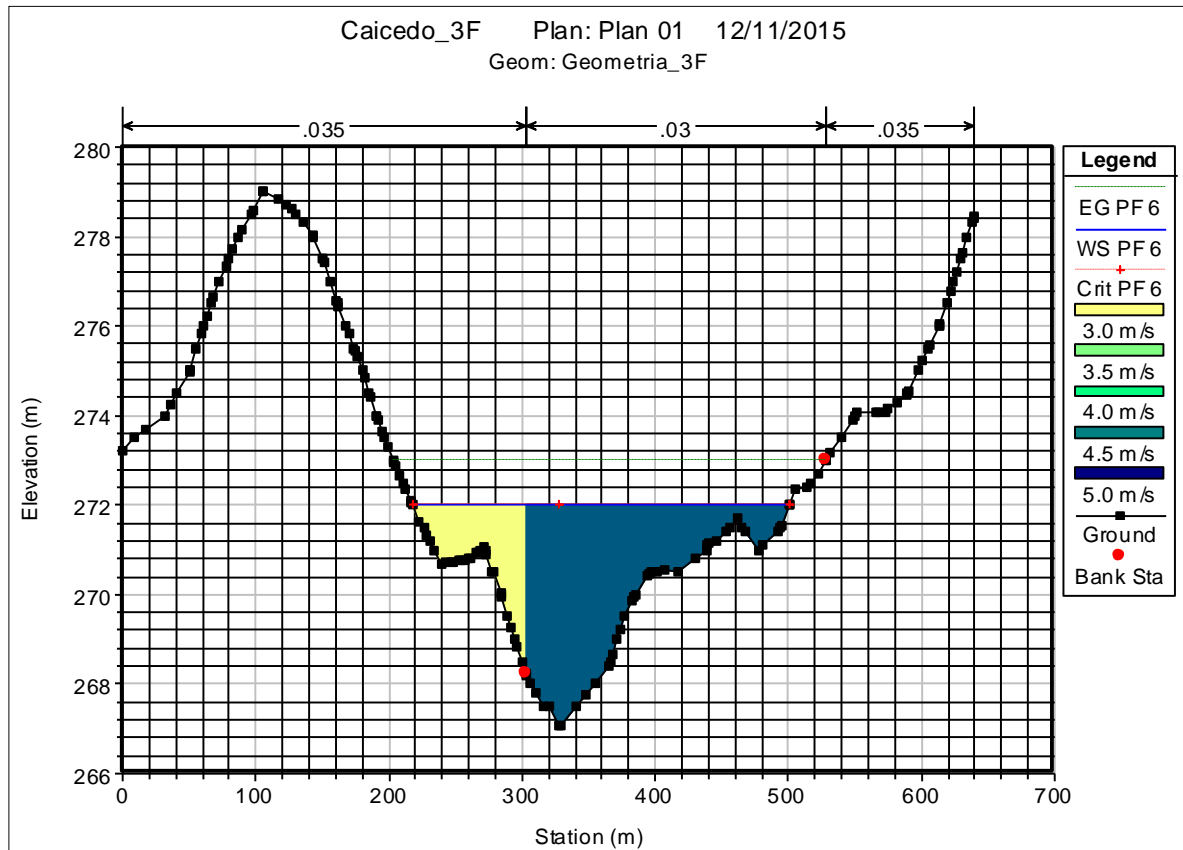
Plan: Plan 01 Putumayo Putumayo RS: 609.951 Profile: PF 6					
E.G. Elev (m)	273.34	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.15	Wt. n-Val.	0.035	0.03	
W.S. Elev (m)	273.19	Reach Len. (m)	158.69	157.26	152.64
Crit W.S. (m)	7.44	Flow Area (m2)	14.62	1414.14	
E.G. Slope (m/m)	0.000278	Area (m2)	14.62	1414.14	
Q Total (m3/s)	2427.21	Flow (m3/s)	5.35	2421.86	
Top Width (m)	281.99	Top Width (m)	21.64	260.35	
Vel Total (m/s)	1.7	Avg. Vel. (m/s)	0.37	1.71	
Max Chl Dpth (m)	7.29	Hydr. Depth (m)	0.68	5.43	
Conv. Total (m3/s)	145658.5	Conv. (m3/s)	321	145337.6	
Length Wtd. (m)	157.28	Wetted Per. (m)	21.72	261.21	
Min Ch El (m)	265.9	Shear (N/m2)	1.83	14.74	
Wtd Sco Ch El (m)	11.53	Stream Power (N/m s)	44039.5	0	0
Frctn Loss (m)	47.97	Cum Volume (1000 m3)	39.39	571.75	
C & E Loss (m)	1.86	Cum SA (1000 m2)	42.91	131.55	



Plan: Plan 01 Putumayo Putumayo RS: 452.6949 Profile: PF 6					
E.G. Elev (m)	273.28	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.15	Wt. n-Val.	0.035	0.03	
W.S. Elev (m)	273.13	Reach Len. (m)	188.37	190.35	194.21
Crit W.S. (m)	6.38	Flow Area (m2)	109.32	1355.04	
E.G. Slope (m/m)	0.000484	Area (m2)	109.32	1355.04	
Q Total (m3/s)	2427.21	Flow (m3/s)	61.06	2366.15	
Top Width (m)	498.44	Top Width (m)	130	368.44	
Vel Total (m/s)	1.66	Avg. Vel. (m/s)	0.56	1.75	
Max Chl Dpth (m)	6.23	Hydr. Depth (m)	0.84	3.68	
Conv. Total (m3/s)	110280.6	Conv. (m3/s)	2774.1	107506.5	
Length Wtd. (m)	190.32	Wetted Per. (m)	130.6	369.02	
Min Ch El (m)	266.9	Shear (N/m2)	3.98	17.44	
Wtd Sco Ch El (m)	11.23	Stream Power (N/m s)	43679.95	0	0
Frctn Loss (m)	81.63	Cum Volume (1000 m3)	29.56	354.01	
C & E Loss (m)	2.04	Cum SA (1000 m2)	30.87	82.1	



Plan: Plan 01 Putumayo Putumayo RS: 262.3434 Profile: PF 6					
E.G. Elev (m)	273.2	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.19	Wt. n-Val.	0.035	0.03	
W.S. Elev (m)	273.01	Reach Len. (m)	161.11	129.68	120.72
Crit W.S. (m)	9.26	Flow Area (m2)	52	1228.25	
E.G. Slope (m/m)	0.000337	Area (m2)	52	1228.25	
Q Total (m3/s)	2427.21	Flow (m3/s)	22.91	2404.3	
Top Width (m)	281	Top Width (m)	67.22	213.78	
Vel Total (m/s)	1.9	Avg. Vel. (m/s)	0.44	1.96	
Max Chl Dpth (m)	9.07	Hydr. Depth (m)	0.77	5.75	
Conv. Total (m3/s)	132234.8	Conv. (m3/s)	1247.9	130986.8	
Length Wtd. (m)	132.31	Wetted Per. (m)	68.54	214.63	
Min Ch El (m)	263.94	Shear (N/m2)	2.51	18.91	
Wtd Sco Ch El (m)	14.25	Stream Power (N/m s)	38901.73	0	0
Frctn Loss (m)	46.75	Cum Volume (1000 m3)	14.36	108.15	
C & E Loss (m)	2.32	Cum SA (1000 m2)	12.3	26.69	



Plan: Plan 01 Putumayo Putumayo RS: 132.6617 Profile: PF 6					
E.G. Elev (m)	273	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	1	Wt. n-Val.	0.035	0.03	
W.S. Elev (m)	272	Reach Len. (m)			
Crit W.S. (m)	272.00	Flow Area (m2)	126.29	439.67	
E.G. Slope (m/m)	0.006718	Area (m2)	126.29	439.67	
Q Total (m3/s)	2427.21	Flow (m3/s)	383.17	2044.04	
Top Width (m)	283.31	Top Width (m)	85.45	197.87	
Vel Total (m/s)	4.29	Avg. Vel. (m/s)	3.03	4.65	
Max Chl Dpth (m)	4.94	Hydr. Depth (m)	1.48	2.22	
Conv. Total (m3/s)	29613.7	Conv. (m3/s)	4675	24938.7	
Length Wtd. (m)	5.94	Wetted Per. (m)	85.63	198.07	
Min Ch El (m)	267.06	Shear (N/m2)	97.16	146.23	
Wtd Sco Ch El (m)	10.22	Stream Power (N/m s)	30601.61	0	0
Frctn Loss (m)	78.36	Cum Volume (1000 m3)			
C & E Loss (m)	1.50	Cum SA (1000 m2)			

6.2. ESTUDIO DE DINÁMICA FLUVIAL

A continuación se listan los diferentes escenarios de cambio con los vectores de cambio identificados para cada uno de los sectores de análisis fluvial.

