

ZONIFICACION POR INUNDACIÓN EN EL VALLE DE SIBUNDOY UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

CÉSAR RICAURTE ALBÁN CHINDOY

KEVIN FRANCO ZAPATA

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, 2022

Resumen

A través de la siguiente propuesta se busca elaborar una zonificación por inundación en el Valle de Sibundoy, debido a que en la parte baja y plana del valle donde se ubican parte de los municipios de Sibundoy, Colon, Santiago y San Francisco, se han venido presentando inundaciones por causa de altas precipitaciones, deforestación de las rondas hídricas y la falta de mantenimiento al distrito de drenaje, situación que ha venido afectando a la población residente en estos sectores, al igual que sus principales actividades económicas como la agricultura y ganadería.

El objetivo del presente trabajo, es desarrollar mediante el uso de sistemas de información geográfica (imágenes de satélite, radar, modelos de elevación digitales e hidrología-hidráulica), la zonificación de amenaza por inundación en el valle de Sibundoy, y categorizarla en amenaza alta, media y baja.

Asi mismo se tuvo en cuenta los sectores que vienen presentando mayor recurrencia de inundación en los últimos años, con el propósito que sean tenidos en cuenta en el ordenamiento territorial de estos municipios.

Palabras clave: Precipitación, inundación, recurrentes, riesgos, zonificación, sistemas de información geográfica.

Abstract

Through the following proposal, it is sought to elaborate a zoning due to flooding in the Sibundoy Valley, due to the fact that in the low and flat part of the valley where part of the municipalities of Sibundoy, Colon, Santiago and San Francisco are located, there have been presenting floods due to high rainfall, deforestation of the water rounds and the lack of maintenance to the drainage district, a situation that has been appearing to the resident population in these main sectors, as well as their economic activities such as agriculture and livestock.

The objective of this work is to develop, through the use of geographic information systems (satellite images, radar, digital elevation models and hydrology-hydraulics), the zoning of flood hazard in the Sibundoy valley, and categorize it as high hazard. , medium and low.

Likewise, the sectors that have been presenting the greatest recurrence of flooding in recent years were taken into account, with the purpose that they were taken into account in the territorial ordering of these municipalities.

Keywords: Precipitation, flood, recurrent, risks, zoning, geographic information systems.

Contenido

	Pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN	9
1.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA	10
2. OBJETIVOS.....	14
2.1. OBJETIVO GENERAL	14
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3. ANTECEDENTES.....	15
4. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL.....	18
5. REFERENTE TEÓRICO	21
6. GEOLOGIA DEL VALLE DEL SIBUNDOY	22
6.1. FORMACIÓN SALDAÑA (TJSAL) EDAD TRIÁSICO-JURÁSICO	23
6.2. MONZOGRANITO DE MOCOYA. (JMGMO) TRIÁSICO-JURÁSICO	24
6.3. LAVAS Y PIROCLASTOS (NQLP) EDAD PALEOGENO-NEOGENO.....	25
6.4. ABANICOS Y DEPÓSITOS FLUVIOLACUSTRES SIBUNDOY (QADFSI) EDAD CUATERNARIA.....	26
6.5. BASALTOS SIBUNDOY (QBSIB) EDAD CUATERNARIA.	27
6.6. COLUVIONES (Q2C)	28
6.7. TERRAZAS ALUVIALES (QT1).....	28
7. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	29
8. METODOLOGÍA.....	30
8.1. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	30
8.2. RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES	30
8.3. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	31
8.4. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES Y SENTINEL 1 SAR.....	31
8.5. HERRAMIENTA HEC-RAS	32
9. RESULTADOS	33
9.1. ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRAULICO	33
9.2. ANÁLISIS DE CAUDALES MÁXIMOS.....	35
9.2.1. <i>Tiempo de concentración (Tc)</i>	36
9.3. INTENSIDAD DURACIÓN Y FRECUENCIA (IDF).....	37
9.3.1. <i>Curva IDF Estacion SIBUNDOY-IDEAM</i>	38
9.4. PERIODOS DE RETORNO.....	39
9.5. COEFICIENTE DE ESCORRENTIA.....	40
9.7.1. <i>Modelamiento hidraulico del tramo</i>	44
9.9. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES	46
10. CONCLUSIONES	53
11. RECOMENDACIONES.....	55

12. REFERENCIAS.....57

Lista de figuras

	Pág.
Figura. 1 Mapa Geológico - Estructural del área del Valle del Sibundoy (Modificado de la plancha 430, Ingeominas 2003).....	23
Figura. 2 Localización de la zona de desborde para modelamiento 2d.	34
Figura. 3 Curvas IDF fuente IDEAM	39
Figura. 4 Mapa de pendientes en porcentaje (%). Elaboración propia.	40
Figura. 5 Mapa de cobertura de la cuenca alta del río Putumayo (modificado SINCHI, 2020).	41
Figura. 6. Valores de caudal utilizados en el programa HEC-RAS para la simulación de inundación incluyendo el caudal de inundación de 113 m ³ /s para el 18 de Julio de 2021.....	45
Figura.7 Simulación de la inundación sobre el río Putumayo utilizando el programa HEC-RAS, en color azul oscuro son las mayores profundidades hasta 15 metros.	46
Figura. 8 Imagen sentinel 1, de julio de 2021 en formato tif con procesamiento en el programa SNAP. .	47
Figura. 9 Resultado de procesamiento de imágenes sentinel 1, de julio de 2021 en formato shapefile con el programa ARCGIS.....	48
Figura. 10 Resultado de procesamiento de imágenes sentinel 1 y 2, de abril de 2022 en formato shapefile con el programa ARCGIS.....	49
Figura. 11 Relación Profundidad-Velocidad para determinación del grado de amenaza por la USBR.....	50
Figura. 12 Mapa de zonificación por inundación en el valle de Sibundoy.....	52

Lista de fotografías

	Pág.
Fotografía 1. Canales del distrito de drenaje del Valle de Sibundoy.....	12
Fotografía 2. Ortofoto tomada con drone para medir dimensiones de zona afectada por erosión y ruptura del Canal D, día lunes 19 de Julio 2021.....	12
Fotografía 3. Ortofoto tomada con drone para localización de la ruptura del dique canal D en el Municipio de Colon.	12
Fotografía 4. Dirección del desbordamiento del canal D hacia el sector de la Vereda Balsayaco.	12
Fotografía 5. Sector de inundación municipio de Colon y Santiago.	12
Fotografía 6. Sector de inundación municipio de Sibundoy y Sanfrancisco.	12
Fotografía 7. Reconocimiento en campo de la zona inundada.	13
Fotografía 8. Reconocimiento en campo de la zona inundada.	13
Fotografía 9. Sector de inundación municipio de Sibundoy Vereda Leandro Agreda.	13
Fotografía 10. Sector de inundación Vereda Leandro Agreda Sibundoy por desborde del río Putumayo.13	

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Características fisiograficas de la cuenca, fuente: Elaboracion propia	35
Tabla 2. Tiempo de concentracion drenaje río Putumayo por diversas metodologias	37
Tabla 3. Localizacion de la estacion Sibundoy	38
Tabla 4. Intensidades para diferentes periodos de retorno (Fuente elaboracion propia con datos del IDEAM)	39
Tabla 5. Coeficientes de escorrentia, según Benítez et al.(1980), citado por Lemus y Navarro (2003).	42
Tabla 6. Coeficientes de escorrentia según la cobertura de la cuenca.	42
Tabla 7. Resultados del caudal para diferentes periodos de retorno	43
Tabla 8. Coeficiente de rugosida (Fuente: Bolinaga, J.J “Drenaje Urbano” INOS 1979.....	44
Tabla 9 Categorizacion de amenaza por inundación para el Valle del Sibundoy (Elaboracion propia). ...	51

1. Planteamiento del problema de investigación y su justificación

En 1964 mediante el proyecto Putumayo N° 1, permitió adecuar 8.500 hectáreas de la parte plana del Valle de Sibundoy, diseñando y construyendo un distrito de drenaje en el que se incluye la construcción de cuatro canales perimetrales (canales A,B,C y D) para capturar las aguas de la montaña y el establecimiento de un sistema de drenajes secundarios para regular la oferta hídrica en las diferentes épocas climáticas, en la actualidad están en funcionamiento los canales A, B y D como también el cauce viejo del río Putumayo y la quebrada Hidráulica, los cuales en temporadas de fuertes lluvias generan inundaciones en la parte plana, por problemas de sedimentación en estos cuerpos hídricos, a esto se suma que las obras de mitigación como los jarillones de material aluvial, muros de contención tipo gaviones o bolsacretos se encuentran en mal estado lo cual aumenta el riesgo de desbordamiento. Uno de los factores más importantes de amenaza de inundación es la falta de mantenimiento de canales y ríos, con trabajos de descolmatación, los cuales reducen la capacidad hidráulica y producen inundaciones en cada temporada invernal; así mismo la deforestación y ampliación de la frontera agrícola en la parte alta de laderas que rodean el Valle del Sibundoy y en zonas de protección ambiental como las rondas hídricas hace susceptible estas áreas a procesos erosivos como deslizamientos y avenidas torrenciales generando en la parte plana inundaciones las cuales deben ser delimitadas y actualizadas para incorporarlas en el plan de ordenamiento territorial.

Esta zonificación por inundación será una herramienta que pretende prevenir y evitar desastres como pérdidas materiales y humanas delimitando las zonas que son recurrentes a inundación con

el propósito de orientar una planeación urbanística y agrícola adecuada, así como también para la construcción de futuras viviendas y obras civiles públicas con infraestructura de adaptación que se ajusten al medio dependiendo de la categoría de amenaza de la zona de inundación donde se encuentre.

De acuerdo con lo anterior se propone realizar una zonificación de amenaza por inundación categorizada en alta, media y baja mediante sistemas de información geográfica utilizando imágenes de radar, Dem Alos Palsar, imágenes satelitales, trabajo de campo y estudio hidrológico del río Putumayo como uno de los cauces principales. Todas estas herramientas nos permiten recopilar, organizar la información relacionada con las diferentes variables de riesgo.

1.1. Descripción del área problemática

El desbordamiento de canales y ríos durante periodos invernales causados por el cambio climático es uno de los fenómenos naturales que causa pérdidas materiales y humanas, lo que conlleva a la necesidad de planificar el territorio, ya que la falta de ordenamiento hace que los asentamientos humanos se localicen cada vez más cerca de las zonas de amenazas y riesgos. Colombia no ha sido ajena a esta problemática, donde año tras año se registran pérdidas humanas y materiales debido principalmente a la intensidad de las temporadas de lluvias y a la falta de planificación de los territorios.

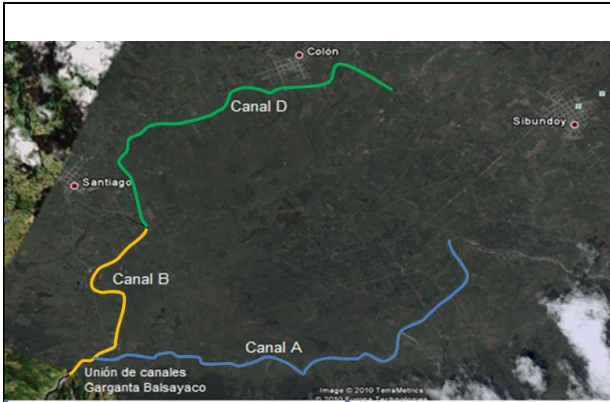
En el caso del valle de Sibundoy habitan 45.466 personas de acuerdo al último censo realizado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE 2005 y según el EOT 2012

alrededor del 50% del Valle de Sibundoy es una zona inundable por los ríos Putumayo, San Pedro, y las quebradas: Hidráulica, el Cedro y Tamauca las cuales lo atraviesan. A esto se suma que el distrito de adecuación de tierras del Valle de Sibundoy por la falta de mantenimiento no asegura el control de inundaciones tendiendo a perder su capacidad hidráulica, por lo tanto, no serán sostenibles en el tiempo.

Esta problemática implica el estudio y evaluación de la dinámica hídrica de esta zona, así mismo se hace necesario el modelamiento hidrológico de canales y ríos para verificar su capacidad hidráulica.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto y como lo muestran las fotografías de 1-10, es indispensable que se realice la zonificación y categorización de amenazas y riesgos por inundación a través de sistemas de información geográfica que permita de forma ágil y precisa la toma de decisiones para crear obras de mitigación y medidas de prevención.

En las siguientes imágenes (fuente propia) se muestra la inundación de la parte más baja del Valle de Sibundoy debido a la ruptura del canal D del en el municipio de Colon y al desborde del río Putumayo en la vereda Tamabioy municipio de Sibundoy, esto debido a las intensas precipitaciones del domingo 18 de junio del 2021 y a la falta de mantenimiento del Canal D y río Putumayo.



Fotografía 1. Canales del distrito de drenaje del Valle de Sibundoy.



Fotografía 2. Ortofoto tomada con dron para medir dimensiones de zona afectada por erosión y ruptura del Canal D, día lunes 19 de Julio 2021.



Fotografía 3. Ortofoto tomada con dron para localización de la ruptura del dique canal D en el Municipio de Colón.



Fotografía 4. Dirección del desbordamiento del canal D hacia el sector de la Vereda Balsayaco.



Fotografía 5. Sector de inundación municipio de Colón y Santiago.



Fotografía 6. Sector de inundación municipio de Sibundoy y Sanfrancisco.



Fotografía 7. Reconocimiento en campo de la zona inundada.



Fotografía 8. Reconocimiento en campo de la zona inundada.



Fotografía 9. Sector de inundación municipio de Sibundoy Vereda Leandro Agreda.



Fotografía 10. Sector de inundación Vereda Leandro Agreda Sibundoy por desborde del río Putumayo.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Desarrollar mediante el uso de sistemas de información geográfica, la zonificación de amenazas por inundación en el valle de Sibundoy, Putumayo

2.2. Objetivos específicos

- ✓ Realizar el modelamiento hidráulico de la cuenca alta del río Putumayo con el caudal de diseño para un periodo de retorno de 25 años.
- ✓ Realizar mapa de zonificación por amenaza de inundación con categoría alta, media y baja de acuerdo a las diferentes cotas de inundación de los últimos años, mediante uso de sistemas de información geográfica.
- ✓ Evaluar el estado del distrito de drenaje para el valle de Sibundoy.