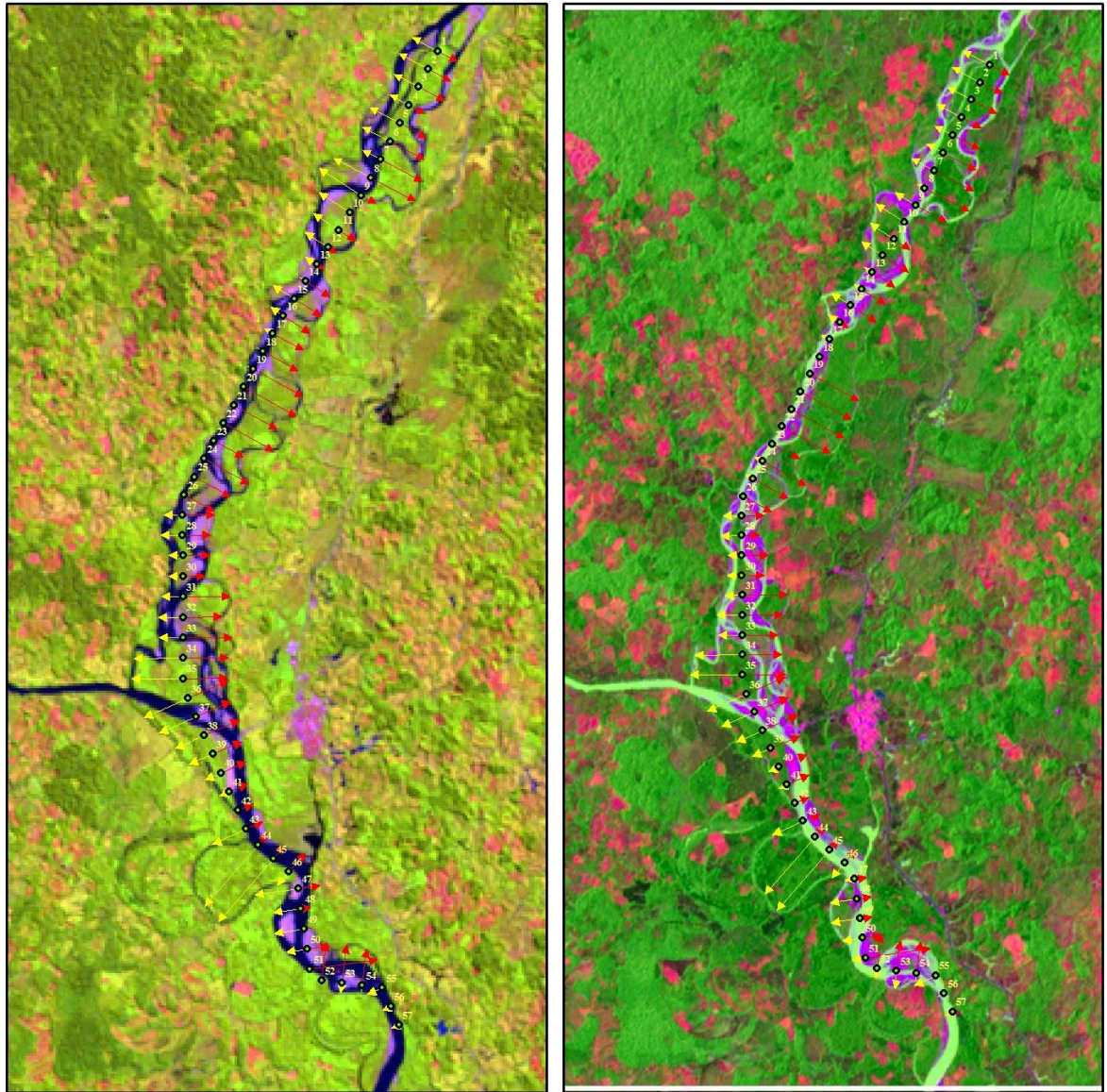


Figura 12. Vectores de cambio de dinámica entre 1999-2002

Entre el año 1999 – 2002, los principales cambios se presentan en las secciones 35 a 38, en margen izquierda aguas abajo, con evidencias de expansión del cauce y la identificación de huellas de bancos de arena, además de la ampliación de la frontera agrícola entre las secciones 27 y 30.

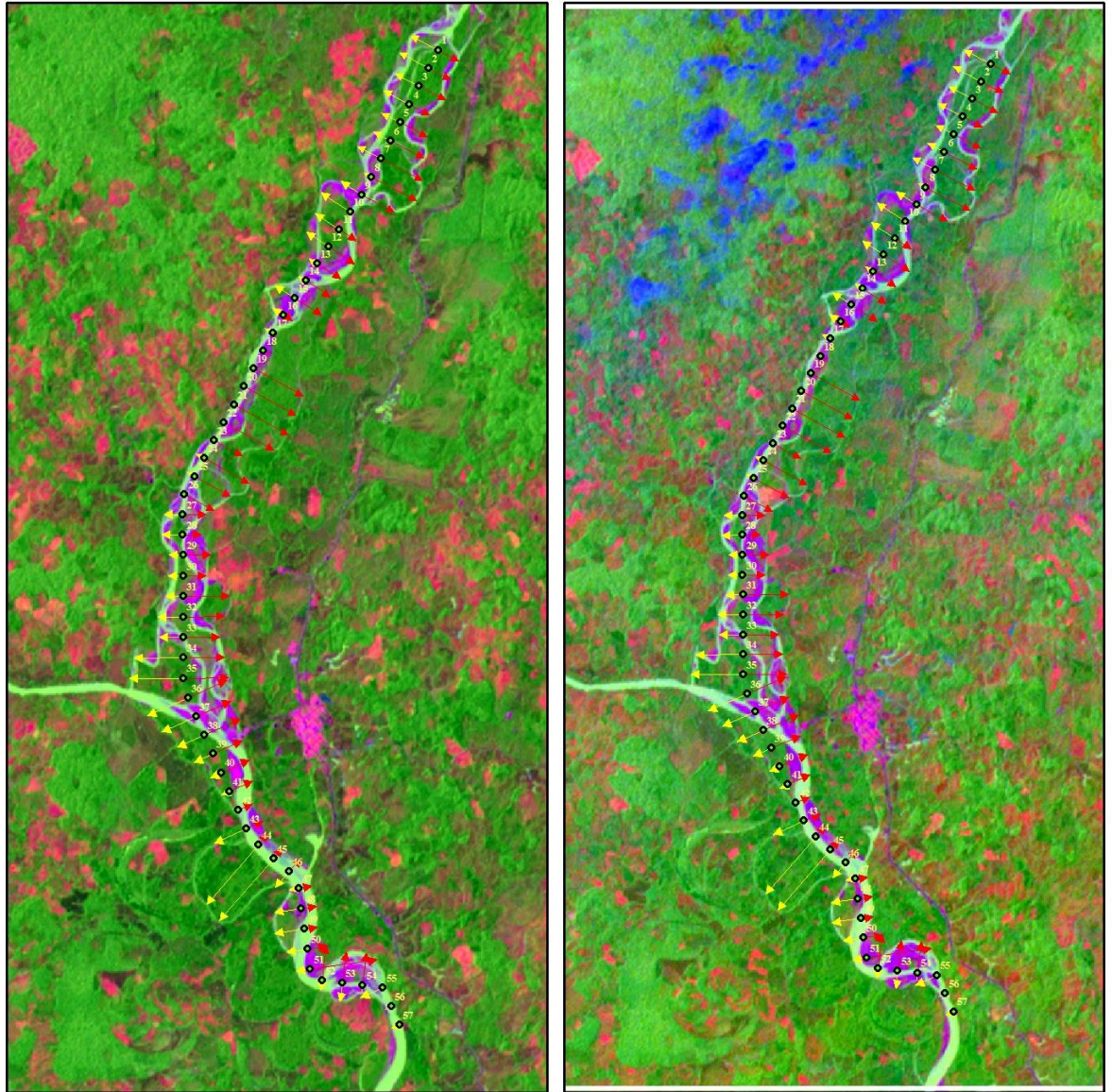


Figura 13. Vectores de cambio de dinámica entre 2002-2003

Durante éste periodo de análisis se observa la disminución del espejo de agua en los carros ocasionales de la margen derecha del río Putumayo, del mismo modo, el análisis sugiere una vista sobre la sección 26 donde se identifica un cultivo de pan coger establecido en una isla del río.

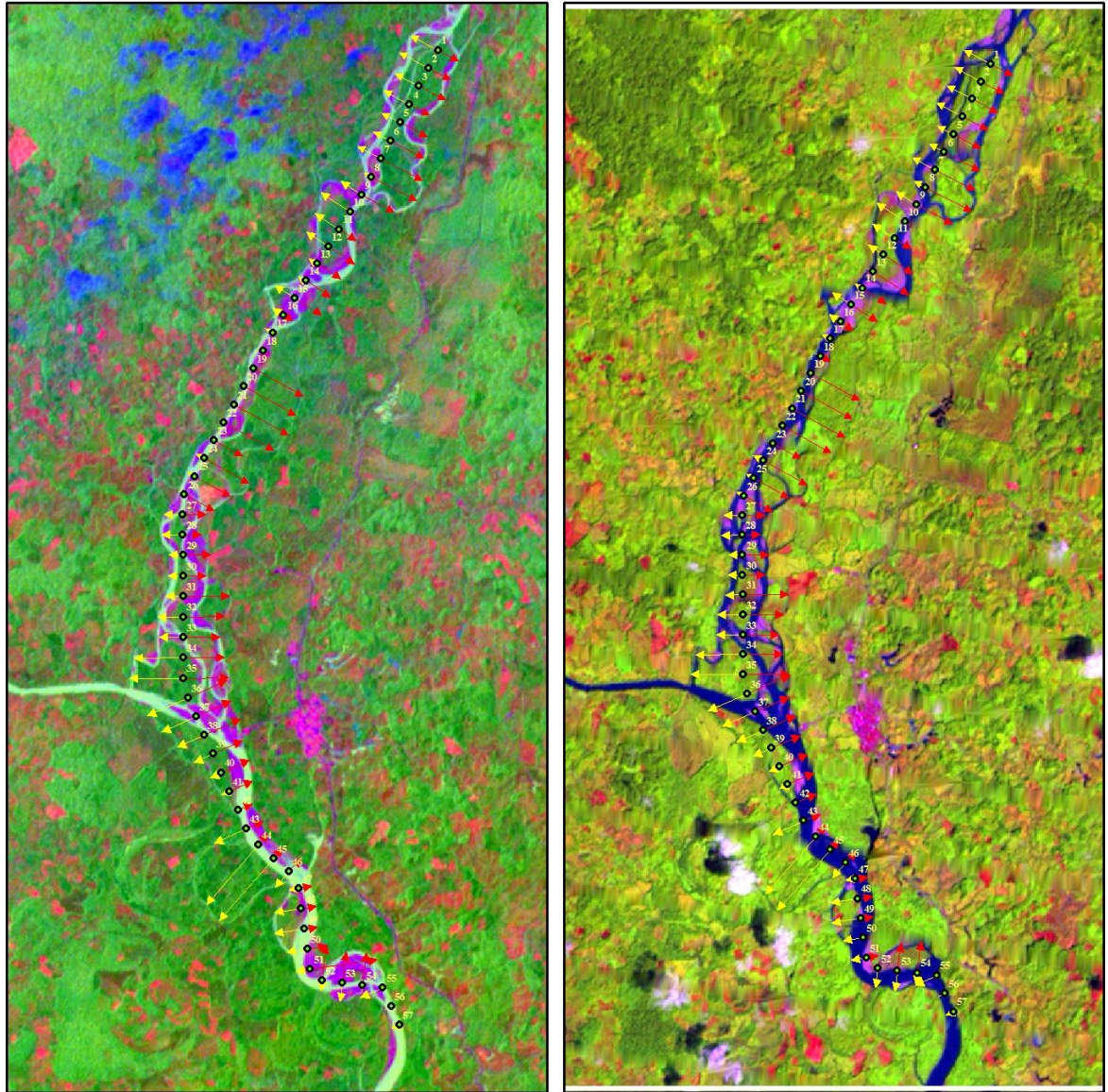


Figura 14. Vectores de cambio de dinámica entre 2003-2004

La ilustración anterior indica como en la sección 33 se rompe el anastomosamiento del río y se unen las corrientes principales para localizarse en la margen izquierda aguas abajo. La imagen también indica el mismo fenómeno entre las secciones 26 a 29, pero en éste caso, la tendencia de apoyo del cauce se realiza sobre la margen derecha.