3. Antecedentes

A continuación se presentaran una serie de trabajos realizados que sirven como base para la elaboración del presente trabajo, se tomaran desde la parte mas conceptual, hasta trabajos realizados en partes aledañas al área de estudio.

En el área de la cuenca del Rio Cauto, en cuba (Montecelos., et al 2011), propusieron una metodología aplicando herramientas SIG, para la elaboración de mapas a escala 1:25000, en la cual integraron variables cartográficas como pendiente, litología, permeabilidad, y procesos degradativos; a partir de esta base cartográfica zonificaron la zona en 5 categorías que van desde zonas extremadamente inundables a zonas no inundables.

El interés por delimitar zonas propensas a inundaciones se ha extendido a otras zonas de Colombia como es el caso de la cuenca del rio Acacias (Calderón y Montoya.,2016) los autores utilizaron un modelo hidrológico HEC-HMS y un modelo hidráulico HEC-RAS, a partir de los cuales determinaron las áreas susceptibles a inundaciones de la cuenca en escala 1:10000, a pesar de contar con un modelo establecido los autores recomiendan para zonas planas como es el caso de la cuenca del rio Acacias, utilizar modelos de elevación digital con mayor resolución espacial, ya que permitirán realizar un análisis más puntual en hidrología y cartografía de riesgo, pero acarreando un costo en la adquisición de información.

En las zonas aledañas a Acequia de las Mercedes (Valledupar,Cesar) Pérez (2017), delimito las áreas de inundación usando la herramienta HEC-RAS, y concluyo que la actividad antrópica y la pérdida de la cubierta vegetal , tiene gran aporte en el desbordamiento del tramo estudiado, y

recomienda un rediseño de la acequia, así como una reorganización del área circundante por la ocupación ilegal de las zonas aledañas.

En (Sedano-Cruz et al .,2013) se analizan los aspectos que agudizan el riesgo por inundación en Colombia en el periodo 2010-2011, durante el cual se presento el fenómeno de La Niña, el cual afecto de manera considerable el territorio colombiano, y en los cuales las inundaciones cobraron la mayor parte de las perdidas materiales y humanas; para los autores los fenómenos asociados a inundaciones se agudizan por factores sociales, políticos y antrópicos, que condicionados por una carencia institucional para la prevencion y atención de emergencias acrecentan los daños causados y ponen en riesgo vidas humanas.

(Muñoz.,2015) expone que el aumento de precipitaciones asociados al fenómeno de la niña, ha aumentado a partir de los años 50, causando perdidas agropecuarias, humanas y de infraestructurapor inundaciones y deslizamientos principalmente, y demostró que en Colombia aun se presentan falencias en cuento temas asociados a la gestión del riesgo y es por eso que el trabajo presentado puede servir como punto de partida para la consolidación y aplicación de políticas que ayuden a mitigar los fenómenos naturales desastrosos.

En la guía metodología del IDEAM (2018), se presentan las metodologías y conceptos para el análisis de las inundaciones, para la obtención de mapas requeridos, también definen las diferentes tipos de mapas según la información disponible, para este caso en particular llegaremos a un mapa de zonificación, en el cual se deben localizar las áreas con exposición a peligros y que puedan incidir en la planificación del territorio.

En el área circundante al valle del Sibundoy encontramos una serie de trabajos que se enfatizan en la caracterización de los fenómenos de inundación. (Alvarez et al.,2016) abordaron la

susceptibilidad de la cuenca alta del río Putumayo con el apoyo de herramientas SIG, ante fenómenos de inundación, y concluyeron que las zonas altamente inundables están hacia el SW de la cuenca del río Putumayo y ocupa el 5% del total de la cuenca estudiada, estas zonas corresponden a planicies con suelos orgánicos y altos niveles freáticos.

(Delgado.,2019) realizo una simulación empleando un modelo hidrológico SWAT para el distrito de drenaje en el Valle de Sibundoy, el cual predice que con las practicas actuales de manejo en menos de 19 años la tasa de sedimentación sobrepasaría el 200%, lo que intensificaría la degradación del suelo y de los procesos erosivos que ayudarían a que fenómenos como inundaciones sean mas recurrentes y pongan en riesgo la vida y las propiedades de los habitantes del sector.

4. Referente normativo y legal

A continuación, se mencionan normas, acuerdos, decretos y planes para el desarrollo del presente trabajo de grado:

No	Norma/Decreto/Plan/Acuerdo	Emitido Por:
1	<p>Ley 1523 de 2012 Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo la cual constituye en una política de desarrollo indispensable para asegurar la sostenibilidad, la seguridad territorial, los derechos e intereses colectivos, mejorar la calidad de vida de las poblaciones y las comunidades en riesgo y, por lo tanto, está intrínsecamente asociada con la planificación del desarrollo seguro, con la gestión ambiental territorial sostenible, en todos los niveles de gobierno y la efectiva participación de la población, teniendo en cuenta lo anterior el presente trabajo busca dar a conocer al gobierno local y nacional el grado de amenaza por inundación que viene presentándose la parte baja del valle de Sibundoy en el departamento del Putumayo.</p>	<p>El congreso de la República</p>
2	<p>DECRETO 1807 DE 2014. por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto-ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones. En el caso de este decreto lo que se busca con esta zonificación de amenazas es la determinación de las medidas específicas para su mitigación teniendo en cuenta la denominación de los planes de ordenamiento territorial.</p>	<p>Ministerio de vivienda Ciudad y territorio.</p>

3	Decreto 1077 de 2015: compilación del decreto 1807 de 2014 que establece la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y medidas específicas para su mitigación teniendo en cuenta la denominación de los planes de ordenamiento territorial.	Ministerio de vivienda Ciudad y territorio
4	Tanto el artículo 12 de la Ley 388 de 1997 como el decreto 1807 de 2014 establecen los elementos mínimos que es preciso incorporar para la determinación y ubicación de las zonas que presenten alto riesgo para la localización de asentamientos humanos y destaca particularmente aquellos bajo la influencia de amenazas o riesgos naturales norma aplicable para algunas áreas del valle de Sibundoy	El congreso de la República
5	Ley 357 de 1997. Por medio de la cual se aprueba "la convención Relativa a los humedales de Importancia Internacional Especialmente como hábitat de aves acuáticas. De acuerdo a esta ley en este trabajo se mostrará las zonas de humedales que se deben proteger y conservar ya que por la expansión de la frontera agrícola y ganadera se vienen desapareciendo.	El congreso de la república.
6	El Decreto 2811 de 1974: Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. En su artículo 83 establece que las fajas paralelas deben tener un aislamiento de un máximo de hasta treinta (30) metros, definiéndose así: “una faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta (30) metros de ancho, lo cual en el valle de Sibundoy en sus cuerpos de agua falta seguimiento y control de esta norma lo cual aumenta la el nivel de	Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo sostenible.

	amenaza por inundación, así como se explica en este trabajo.	
--	--	--

5. Referente teórico

Para definir el grado de amenaza por inundación en la zona de estudio y con el fin de entrar en contexto será conveniente realizar las siguientes presiones: La Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones en España (MIJ, 1995), define inundación como la “sumersión temporal de terrenos normalmente secos, como consecuencia de la aportación inusual y más o menos repentina de una cantidad de agua superior a la que es habitual en una zona determinada”. A partir de este concepto se puede entender que todo cuerpo de agua desbordado de su cauce natural es generalmente una inundación que es causada por factores detonantes, como la alta precipitación y sedimentación de caudales; Por otra parte es válido aclarar que este proceso de inundación no se da por separado, puesto que está acompañado de sus factores detonantes.

Adicional al concepto anteriormente descrito, el IDEAM (Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales), define las inundaciones como amenaza de la siguiente forma “ Procesos de inundación que se manifiestan en extensas zonas del territorio Colombiano; no obstante la ocupación indiscriminada de las áreas ribereñas de los principales ríos y quebradas, con las intervenciones en las márgenes de estos drenajes, así como el crecimiento de las poblaciones con las actividades socioeconómicas asociadas han acentuado los efectos negativos que ocasionan los incrementos periódicos en los niveles de los ríos, siendo ésta una condición propia de la dinámica hidrológica correspondiente a épocas de aguas altas y aguas bajas así como la transición entre estos dos estados”. Dicha definición es la que se asemeja a la situación que se presenta en el valle de Sibundoy debido a la falta de planificación y zonificación del territorio.

De otro lado resulta oportuno tener en cuenta el concepto de humedales que según la Convención Ramsar lo define como: “Son humedales las extensiones de marismas, pantanos y tuberías o superficies cubiertas de aguas, sean estas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”. Este tipo de humedales son los que se presentan en el valle de Sibundoy los cuales se deben estar actualizando en su delimitación para su protección y conservación.

Finalmente, y con igual importancia se debe tener en cuenta el concepto de obras de mitigación contra inundaciones el cual es definido según el documento del Banco Mundial (2017), Medidas de protección contra inundaciones basadas en la naturaleza como: Obras de ingeniería “dura” o infraestructura “gris”. Algunos ejemplos son los terraplenes, las presas, los jarillones o diques y los canales para controlar las inundaciones.

6. Geología del Valle del Sibundoy

Para la descripción del material del suelo y el subsuelo es necesario el estudio geológico, a partir de este conocimiento se valoran los procesos geológicos que han afectado a la zona de estudio, y que pueden representar amenaza en un momento dado.

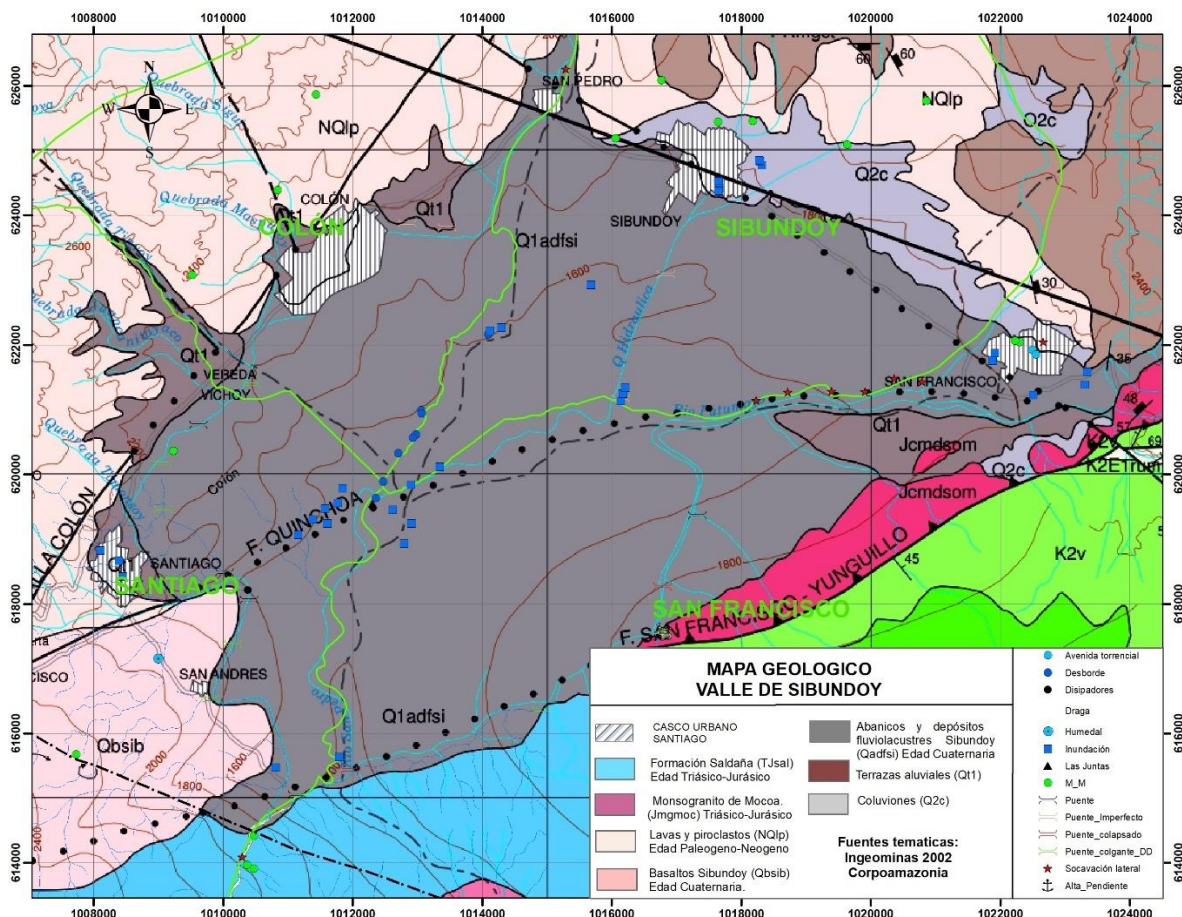


Figura. 1 Mapa Geológico - Estructural del área del Valle del Sibundoy (Modificado de la plancha 430, Ingeominas 2003).

Para describir la geología del área de estudio, se tuvo en cuenta la información de Ingeominas 2003, Reconocimiento Geológico Regional de la planchas 430 escala 1: 100000. Reconociéndose 7 unidades litológicas alrededor de la zona de estudio:

6.1. Formación Saldaña (TJsal) Edad Triásico-Jurásico

Las rocas de la Formación Saldaña se presentan al Oriente y Sur Oriente de la plancha 430 hasta la parte sur de Santiago en el Valle de Sibundoy, Varios autores han extendido el término a la Cuenca del Putumayo (Cáceres y Teatín, 1985; Urueta y Dutoit, 1997), la describen como una secuencia constituida por un buen espesor de vulcanitas y sedimentitas de edad Jurásica. En

general la descripción de las rocas de la formación Saldaña es sucesión de capas finas, medias y gruesas macizas, con fracturamiento medio a alto, de rocas volcánicas lavas y piroclastitas de textura porfiritica a afanítica, composición riolítica, dacitica, latitica, traquitica y andesítica; las tobas son líticas; cristalinas, vítreas y mezcla de ellas. También se encuentran aglomerados, arenitas tofaceas, limolitas y tufas. Los colores son muy variados encontrándose verde, rojo y morado, pardo, gris y negro como los más comunes. El tamaño de grano varía entre tobas de ceniza y lapilli, hasta aglomerados.