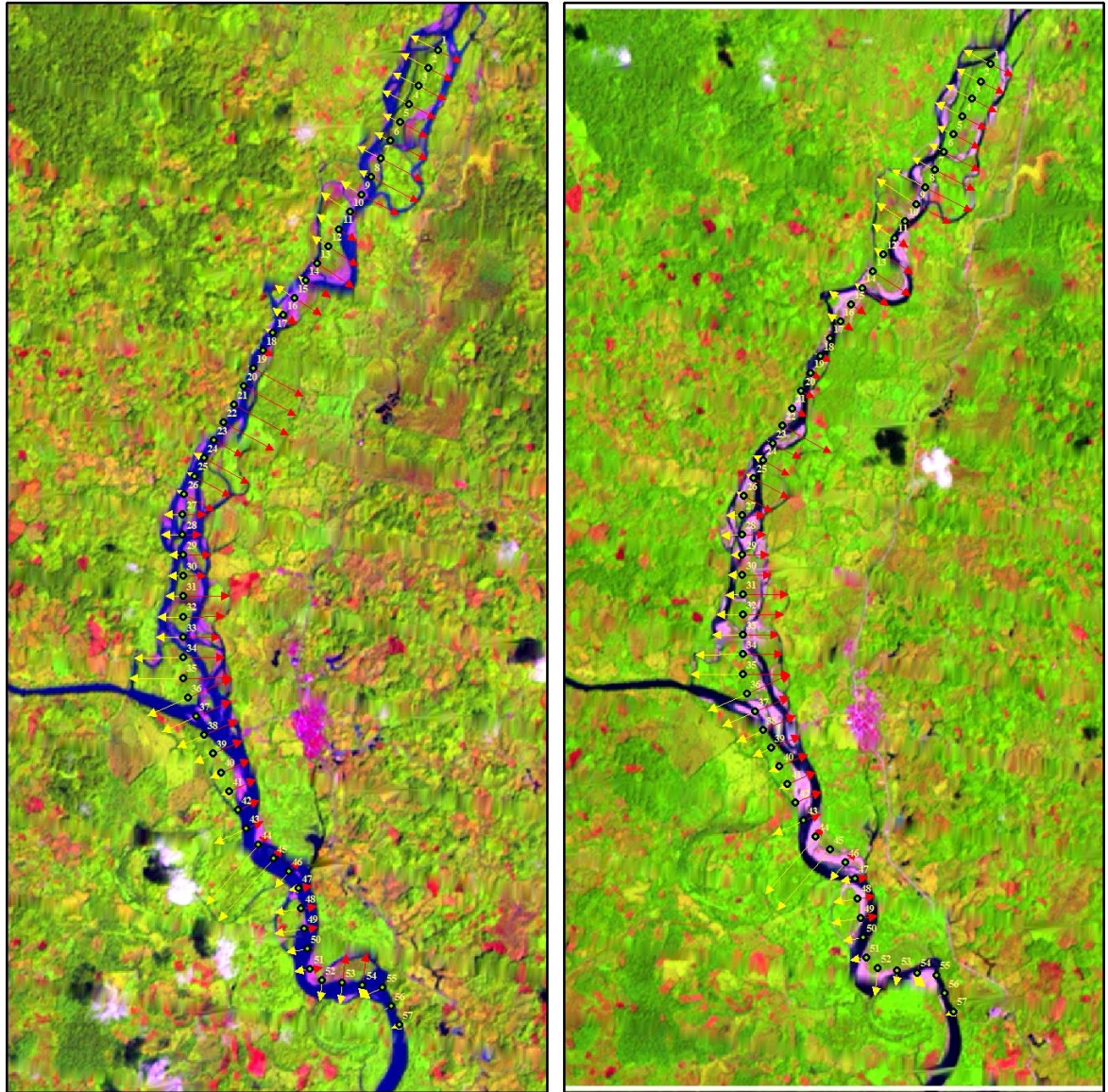


Figura 15. Vectores de cambio de dinámica entre 2004-2006

En éste periodo se presentan los cambios más significativos; empezando por la sección 14 donde se abandona el cauce ocasional de la margen izquierda, otro de los cambios fuertes se da en la sección 33-34, donde se presentan huellas de arena donde anteriormente se había unido el cauce.

La sección 37 que por inherencia al estudio nos ocupa presenta un cambio significativo donde el cauce se “ahorca” en una única línea hidráulica, evidenciando grandes bancos de arena sobre la caída del río San Juan. Desde este punto, las condiciones de sedimentación lateral son evidentes en todo el recorrido aguas abajo.

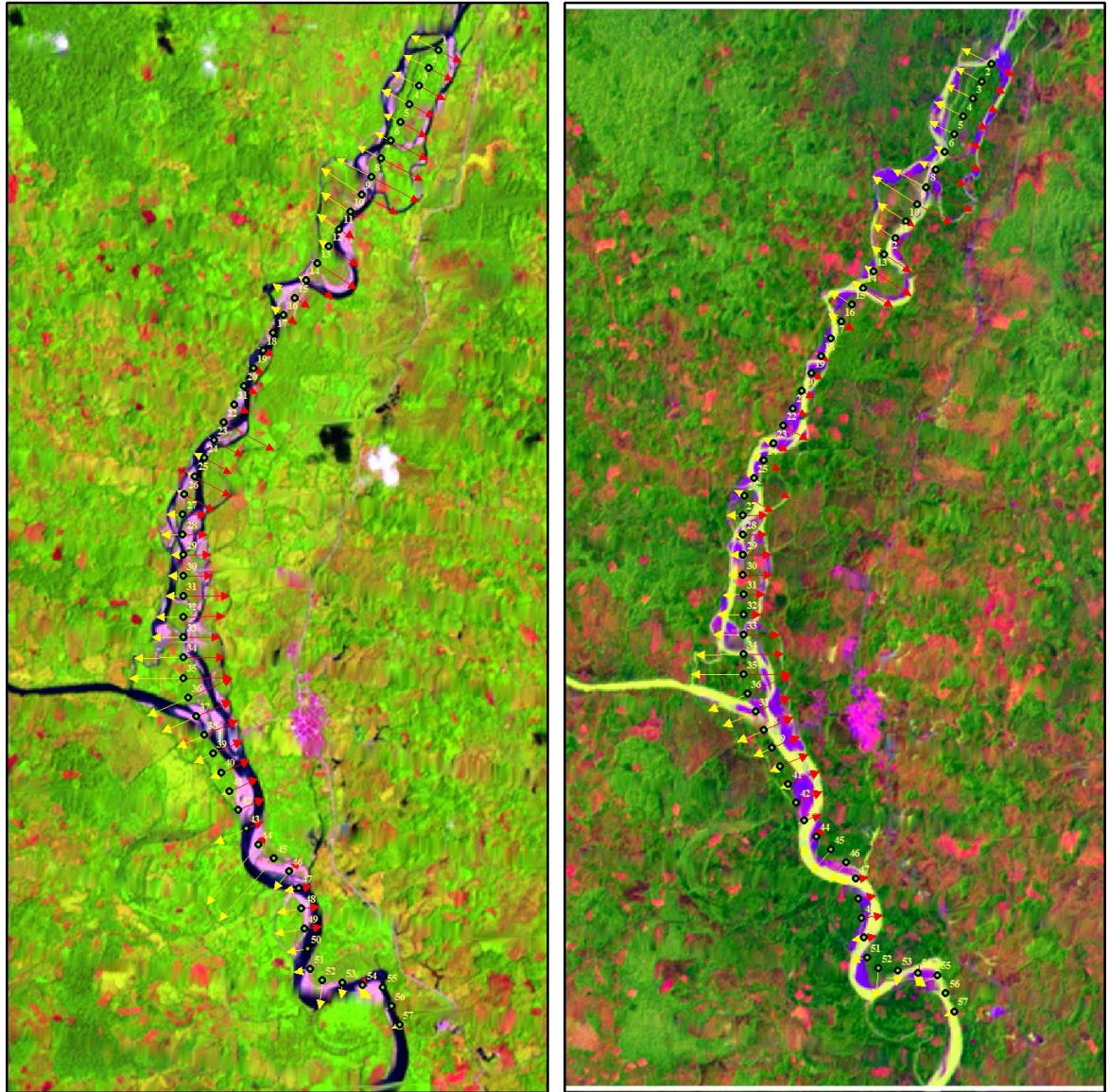


Figura 16. Vectores de cambio de dinámica entre 2006-2009

Para el caso de ésta temporalidad se puede identificar de manera evidente como la sección de análisis 37 indica un cambio del sentido de la corriente hacia la margen izquierda (desembocadura del río San Juan), dejando libre un área significativa (2.2 ha) de cuerpos de arena. El desplazamiento de la margen en ésta ocasión es de 53 metros.