La complejidad tectónica del área, los limites fallados en gran mayoría con la gran mayoría de unidades litoestatigráficas con las cuales están en contacto y la ausencia de niveles guía son los factores que impiden establecer con precisión una secuencia completa de unidad y por lo tanto, determinar su espesor.

La Génesis de la Formación Saldaña es el resultado de una acumulación vulcano sedimentaria, en que la mezcla de flujos de lava y depósitos piroclásticos muy seguramente de flujo y caída, con intrusiones hipoabisales y sedimentitas de ambientes continentales y transicionales. El vulcanismo es ácido a intermedio y ambiente continental (Bayona et al., 1994).

6.2. Monzogranito de Mocoa. (Jmgmoc) Triásico-Jurásico

Gonzales y Núñez proponen el nombre de Monzogranito de Mocoa para denominar la unidad de Escore (1997), Jaramillo et al. (1980) lo mencionaban como Batolito de Mocoa.

El nombre propuesto tiene en cuenta la composición litológica predominante, monzogranito, y la región geográfica alrededor de la cual ha sido descrito el cuerpo, el río y la ciudad de Mocoa, en la Plancha 430 Mocoa.

El monzogranito de Mocoa constituye un cuerpo ígneo fragmentado y elongado, de dirección NE-SW que se extiende desde un poco al Norte de Mocoa, en la plancha 430, pasando por la parte Sur de Santiago en el Valle de Sibundoy hasta la frontera con el Ecuador en la plancha 465.

La morfología se caracteriza por montañas abruptas y pendientes pronunciadas, que contrasta con la expresión morfológica de las unidades geológicas que lo limitan por el Oriente. La litología varía de monzogranito a cuarzodiorita, con predominio de monzogranito que le dan el nombre a la unidad; en general están constituidos por cuarzo, plagioclasas y feldespato potásico en proporciones variables.

Posición estratigráfica y edad. Los límites con otras unidades litológicas son intrusivos, fallados o inconformes. Por lo general, el costado oriental el contacto es tectónico a través del sistema de fallas Conejo, que son fallas inversas, que lo colocan sobre unidades sedimentarias del Cretácico y Paleógeno, y sobre algunos depósitos del Cuaternario.

6.3. Lavas y piroclastos (NQlp) Edad Paleógeno-Neógeno

INGEOMINAS en la plancha 430, presenta a esta unidad como Lavas y piroclastos que agrupa una gran cantidad de depósitos volcánicos y volcanosedimentarios, tanto flujos de lava como lahares y depósitos piroclásticos de flujo y caída, que constituyen una buena parte del sector del área de estudio, representada en una morfología irregular, generalmente ondulada y cuando hay abundancia de material piroclástico se suaviza la topografía; recubren diferentes tipos de rocas desde el Proterozoico hasta depósitos del Holoceno.

Debido a las características de extensión y del material litológico, no es posible hacer diferenciación sobre proveniencia de estos depósitos, y se indica solamente que ellos debieron originarse en volcanes extintos y actuales de la cadena volcánica en donde se destacan los volcanes

Doña Juana, Bordoncillo, Sibundoy y Patascoy, así como otros conos volcánicos que no tienen denominación.

En la zona de estudio se presenta gran parte de esta unidad conformada por depósitos piroclásticos de caída, que generalmente se presentan en avanzado estado de meteorización, generando suelos arcillosos de color blanco, gris y amarillo en diversas tonalidades; algunos de los depósitos piroclásticos tienen composición riolítica y desarrollan material caolinítico interestratificados con estos depósitos piroclásticos o bajo ellos, puede ser seguidos por varios kilómetros, y en otras oportunidades son afloramientos aislados como cubierta piroclástica sobre los neis metamórficos.

6.4. Abanicos y depósitos fluviolacustres Sibundoy (Qadfsi)

Edad Cuaternaria.

El Valle de Sibundoy tiene forma romboidal y un área aproximada de 100 km², con un eje mayor de orientación NE de 18 km de longitud, se trata de una cuenca de tracción por salto lateral, generada por el Sistema de Fallas Algeciras, que en este sector está representado por la Falla Colon y la Falla Quinchoa. El Valle está ocupado por sedimentos provenientes del depósito de abanicos aluviales, barras longitudinales de ríos, depósitos lacustres y depósitos volcánicos de caída, entre otros. El drenaje mayor es el río Putumayo que lo recorre por el sector oriental y sobre la parte plana del Valle el Cauce o Madre Vieja del río Putumayo pasando por la parte Sur del municipio de Santiago para seguir su recorrido por Villagarzón y los demás municipios del Bajo Putumayo.

Los abanicos de mayor tamaño están ubicados hacia los costados norte y suroccidente; en la actualidad, en la parte sur que corresponde a la vertiente oriental del río Putumayo y sobre el cauce viejo del mismo, se observa depósitos de este tipo. La composición de los fragmentos y materiales

que componen los diferentes depósitos del Valle de Sibundoy es predominantemente volcánica, ya sea por acumulación directa de cenizas de caída o por la erosión y arrastre de las rocas y los depósitos volcánicos localizados hacia las vertientes próximas al Valle.

6.5. Basaltos Sibundoy (Qsib) Edad Cuaternaria.

Basaltos Sibundoy es el nombre que se usa para describir los depósitos volcánicos, lavas y piroclastos, provenientes de dos centros eruptivos importantes ubicados al occidente de la Plancha 430 Mocoa. Se trata de los flujos de lava de composición basáltica y los piroclastos de caída, de tipo escoriáceo eruptados por el volcán Sibundoy (Buchelli, 1986). Los materiales piroclásticos son de caída y están representados por lapilli escoriáceo de color rojo oscuro a casi negro y bombas de diversas formas y tamaños, también de color rojo oscuro. El material piroclástico se extiende alrededor de las dos estructuras volcánicas y forman capas de espesor variable, como se observa cuando se avanza por la carretera Santiago - Escuela Vereda La Cruz. En algunos sectores se apreciaron depósitos que parecen corresponder a brechas de explosión, en donde se mezclan bombas de diferente tamaño en forma caótica. Los flujos de lava están discordantes unos sobre otros, y se pueden reconstruir las fases eruptivas como lo realizó Buchelli (1986); estos flujos avanzaron por el oriente en dirección al valle de Sibundoy, en donde se observa cerca de San Andrés y por la carretera que lleva a la Vereda Balsayaco. Son de color rojo oscuro a gris oscuro, generalmente muy vesiculados que indican baja viscosidad y composición basáltica. Sobre la superficie de los flujos se observa costras de enfriamiento y estructuras cordadas. Análisis de visitas técnicas en sectores priorizados.

6.6. Coluviones (Q2c)

Aparecen coluviones en diversos sectores del municipio y principalmente en los alrededores de la parte plana del Valle; su ocurrencia es bastante común, especialmente en la zona montañosa; se encuentran relacionados con cambios morfológicos fuertes, algunos generados por los movimientos de fallas, en sectores en donde las unidades de rocas se encuentran muy meteorizadas o en donde las rocas tienen alto grado de fracturamiento. Su origen es diverso y pudieron haberse generado como resultado de movimientos sísmicos, por efectos climáticos y aun por la acción del hombre, especialmente en los corredores viales en donde no se tuvieron en cuenta factores geológicos para programar los cortes y pendientes de los taludes resultantes. Estos depósitos están constituidos por detritos angulares de diferente tamaño, mal calibrados y con alto contenido de matriz. En algunas oportunidades el contenido de matriz es escaso, especialmente cuando se trata de depósitos originados por caída de rocas. La edad de estas acumulaciones es holocénica y, en la actualidad, continúan presentándose como resultado de la tectónica, el clima y la actividad antrópica, entre otros factores.