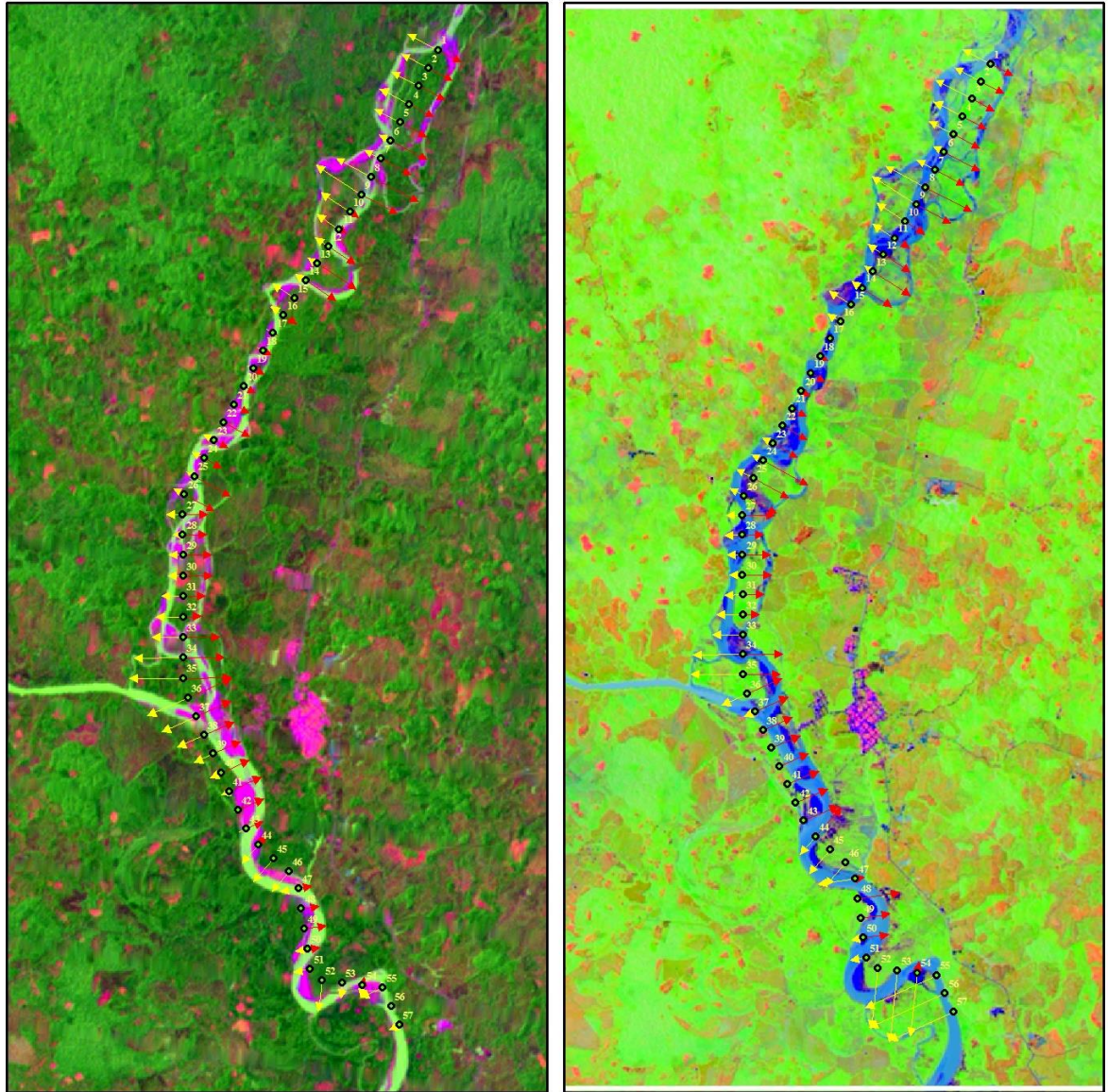


Figura 17. Vectores de cambio de dinámica entre 2009-2013

El cambio comprendido entre los años 2009 y 2013 es significativo, no solo por la dinámica fluvial del río, sino por la evidencia de un asentamiento urbano discontinuo cercano a las zonas que anteriormente presentaban condiciones de cauce ocasional, esto particularmente es visible en la sección 39. Para el caso de la dinámica se observa un desplazamiento de 22 metros hacia el costado izquierdo en dirección al asentamiento.

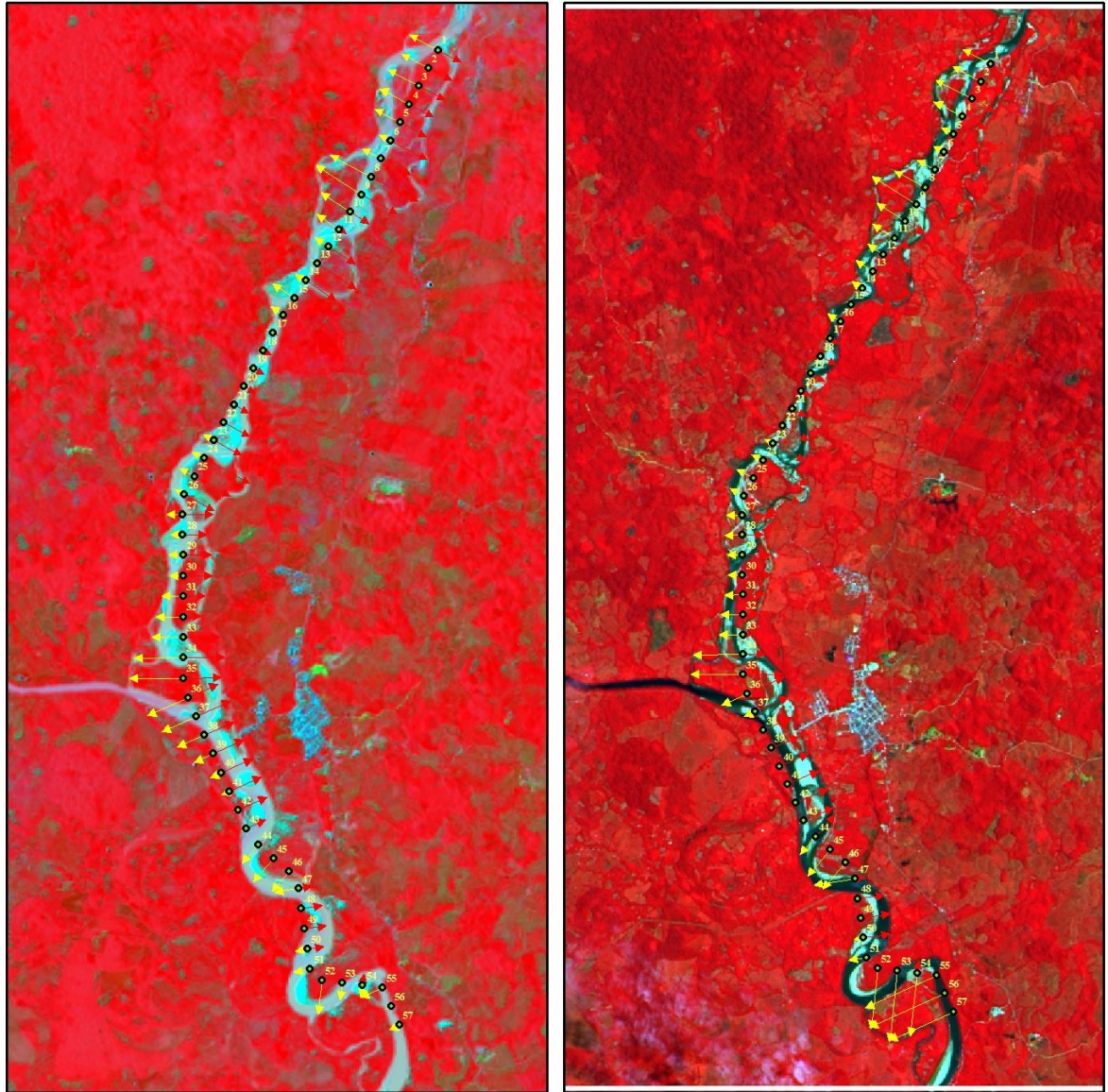


Figura 18. Vectores de cambio de dinámica entre 2013-2015

El último periodo de cambio sugiere nuevamente un desplazamiento del meandro localizado entre la sección 35 y 36, el cual tiene una magnitud de 14 metros, con dirección a la margen izquierda, y es éste el lugar donde actualmente se encuentra dispuesto el espejo de agua de la fuente.

Adicionalmente a los esquemas gráficos de cambio relacionados anteriormente, como producto matemático del análisis de cambio multitemporal de la dinámica fluvial del río Putumayo en cada una de las secciones analizadas, se elaboró un registro de la distancia desde el eje de máxima verisimilitud a cada uno de los lados de la fuente, así mismo se calculó el promedio desplazado, y la desviación standard,

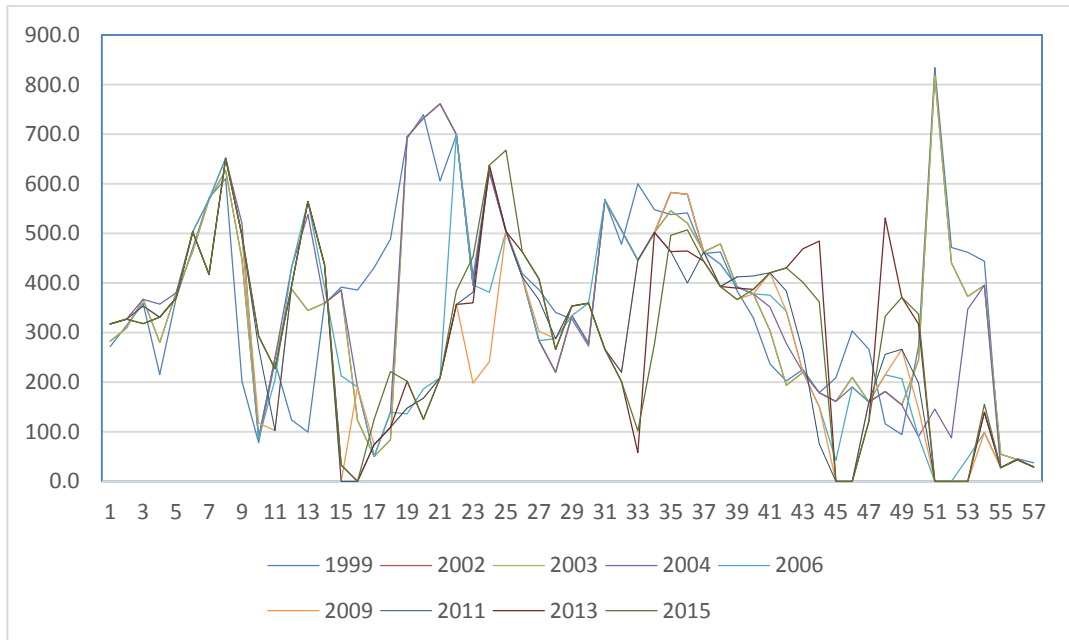
que para éste caso se comporta como la rata de cambio y variación en cada uno de los nodos de análisis.

Id	1999	2002	2003	2004	2006	2009	2011	2013	2015	Media (x̄)	Desv-Stand	Máx DE
1	271.6	282.5	282.5	317.7	317.7	317.7	317.7	317.7	317.7	304.7	19.6	317.7
2	314.0	308.8	308.8	327.1	327.1	327.1	327.1	327.1	327.1	321.6	8.4	327.1
3	358.5	366.7	366.7	366.7	353.3	353.3	353.3	318.0	318.0	350.5	19.3	366.7
4	215.5	280.0	280.0	357.4	331.1	331.1	331.1	331.1	331.1	309.8	43.6	357.4
5	369.2	380.2	380.2	380.2	369.9	369.9	369.9	369.9	369.9	373.2	5.3	380.2
6	470.3	464.0	464.0	503.2	503.2	503.2	503.2	503.2	503.2	490.8	18.6	503.2
7	571.7	568.5	568.5	568.5	568.5	417.4	417.4	417.4	417.4	501.7	80.0	571.7
8	610.4	626.5	626.5	651.4	651.4	651.4	651.4	651.4	651.4	641.3	15.8	651.4
9	201.1	446.9	446.9	519.6	495.4	495.4	495.4	495.4	495.4	454.6	98.1	519.6
10	78.1	86.1	86.1	86.1	86.1	117.3	268.7	292.6	292.6	154.9	98.2	292.6
11	240.2	248.1	248.1	248.1	204.5	102.2	102.2	226.8	226.8	205.2	60.1	248.1
12	123.4	387.9	387.9	431.5	431.5	394.2	394.2	394.2	394.2	371.0	94.4	431.5
13	99.2	344.6	344.6	538.3	564.4	564.4	564.4	564.4	564.4	461.0	164.8	564.4
14	357.7	359.5	359.5	359.5	391.1	436.9	436.9	436.9	436.9	397.2	39.0	436.9
15	391.3	385.9	385.9	385.9	213.1	0.0	0.0	32.4	32.4	203.0	185.9	391.3
16	386.1	123.1	123.1	190.4	190.4	190.4	0.0	0.0	0.0	133.7	126.1	386.1
17	430.8	50.3	50.3	50.3	50.3	74.2	74.2	74.2	124.7	108.9	123.1	430.8
18	488.7	83.8	83.8	139.0	139.0	109.1	109.1	109.1	220.9	164.7	128.3	488.7
19	691.8	695.0	695.0	695.0	135.7	147.9	147.9	201.9	201.9	401.3	278.8	695.0
20	739.3	732.4	732.4	732.4	186.4	167.7	167.7	124.8	124.8	412.0	306.2	739.3
21	606.2	761.8	761.8	761.8	208.9	208.9	208.9	208.9	208.9	437.3	275.1	761.8
22	698.1	699.3	699.3	699.3	699.3	356.8	356.8	356.8	384.5	550.0	177.0	699.3
23	412.7	396.3	396.3	396.3	396.3	198.1	381.2	359.7	453.0	376.7	71.5	453.0
24	628.0	624.9	624.9	624.9	381.1	241.2	637.4	637.4	637.4	559.7	145.3	637.4
25	506.1	503.9	503.9	503.9	503.9	503.9	503.9	503.9	668.1	522.4	54.6	668.1
26	418.8	412.0	412.0	412.0	412.0	412.0	412.0	462.8	462.8	424.1	22.1	462.8
27	386.2	283.5	283.5	283.5	283.5	302.6	366.0	408.6	408.6	334.0	57.1	408.6
28	340.6	219.6	219.6	219.6	287.3	287.3	287.3	265.4	265.4	265.8	40.9	340.6
29	326.8	334.3	334.3	334.3	334.3	353.2	353.2	353.2	353.2	341.9	11.0	353.2
30	273.1	278.2	278.2	278.2	359.1	359.1	359.1	359.1	359.1	322.6	43.4	359.1
31	568.3	567.1	567.1	567.1	567.1	266.2	266.2	266.2	266.2	433.5	158.7	568.3
32	478.2	506.6	506.6	506.6	506.6	220.0	220.0	200.8	200.8	371.8	153.5	506.6
33	599.9	445.6	445.6	445.6	445.6	445.6	445.6	57.6	101.6	381.4	178.8	599.9
34	547.9	501.7	501.7	501.7	501.7	501.7	501.7	501.7	277.5	481.9	78.2	547.9
35	538.3	545.6	545.6	582.5	582.5	582.5	463.3	463.3	496.0	533.3	48.4	582.5
36	541.2	520.8	520.8	578.8	578.8	578.8	400.2	464.7	507.3	521.3	59.6	578.8

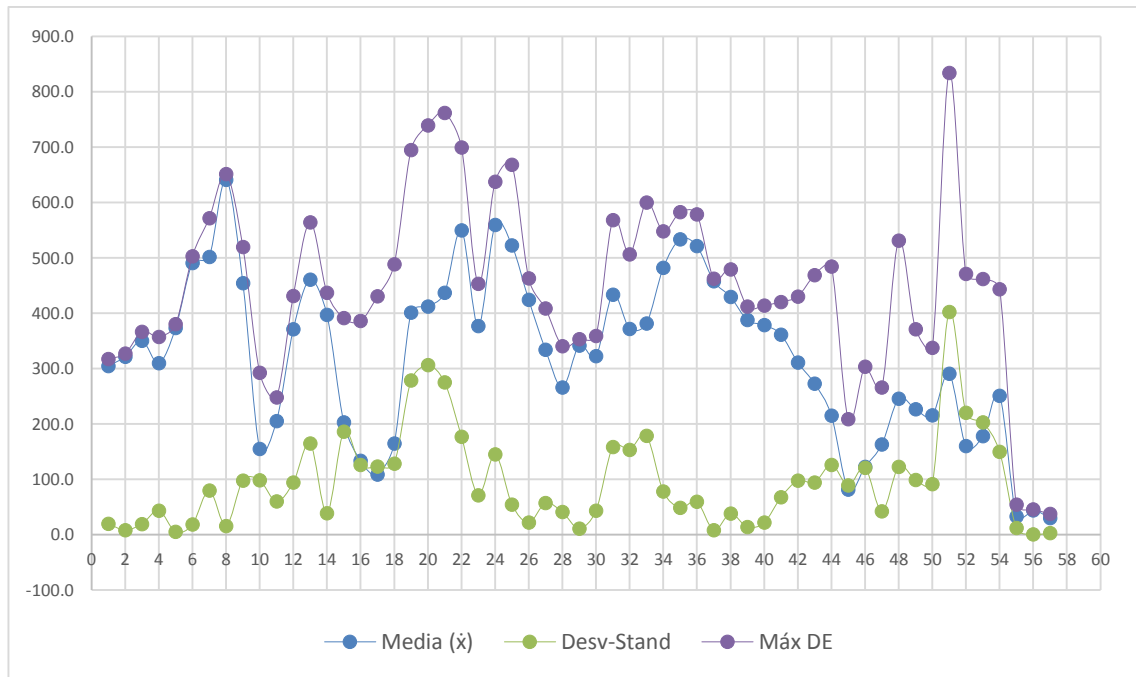
Id	1999	2002	2003	2004	2006	2009	2011	2013	2015	Media (\bar{x})	Desv-Stand	Máx DE
37	459.1	462.7	462.7	462.7	462.7	462.7	462.7	443.6	443.6	458.0	8.2	462.7
38	462.7	479.0	479.0	437.8	437.8	392.7	392.7	392.7	392.7	429.7	38.0	479.0
39	384.8	392.3	392.3	392.3	392.3	366.9	412.0	389.5	366.6	387.6	14.0	412.0
40	329.4	378.1	378.1	378.1	378.1	378.1	414.0	387.2	387.2	378.7	21.8	414.0
41	236.6	303.7	303.7	351.9	375.1	420.5	420.5	420.5	420.5	361.4	67.5	420.5
42	202.6	193.6	193.6	278.1	342.9	342.9	383.8	430.3	430.3	310.9	97.6	430.3
43	225.9	219.7	219.7	219.7	219.7	219.7	260.3	469.0	401.2	272.7	94.5	469.0
44	178.8	178.3	178.3	178.3	150.1	150.1	75.1	484.3	361.8	215.0	126.2	484.3
45	208.8	161.1	161.1	161.1	42.2	0.0	0.0	0.0	0.0	81.6	89.0	208.8
46	303.3	209.6	209.6	189.9	189.9	0.0	0.0	0.0	0.0	122.5	120.9	303.3
47	266.1	159.8	159.8	159.8	159.8	159.8	159.8	121.4	121.4	163.1	42.1	266.1
48	115.7	181.2	181.2	181.2	214.9	214.9	255.9	531.2	333.0	245.5	122.7	531.2
49	94.2	154.2	154.2	154.2	207.1	266.3	266.3	371.1	371.1	226.5	99.1	371.1
50	272.3	243.6	243.6	90.3	90.3	146.1	198.4	317.2	337.7	215.5	91.2	337.7
51	834.3	818.0	818.0	145.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	290.6	402.4	834.3
52	471.4	440.4	440.4	87.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	160.0	220.1	471.4
53	461.9	372.9	372.9	347.2	47.0	0.0	0.0	0.0	0.0	178.0	202.8	461.9
54	443.7	395.4	395.4	395.4	98.7	98.7	139.4	139.4	155.2	251.2	150.1	443.7
55	27.8	54.4	54.4	27.2	27.2	27.2	27.2	27.2	27.2	33.3	12.0	54.4
56	45.8	43.7	43.7	43.7	43.7	43.7	43.7	43.7	43.7	43.9	0.7	45.8
57	37.5	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	30.0	2.8	37.5

Tabla 7. Relación de variación de los vectores de desplazamiento del cauce respecto al eje de máxima verisimilitud.