6.7. Terrazas aluviales (Qt1)

Las terrazas corresponden a depósitos aluviales de los ríos principales del valle de Sibundoy especialmente el río Putumayo, San Pedro, y Quinchoa, generalmente forman planicies amplias, cortadas por corrientes nuevas que las erosionan. Constan de depósitos de gravas, esporádicamente arenas; las gravas son bloques de tamaño medio a grande, composición muy variable y la matriz de arena media a gruesa, la edad de estas formaciones generalmente es recientes (Cuaternarias).

7. Geología estructural

El valle de Sibundoy está influenciado por rasgos estructurales que en la región se deben a la convergencia de las dos cordilleras y al estrechamiento y/o levantamiento de las depresiones interandinas del Valle del Magdalena, las cuales están representadas por las fallas San Francisco-Yunguillo, Colón, Quinchoa y Sibundoy, indicando además áreas con presencia de procesos erosivos en los lineamientos por donde pasan originando rasgos estructurales. Los datos históricos de sismicidad indican magnitudes hasta de 7,0 en la escala de Richter, asociados al volcán Sibundoy de acuerdo al INGEOMINAS hoy Servicio Geológico Colombiano relaciona esta área con amenaza sísmica alta.

8. Metodología

Con base en los objetivos general y específicos se realizó este proyecto con metodología cuantitativa donde se describe siete etapas, en las cuales se describe: la delimitación del área de estudio, recopilación de antecedentes, procesamiento de la información, procesamiento de imágenes y sentinel 1 SAR, para la modelación de áreas inundables Herramienta HEC-RAS, Procesamiento de imágenes satelitales con el programa Arc GIS y Resultados obtenidos.

8.1. Delimitación del Área de Estudio

El valle de Sibundoy se encuentra al Noroccidente del departamento de Putumayo, en la actualidad se identifican siete unidades geológicas y diferentes geformas de origen mixto. Para este estudio en particular se consideraran las unidades Abanicos y depósitos Fluvio Lacustres Sibundoy (Qadfsi) de Edad Cuaternaria, unidad que es el área inundable y que se encuentra en la parte plana y más baja de área de estudio. A esto, se suman los ríos Putumayo Quincho, San Pedro y las quebradas Lavapiés, Hidráulica, Cedro, así como los canales A, B, D que atraviesan la zona de estudio la cual es delimitada de acuerdo a la recopilación de información como zonas de recurrentes de inundación.

8.2. Recopilación de antecedentes

En este punto se hace búsqueda bibliográfica, estudios e informes de las diferentes instituciones como alcaldías (Esquema Básico de ordenamiento territorial de los cuatro municipios en estudio), informes de gestión del riesgo de Corpoamazonia y Gobernación del Putumayo, determinantes

ambientales sobre zonas de riesgo en la parte plana del valle de Sibundoy, la cartografía base del instituto geográfico Agustín Codazzi, memorias y planchas geológicas del servicio geológico Colombiano y curvas IDF del Instituto de hidrología y meteorología y estudios Ambientales IDEAM, con el fin de verificar registros históricos de inundaciones en la parte plana del valle de Sibundoy, del cual se encontraron dos eventos principales de inundación el 18 de julio de 2021 y el 10 de abril de 2022.

Después de organizar la información se integraron datos de planificación urbana como veredas y municipios para ser representados de manera cartográfica, y en este punto se programaron los recorridos en los sectores considerados con afectaciones por inundación.

8.3. Procesamiento de la información

Para la obtención del objetivo de este trabajo se revisaron las inundaciones pasadas en la zona de estudio (2016-2022), con la intención de seleccionar capturas de imágenes satelitales tipo sentinel 1 SAR y sentinel 2 con fechas muy cercanas a los días de inundación, así mismo se analizaron imágenes de dron del año 2020 proporcionadas por Corpoamazonia, esto con el fin de identificar áreas inundables que sean más recurrentes en la zona y validar los resultados, sin embargo para ampliar el análisis se hace consultas de información de los últimos años de acuerdo a la información disponible en la red y con la captura de los sensores remotos, ya que esto nos refleja el verdadero comportamiento espacial de la amenaza por inundación.

8.4. Procesamiento de imágenes y sentinel 1 SAR.

En esta etapa, se utilizaron imágenes sentinel-1 de la Agencia Espacial Europea adquiridas en polarización (VH) y (VV) para detectar zonas inundables que no se pudieron cartografiar con la ayuda de las ortofotos proporcionadas, la selección de las fechas fueron las que estaban disponibles

donde se registraron dos ultimas inundaciones y desbordamientos de canales y ríos y se lograron capturas con fecha de la imagen de 22/07/2021 para la inundacion del 18 de julio del mismo año y la imagen de 12 de abril de 2022 para la inundacion del 10 de abril de 2022.

Para el procesamiento de imágenes Sentinel 1 se utilizó el programa SNAP con las siguientes correcciones ruido (speckle) inherente a su proceso de captura de información, fue necesario aplicar un filtro espacial que consistió en mover una ventana de dimensiones pequeñas sobre cada píxel de imagen, como resultado se obtuvieron imágenes con características que favorecen la separación espectral de objetos.

8.5. Herramienta HEC-RAS

Para la modelación hidráulica de Canales y ríos en 2d, se utilizó el programa HEC-RAS 5.0.7 y el DEM de tipo DTM en formato GRID, con tamaño de celda (cellsize (X, Y)) 12.5, 12.5, que se descargó de la página web de Alaska Satellite Facility – UAF, que corresponden al satélite Alos Palsar tomada el 15 de febrero de 2011 (University of Alaska Fairbanks, 2011), el cual permite realizar análisis geomorfométricos de pendiente, longitudes, perímetros, jerarquías de cauces, diferencias de alturas y demás parámetros morfométricos de una cuenca. Después de priorizar los canales y ríos se utiliza la herramienta HEC-RAS el cual permite el modelado hidráulico unidimensional de régimen permanente que analiza los flujos de los ríos y canales por secciones transversales de los cauces de acuerdo a la esorrentía y caudal del agua en el sistema hídrico. Este modelo genera como resultado una simulacion de inundacion, calculando el nivel y la velocidad del agua y el área mojada (Nanía & Molero, 2007). Para este análisis se utilizó el caudal de diseño calculado para un periodo de retorno de 25 años y la pendiente obtenida del DEM Alos Palsar para

el río priorizado; de este procesamiento de información y las áreas inundables resultantes se obtiene información complementaria para la categorización de amenaza por inundación.

Por último, se consultan imágenes gratuitas como Sentinel 1, Sentinel 2, Landsat 8, satélites Google, DEM ALOS PALSAR y Bing Maps descargadas de páginas de Internet así como las imágenes Spot 5 proporcionadas por Corpoamazonia, para delimitar rasgos de inundación con mejor resolución, seguidamente se prosiguió con el traslape y procesamiento de estas imágenes con el programa ArcGIS, comparando las bandas del color natural de las imágenes consultadas con las imágenes Sentinel 1 SAR para una mejor cartografía de las áreas inundables.