De acuerdo a la tabla anterior se puede observar que los perfiles que tiene mayor cambio son los comprendidos entre las secciones 31 y 34, pero en éste caso son variaciones son negativas, es decir; los cauces ocasionales fueron abandonados.



Gráfica 15. Lineamientos de cambio en las secciones transversales



Gráfica 16. Variaciones estadísticas del comportamiento de las secciones.

6.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo a los perfiles transversales se evidencia que en todas las secciones transversales construidas para calcular los valores de inundación y socavación, se

supera un tirante hidráulico de metros sobre el área inundada. Del mismo modo, se particulariza cómo el factor de socavación general aumenta progresivamente aguas abajo, tomando sus picos por encima de los 9 metros en el meandro anterior a la confluencia con el río San Juan, el cual al parecer actúa en simultáneo con el río Putumayo como disipador de energía; es así como el río San Juan reduce velocidad al Putumayo retornando cotas aguas arriba y el Putumayo contrae la energía que lleva el otro afluente, que de por sí conduce sus aguas con una cinética superior, que es totalmente normal si consideramos su pendiente, ancho del talweg y la baja socavación lateral.

Otro de los valores interesantes de ésta modelación son los pesos de socavación lateral por expansión, los cuales aumentan en cada una de las huellas del cauce, llegando a alcanzar hasta los 20 metros en el período más crítico. Es por esto y las consideraciones de inundabilidad que el diseñador debe fijar su análisis para montaje y disposición de estructura en alturas y empotramiento entre las secciones 1712.26 y 503.6633 aguas abajo.

Es importante realizar análisis puntual a cada uno de los factores de energía y acumulación de volumen / área, potencial de cizallamiento, potencia de la corriente, y del mismo modo corroborar su afectación en la Figura 12 y Figura 13.

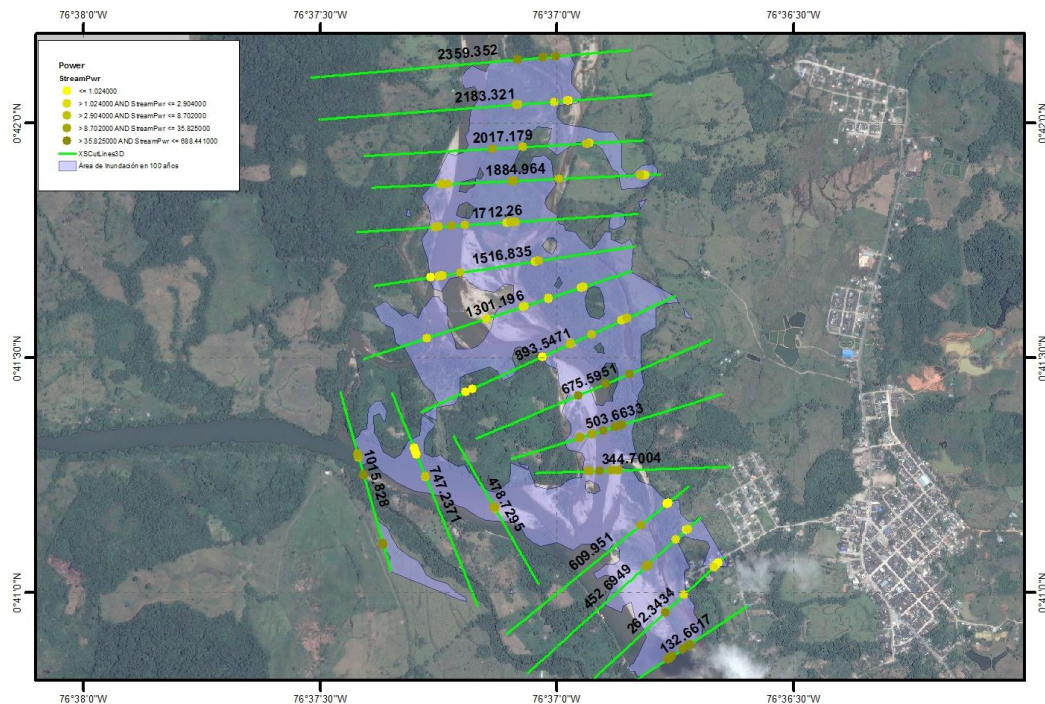


Figura 19. Potencia Total de la Corriente (N/m.s)

La Figura 12 representa la potencia total de la energía en cada una de las secciones evaluadas, donde la mayor incidencia de la carga hidráulica se reposa sobre las secciones 675.5951, 503.6633 y 344.7904, éste mismo fenómeno ocurre con los

datos de esfuerzo cortante, en las mismas secciones, como se evidencia en la Figura 13.

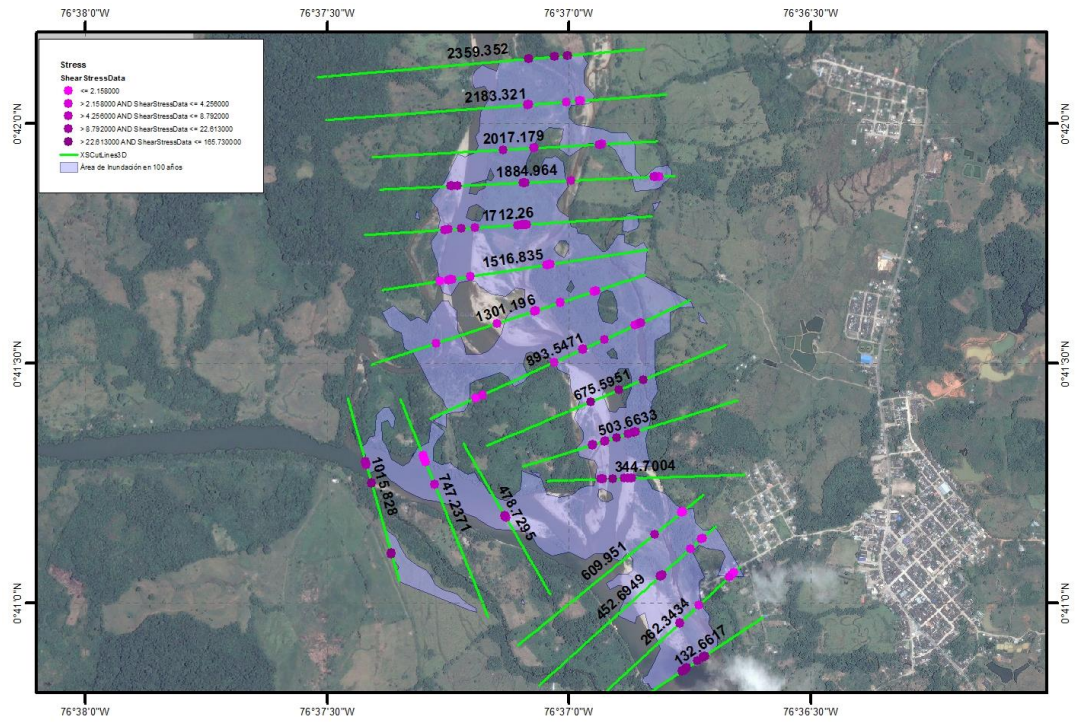


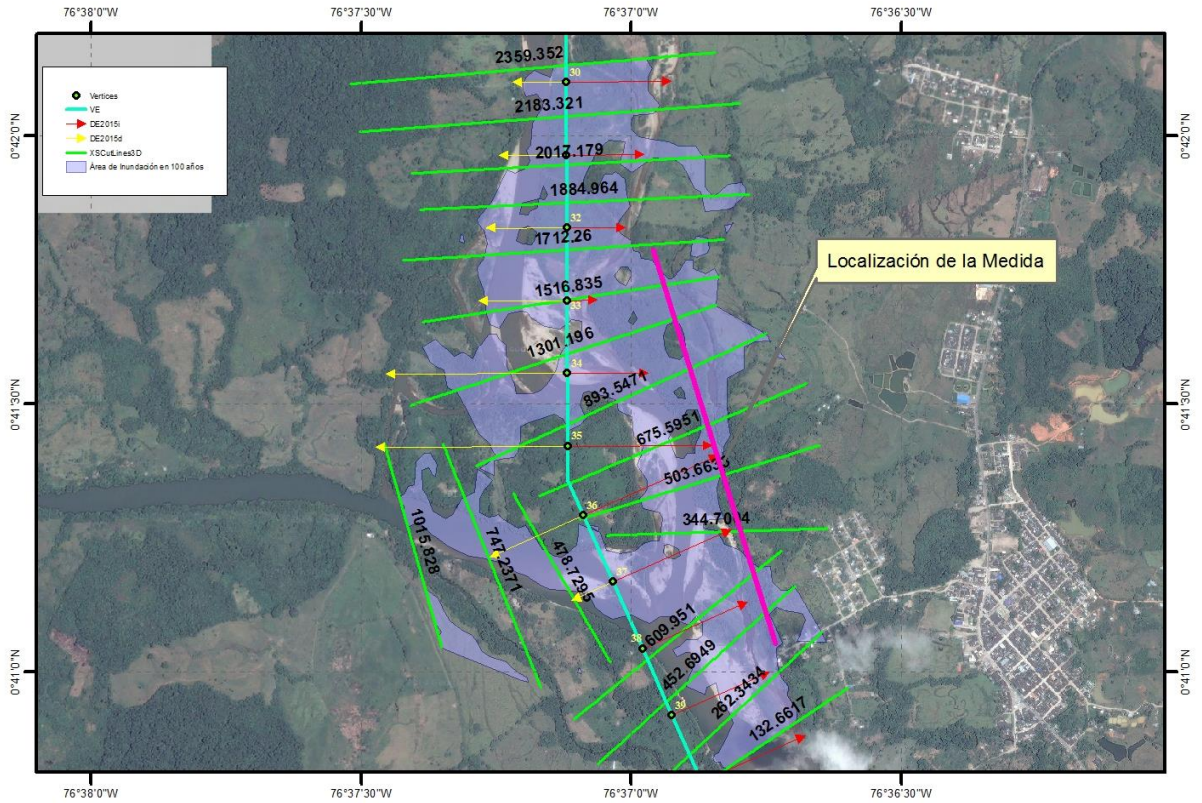
Figura 20. Esfuerzo cortante N/m²

Una de las razones por las cuales se presentan socavaciones de fondo significativas está no solo asociada a los perfiles estratigráficos de gradación, sino a los factores de velocidad final del flujo, donde los valores de mayor magnitud se conservan linealmente sobre el fondo del canal, indicando que al existir socavación de fondo con interacción de expansión lateral, la mayoría de materiales de arrastre están siendo transportados aguas abajo, y que las huellas que se evidencian en las imágenes de satélite solo son el producto de la migración de la red anastomosada.

Teniendo en cuenta la anterior expresión, el diseñador de la medida estructural, deberá preparar un modelo constructivo que permita transportar y/o contraer velocidades superiores a los 4 m/s, puesto que la misma sinergia de fondo, la velocidad de superficie y la pendiente promedio del lugar indicaría que se generan corrientes turbulentas en las secciones medias del tirante hidráulico promedio.

Conjugado éste análisis con la información obtenida en el componente de dinámica fluvial, se puede indicar que los núcleos de variación más significativa se presentan en las secciones 30 a 37 sobre el área de importancia del proyecto, lo que sugiere en conjunto con los estudios hidráulicos de inundación y socavación que la medida debería tener al menos una dimensión lineal de 1.500 metros, la orientación según la posición de desplazamiento del cauce debería tener un azimut aproximado de

165°, cuyas localizaciones deberían localizarse sobre coordenadas aproximadas 76°36'58.13"W 0°41'47.02"N aguas arriba, 76°36'43.407"W 0°41'2.724"N aguas abajo, así como se observa en la Gráfica 17.



Gráfica 17. Localización de la medida de control sobre el escenario de máxima avenida, socavación y dinámica fluvial.

7. CONCLUSIONES

El estudio hidrológico para pronóstico de inundación, de caudales que en exceso que superan ampliamente la capacidad del Talweg para superar volúmenes máximos. De igual manera se identifica que las corrientes aportantes del Alto Putumayo son las que poseen la mayor capacidad de rendimientos hídricos para generar el caudal máximo previsto en los tiempos de retorno evaluados.

El modelo de simulación hidráulica con HEC-RAS, indica que las áreas donde actualmente se asienta los barrios Modelo de Paz y La Playa son susceptibles de amenaza por inundación en los tiempos de retorno a partir de los 25 años.

Las propiedades hidráulicas del afluente que supera los niveles de contención geométrica del cauce son altamente significativas en el periodo de los 100 años, alcanzando hasta 2.7 m/s en velocidad, socavaciones de hasta 15 metros, expansión lateral de 11 metros, tensión de cizallamiento de 688 KN / m.s, que inundan hasta una altura de 12.7 metros las zonas bajas de la huella hídrica del río Putumayo.

La dinámica del Río Putumayo es muy variable, constancia de esto es que ninguna de las secciones evaluadas en el tiempo de análisis conserva estático su línea hidráulica, la cual se desplaza en secciones críticas como la 31 y 34 a longitudes superiores a los 400 metros, lo cual va más allá de las dimensiones del Talweg que actualmente conduce las aguas del río.

El escenario crítico observado en la presente investigación y los resultados obtenidos en los diferentes modelos y rutinas computacionales da a entender que de ninguna manera el Municipio de Puerto Caicedo puede promover o permitir que el área de expansión urbana se diagonalice a menos de 800 metros sobre la línea hidráulica actual de la margen izquierda aguas abajo, puesto que ésta distancia debería ser la regalada en la norma de ordenamiento territorial que fija las franjas de protección, que más allá de contextualizarse en el componente ambiental de las franjas de protección, constituye una medida no estructural que reduciría la amenaza por inundación y el riesgo de pérdida progresiva de bienes económicos, como vidas humanas.

La medida prevista como un muro que tendría una longitud de 1500 metros y que se distribuya de forma paralela al cauce, solo constituye un bosquejo semi-detallado de la estructura que reduciría la amenaza; ésta deberá ser proyectada de forma apropiada de acuerdo con las normas de diseño y construcción que se manejan en el país.

La metodología empleada se ha basado tácitamente en empleo de herramientas libres, tanto en software como en insumos de trabajo. Conseguir los resultados que se obtuvo en el presente trabajo se convierte en un referente sobre lo que pueden realizar muchos municipios que por condiciones económicas no tienen acceso a datos o aplicaciones especializadas. Del mismo modo se dejó en todo el proceso una metodología que puede ser fácilmente replicable.

8. RECOMENDACIONES

Ningún estudio de estas características constituye una medida certera que controlaría las fuerzas de la naturaleza, no obstante genera datos aproximados que son ampliamente aplicables en la dinámica ingenieril y que permiten diseñar y definir medidas estructurales y no estructurales para el manejo y gestión de amenazas, particularmente en este caso, de inundación.

El presente estudio como muchos que gozan de la misma naturaleza es de carácter temporal reducido; es decir, que si las medidas no se toman con la inmediatez que obligan las normas de gestión del riesgo, sus resultados deben replantearse de manera que involucre los datos a tiempo futuro, teniendo en cuenta que actualmente los fenómenos de cambio climático se presentan con mayor severidad.

Toda obra que se proyecte para reducir la amenaza deberá ajustarse a las condiciones geotécnicas del lugar, y por tratarse de zonas anteriormente ocupadas por el río, sus anclajes deberán diseñarse en concordancia con los niveles de socavación.

Recomendar al Municipio de Puerto Caicedo incluir estas zonas de inundación en la zonificación de categoría alta en el PMGR y como zonas de preservación en su EOT.

Se podría recomendar emplear una metodología como la desarrollada en el estudio para aquellos casos donde la escala corresponda a estudios de carácter general, principalmente en ríos de gran tamaño o que su corriente esté asociada a sub-zonas hidrográficas.

Utilizar modelos libres y aplicaciones gratuitas para el desarrollo de modelos de inundación, disminuyen el altísimo costo que tiene la adquisición de productos de sensores remotos, topografía, y software especializado.

BIBLIOGRAFÍA

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Ley 1523 (24, abril, 2012). Por el cual se adopta la política nacional de gestión de desastres y se establece el sistema nacional de gestión del riesgo de desastres y se dictan otras disposiciones. Bogotá, D.C., 2012.

ESPAÑA. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE DE ESPAÑA. Instituto tecnológico geo minero de. Los sistemas de información geográfica en los riesgos naturales y en el medio ambiente. Madrid. <http://books.google.com.co/books?id=KcXmlbFHgVQC&pg=PA128&dq=modelo+digital+de+elevaciones&hl=es&sa=X&ei=uaD1Uru0B4qIkQeYwoGgBg&ved=0CDkQ6AEwAw#v=onepage&q=modelo%20digital%20de%20elevaciones&f=false>

HERRERA, LONDOÑO Y RODRÍGUEZ. Perspectivas del derecho ambiental en Colombia. Bogotá, Ed. Universidad del Rosario. 2009. {En línea} {02 de noviembre de 2013} Disponible en (<http://books.google.com.co/books?id=XuDjoSDxo5UC&pg=PA145&dq=ordenamiento+de+cuencas+hidrogr%C3%A1ficas+en+colombia+y+riesgos&hl=es&sa=X&ei=Wg30UoLpH8utsAS4v4DIBw&ved=0CDQQ6AEwAg#v=onepage&q=ordenamiento%20de%20cuencas%20hidrogr%C3%A1ficas%20en%20colombia%20y%20riesgos&f=false>)

TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA: TERRITORIO Y MEDIO AMBIENTE .Carmelo Conesa García. Universidad de Murcia. 1 edición 2005. pág. 117. Disponible en http://books.google.es/books?id=xFyVpCIQPRAC&pg=PA71&dq=sistemas+de+informaci%C3%B3n+geografico+para+la+gesti%C3%B3n+del+riesgo&hl=es&sa=X&ei=YI_0UuvLLsfSyAHBhYGICQ&ved=0CFgQ6AEwBA#v=onepage&q=sistemas%20de%20informaci%C3%B3n%20geografico%20para%20la%20gesti%C3%B3n%20del%20riesgo&f=false

FAO. Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas. Diseño y construcción de caminos. Roma. 1990. 13/5. <http://books.google.com.co/books?id=A2YIXGYICUoC&printsec=frontcover&dq=cuencas+hidrograficas&hl=es&sa=X&ei=klH0UubcJoirkAfmjIDgDQ&ved=0CD8Q6AEwBA#v=onepage&q=cuencas%20hidrograficas&f=false>

UNGRD-Unidad Nacional Para la Gestión del Riesgo de Desastres. 2014. {En línea} {citado en 23 de julio de 2014}. Disponible en: (http://www.sigpad.gov.co/sigpad/paginas_detalle.aspx?idp=144)

VARGAS. Políticas Públicas para la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres naturales y socio-naturales. CEPAL. Organización de las Naciones Unidas. 2002. Disponible en

http://www.cepal.org/publicaciones/xml/1/10561/lcl1723e_1.pdf

Ven Te Chow, Maidment, David y Larry Mays. Hidrología aplicada. Editorial McGraw Hill Interamericana S.A. Impreso por Editorial Nomos S.A. Bogotá D.C., 1994.