9. Resultados

9.1. Estudio hidrológico e hidráulico

El estudio hidrológico e hidráulico para el sector a evaluar tiene los siguientes objetivos:

- a) Calcular los caudales máximos a partir de lluvias para diferentes periodos de retorno.
- b) Determinar el máximo caudal de desborde del río Putumayo para un periodo de retorno de 25 años utilizando modelación en 2d con el programa HEC-RAS.

El alcance de los anteriores objetivos se limita tanto a escala temporal como espacial.

A escala espacial el estudio se limita a un punto de estudio de la cuenca alta del río Putumayo, sitio propuesto para el modelamiento en 2d como una de las zonas principales de desborde del río.

La metodología y parámetros para ejecutar de los análisis se explica durante el procesamiento de la información hasta obtener resultados.

El area de estudio para la modelacion hidrológica se encuentra ubicada en la vereda Tamabioy municipio de Sibundoy departamento del Putumayo, zona de la cuenca alta del río Putumayo.

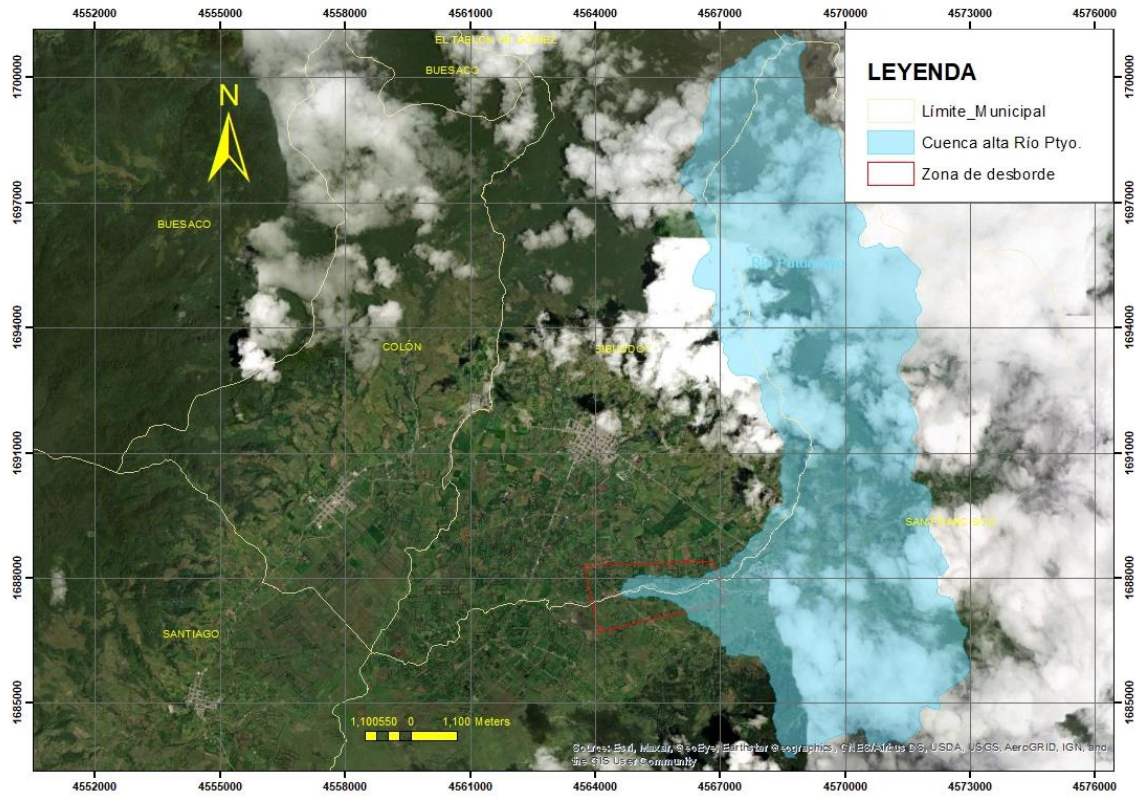


Figura. 2 Localización de la zona de desborde para modelamiento 2d.

Hidrografía y morfometría

La caracterización hidrológica de la cuenca alta del río Putumayo, se delimita a partir del tramo de interés en la vereda Tamabioy de Sibundoy.

Características fisiográficas

Estas características dependen de la morfología de la cuenca, tales como la forma, el relieve, la red de drenaje, entre otras. Estos elementos físicos proporcionan la más conveniente posibilidad de conocer la variación espacial de los elementos del régimen hidrológico. Para la determinación de estas características, se hizo uso de la información cartográfica del IGAC, Corpoamazonia, IDEAM y el Dem Alos Palsar de 12.5 metros de lado.

Tabla 1. Características fisiográficas de la cuenca, fuente: Elaboración propia

Cuenca Alta Río Putumayo		
Descripción	Cantidad	Unidad
Área de drenaje	68.600	km ²
Perímetro	52	km
Longitud de la cuenca	18.693	km
Longitud del Cauce Principal	15.860	km
Cota mayor del cuenca	3604	msnm
Cota mayor del cauce principal	3281	msnm
Cota menor del cauce principal (en el punto de cierre)	2084	msnm
Coeficiente de Compacidad(Kc)	1.77	
Ancho medio de la cuenca	4.32	km
Factor Forma (Kf)	0.196	
Pendiente media de la cuenca hidrográfica	0.08 (8.4%, -4.8 grados)	m/m
Pendiente media del cauce principal.	0.07 (7.88%, -4.51 grados)	m/m
Pendiente del la zona a modelar.	0.9%, (-0.5 grados)	%

9.2. Análisis de caudales máximos

El escurrimiento superficial son los volúmenes de agua provenientes de las precipitaciones que fluyen sobre el suelo en sus estratos elevados para formar corrientes superficiales de agua. El

presente estudio relaciona las diferentes variables requeridas hidrológicamente para el cálculo de caudales máximos.

9.2.1. Tiempo de concentración (Tc)

El tiempo de concentración es el tiempo transcurrido desde el momento en que inicia la precipitación hasta el momento en el que el área total de la cuenca contribuye al escurrimiento superficial (Monsalve, 1999). En la literatura se encuentran formulas que permiten el cálculo de este tipo desarrolladas por diversos autores. Algunas de estas formulas serán empleadas con el fin de establecer el cálculo de este tiempo.

Ecuacion 1 Kirpich (Fuente manual de drenaje INVIAS 2011)

$$T_c = 0.06628 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77}$$

Tc: Tiempo de concentración, en horas (h).

L: Longitud del cauce principal, en kilómetros (km).

S: Pendiente entre las elevaciones máxima y mínima (pendiente total) del cauce principal, en metros por metro (m/m).

Ecuacion 2 Temez (Fuente manual de drenaje INVIAS 2011)

$$T_c = 0.30 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$$

Tc: Tiempo de concentración, en horas (h).

L: Longitud del cauce principal, en kilómetros (km).

S: Pendiente total del cauce principal, en porcentaje (%).