US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS, River Analysis System. Hydraulic Reference Manual, Version 4.1, January 2010.

PMGRD Puerto Caicedo. Plan Local de Emergencia y Contingencia Municipio de Puerto Caicedo, 2005.

AGUDELO, Omar Y SUÁREZ, Carlos, op cit.

Cardona, Alberto et all. Mecánica Computacional Vol. XXXI. Argentina, 2012.

Molero, Emilio. Manual Básico de HEC-GeoRAS 10 (3ª edición) 2013

INGEOMINAS. Geología del Departamento del Putumayo, Memoria Explicativa, 2003.

Universidad Nacional de Colombia. Manual de usuario HidroSIG, 2011

Ollero A. Algunos apuntes sobre la dinámica fluvial: Los ríos actuales como resultado de su propia libertad y de la intervención humana en sus riberas.

<http://www.unizar.es/forojovent/downloads/curso/pdfs/5.pdf>

Ponce V.M. Engineering Hydrology. Principles and practices. Prentice Hall. 1994.

ANEXOS

ANEXO 1. RESUMEN ANALÍTICO

Título del proyecto	Modelación de máxima avenida del río Putumayo para la identificación de vulnerabilidad por amenaza de inundación de la población de Puerto Caicedo, departamento del Putumayo
Presidente	
Tipo de documento	Trabajo de grado
Referencia documento	Modelación de máxima avenida del río Putumayo para la identificación de vulnerabilidad por amenaza de inundación de la población de Puerto Caicedo, departamento del Putumayo. Mocoa, 2016, 103. Especialista en Sistemas de Información Geográfica. Universidad de Manizales. Facultad de Ingeniería.
Institución	Especialización en Sistemas de Información Geográfica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Manizales
Palabras claves	Modelación hidrológica, modelación hidráulica, tirante hidráulico, vulnerabilidad, riesgo
Descripción	<p>La modelación de máxima avenida del río Putumayo, es una propuesta que pretende mitigar el riesgo que causa la vulnerabilidad por amenaza de inundación de los barrios Modelo de Paz y La Playa del casco urbano de Puerto Caicedo Putumayo, localizados en un antiguo cauce del río donde además, confluye con el San Juan.</p> <p>Para el desarrollo de este objetivo, se propuso en primera medida determinar los aspectos generales del área de investigación. Posteriormente se realiza el estudio hidrológico de caudales máximos del río Putumayo en períodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años; en el estudio hidráulico, se simula y espacializan las áreas de inundación probables; igualmente se hace el análisis de la dinámica fluvial mediante el uso de productos de sensores remotos y unidad aérea no tripulada, y, finalmente, se analizan los resultados, y se efectúa la estimación del grado de amenaza y vulnerabilidad por efectos de inundación.</p>

Cumplido el procedimiento propuesto, se obtienen resultados como la superación del tirante hidráulico de metros sobre el área inundada, el aumento progresivo aguas abajo del factor de socavación general del río Putumayo, el incremento de los pesos de socavación lateral por expansión en las huellas del cauce y la socavación de fondo con interacción de expansión lateral, que llevan a considerar como posibilidad de mitigación de inundabilidad una modelación con disposición de estructura en alturas y empotramiento entre las secciones 1212.26 y 503.6633 aguas abajo, que permita transportar y/o contraer velocidades superiores a los 4 m/s, puesto que la misma sinergia de fondo, la velocidad de superficie y la pendiente promedio del lugar indica que se generan corrientes turbulentas en las secciones medias del tirante hidráulico promedio.

Fuentes

UNGRD-Unidad Nacional Para la Gestión del Riesgo de Desastres. 2014.

Ven Te Chow, Maidment, David y Larry Mays. Hidrología aplicada. Editorial McGraw Hill Interamericana S.A. Impreso por Editorial Nomos S.A. Bogotá D.C., 1994.

US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS, River Analysis System. Hydraulic Reference Manual, Version 4.1, January 2010.

PMGRD Puerto Caicedo. Plan Local de Emergencia y Contingencia Municipio de Puerto Caicedo, 2005.

Cardona, Alberto et all. Mecánica Computacional Vol. XXXI. Argentina, 2012.

Molero, Emilio. Manual Básico de HEC-GeoRAS 10 (3ª edición) 2013

INGEOMINAS. Geología del Departamento del Putumayo, Memoria Explicativa, 2003.

Universidad Nacional de Colombia. Manual de usuario HidroSIG, 2011

Ollero A. Algunos apuntes sobre la dinámica fluvial: Los ríos actuales como resultado de su propia libertad y de la intervención humana en sus riberas.

Contenido

Introducción

La propuesta que se plantea desde esta investigación, propone un enfoque integral de la gestión del riesgo haciendo énfasis en la medida ex ante que depende esencialmente de la identificación y análisis del riesgo y de la concepción y aplicación de medidas de mitigación, dando prioridad al análisis y solución de las causas y efectos que lo generan.

Área problemática: El área de estudio se localiza en la sección occidental del municipio de Puerto Caicedo –

Putumayo, sobre los 76°36'44.519"W de Longitud Oeste, 0°41'6.34"N de Latitud Norte y 284 m.s.n.m. (promedio), en la confluencia entre los ríos Putumayo y San Juan, zona priorizada como escenario de riesgo en el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres –PMGRD- debido a inundaciones que pueden ser provocadas por el aumento del volumen de agua de los mismos, como producto de las precipitaciones durante periodos largos, o por represamiento con material de arrastre.

Objetivos:

Objetivo general: Modelar la máxima avenida del río Putumayo para la identificación de vulnerabilidad por amenaza de inundación de la población urbana de Puerto Caicedo Putumayo.

Objetivos específicos:

- Determinar los aspectos generales del área de estudio.
- Realizar el estudio hidrológico de caudales máximos del río Putumayo en el área de estudio para periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años.
- Realizar el estudio hidráulico, simulando y espacializando las áreas de inundación probables para el área de estudio.
- Analizar la dinámica fluvial del área de estudio mediante el uso de productos de sensores remotos y unidad aérea no tripulada.
- Analizar los resultados, estimación del grado de amenaza y vulnerabilidad por efectos de inundación.

Justificación

La modelación de máxima avenida del río Putumayo mediante el estudio hidrológico e hidráulico permite el desarrollo de elementos de juicio para plantear medidas estructurales y no estructurales que vayan en función de mitigar los efectos identificados de vulnerabilidad por amenaza de inundación en los barrios Modelo de Paz y La Playa en el área urbana de Puerto Caicedo.

Marco teórico: Teóricamente se han planteado diversas maneras para mitigar los impactos producidos por inundaciones, y a partir de su revisión se consideró idóneo retomar las propuestas de modelación hidrológica e hidráulica expuestas por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, igualmente que las de otros autores como Ponce y Molero, entre otros.

Metodología

El trabajo de grado se enmarca en los conceptos de investigación aplicada, descriptiva y proyectiva. El estudio se basa en distintos momentos, que comprende: (i) recopilación de información secundaria, (ii) trabajo de campo, (iii) cálculo hidrológico de caudales máximos del río Putumayo en el área de estudio para períodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años, (iv) análisis de dinámica fluvial del área de estudio mediante el uso de productos de sensores remotos y unidad aérea no tripulada., (v) simulación y espacialización de las áreas de inundación probables para el área de estudio (vi) análisis y síntesis de resultados.

Conclusiones

El estudio hidrológico para pronóstico de inundación, de caudales que en exceso que superan ampliamente la capacidad del Talweg para superar volúmenes máximos. De igual manera se identifica que las corrientes aportantes del Alto Putumayo son las que poseen la mayor capacidad de rendimientos hídricos para generar el caudal máximo previsto en los tiempos de retorno evaluados.

El modelo de simulación hidráulica con HEC-RAS, indica que las áreas donde actualmente se asienta los barrios Modelo de Paz y La Playa son susceptibles de amenaza por inundación en los tiempos de retorno a partir de los 25 años.

Las propiedades hidráulicas del afluente que supera los niveles de contención geométrica del cauce son altamente significativas en el periodo de los 100 años, alcanzando hasta 2.7 m/s en velocidad, socavaciones de hasta 15 metros, expansión lateral de 11 metros, tensión de cizallamiento de 688 KN / m.s, que inundan hasta una altura de 12.7 metros las zonas bajas de la huella hídrica del río Putumayo.

La dinámica del Río Putumayo es muy variable, constancia de esto es que ninguna de las secciones evaluadas en el tiempo de análisis conserva estático su línea hidráulica, la cual se desplaza en secciones críticas como la 31 y 34 a longitudes superiores a los 400 metros, lo cual va más allá de las dimensiones del Talweg que actualmente conduce las aguas del río.

El escenario crítico observado en la presente investigación y los resultados obtenidos en los diferentes modelos y rutinas computacionales da a entender que de ninguna manera el Municipio de Puerto Caicedo puede promover o permitir que el área de expansión urbana se diagonalice a

menos de 800 metros sobre la línea hidráulica actual de la margen izquierda aguas abajo, puesto que ésta distancia debería ser la regalada en la norma de ordenamiento territorial que fija las franjas de protección, que más allá de contextualizarse en el componente ambiental de las franjas de protección, constituye una medida no estructural que reduciría la amenaza por inundación y el riesgo de pérdida progresiva de bienes económicos, como vidas humanas.

La medida prevista como un muro que tendría una longitud de 1500 metros y que se distribuya de forma paralela al cauce, solo constituye un bosquejo semi-detallado de la estructura que reduciría la amenaza; ésta deberá ser proyectada de forma apropiada de acuerdo con las normas de diseño y construcción que se manejan en el país.

Resumen analítico.

Anexos