Ecuacion 3 Giandotti (Fuente manual de drenaje INVIAS 2011)

$$T_c = \frac{4 * A^{0.5} + 1.5 L}{25.3 (L * S)^{0.5}}$$

Tc: Tiempo de concentración, en horas (h).

A: Área de la cuenca, en kilómetros cuadrados (km²).

L: Longitud del cauce principal, en kilómetros (km).

S: Pendiente del cauce principal, en metros por metro (m/m).

Estimar el tiempo de concentracion por varios metodos se sustenta en la alta variabilidad de este parametro, de tal forma que se entienda el rango de variacion y por consiguiente la confiabilidad que suministra esta estimacion. Por ello, debe tenerse cuidado en la selección del valor mas adecuado. Finalmente se recomienda utilizar el valor medio de varias ecuaciones eliminando los valores extremos. (Aristizábal, 2012)

Tabla 2. Tiempo de concentracion drenaje río Putumayo por diversas metodologias

Método	Tc (horas)	Tc (minutos)	Tc Media (minutos)
Kirpich	1.55	93	106
Temez	1.65	99	
Giandotti	2.13	128	

9.3. Intensidad duración y frecuencia (IDF)

La curvas IDF constituyen la base climatologica para la estimación de los caudales de diseño, Estas curvas sintetizan las características de los eventos extremos maximos de precipitación de una determinada zona y definen la intensidad media de lluvia para diferentes duraciones de eventos de precipitacion con periodos de retorno especificos.

9.3.1. Curva IDF Estacion SIBUNDOY-IDEAM

A una distancia de 1450 metros de la cuenca alta río Putumayo se localiza la estación climatologica Sibundoy administrada por el IDEAM, la cual cuenta con curvas IDF para diferentes periodos de retorno. A partir de esta informacion se determinará las diferentes intensidades de lluvia para el tiempo de concentración calculado.

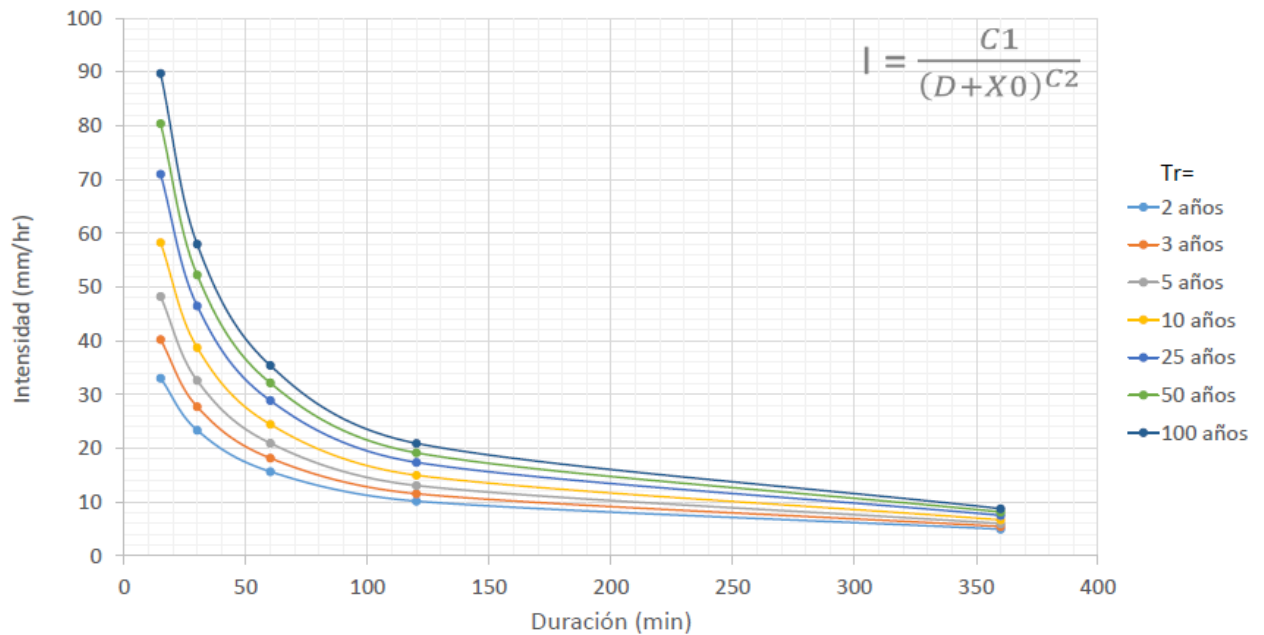
A continuacion se presenta la curva IDF seleccionada para el presente estudio.

Tabla 3. Localizacion de la estacion Sibundoy.

Código	Estación	Categoría	Municipio	Latitud (N)	Longitud(W)	Elevación (m.s.n.m)
4701503	Sibundoy	Climatologica secundaria	Sibundoy	01° 11' 00'' N	76° 55' 00'' W	2010



CURVAS INTENSIDAD DURACION FRECUENCIA - IDF
ESTACIÓN: SIBUNDOY (SIBUNDOY)
CODIGO: 4701503



TR (años)	C1	X0	C2
2	274.513	7.527	0.680
3	351.342	6.580	0.705
5	449.057	6.158	0.731
10	585.697	5.997	0.758
25	775.454	6.013	0.785
50	925.997	6.084	0.802
100	1082.109	6.172	0.816

D (min)	I _{TR=2}	I _{TR=3}	I _{TR=5}	I _{TR=10}	I _{TR=25}	I _{TR=50}	I _{TR=100}
15	33.0	40.1	48.1	58.1	70.7	80.0	89.3
30	23.6	28.2	33.3	39.7	47.7	53.7	59.7
60	15.5	17.8	20.4	23.7	27.8	30.8	33.8
120	9.9	11.2	12.5	14.3	16.5	18.1	19.7
360	5.2	6.0	6.8	7.9	9.2	10.1	11.1

Datos Técnicos

Ventana de información:

1964

a

1995

Años empleados

29

Datos de intensidades ajustados a:

Distribución de probabilidad Gumbel

Parámetros estimados con el método de:

L-Momentos

Fecha de Actualización:

Diciembre de 2016

Abreviaturas y Unidades

TR: Período de retorno (años)

D: Duración (minutos)

I: Intensidad de Precipitación (mm/h)

Actualizado por:

Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos (GIREH), de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. Contrato 113 de 2016.

Fecha de reporte: Marzo 15 de 2017

Figura. 3 Curvas IDF fuente IDEAM

9.4. Periodos de retorno

En la historia aplicada se utiliza indistintamente el concepto de probabilidad $p(x)$ o de periodo de retorno, entendiendo como un porcentaje de los años de ocurrencia de un evento proximo. Sin embargo, el riesgo que ese caudal sea excedido alguna vez durante un cierto intervalo de tiempo, depende tambien de la duracion del intervalo.

Para este calculo se tendrá en cuenta un periodo de retorno de 25 años.

Tabla 4. Intensidades para diferentes periodos de retorno (Fuente elaboracion propia con datos del IDEAM)

Tr (años)	Tc 106 minutos
	I (mm/h)
2	11
3	12
5	14
10	15.5
25	18
50	21
100	23

9.5. Coeficiente de escorrentia

Representa la fracción de agua de precipitación que genera escorrentia cuando se satura el suelo, su valor depende a características como cobertura vegetal, tipo de suelo y pendiente del terreno.

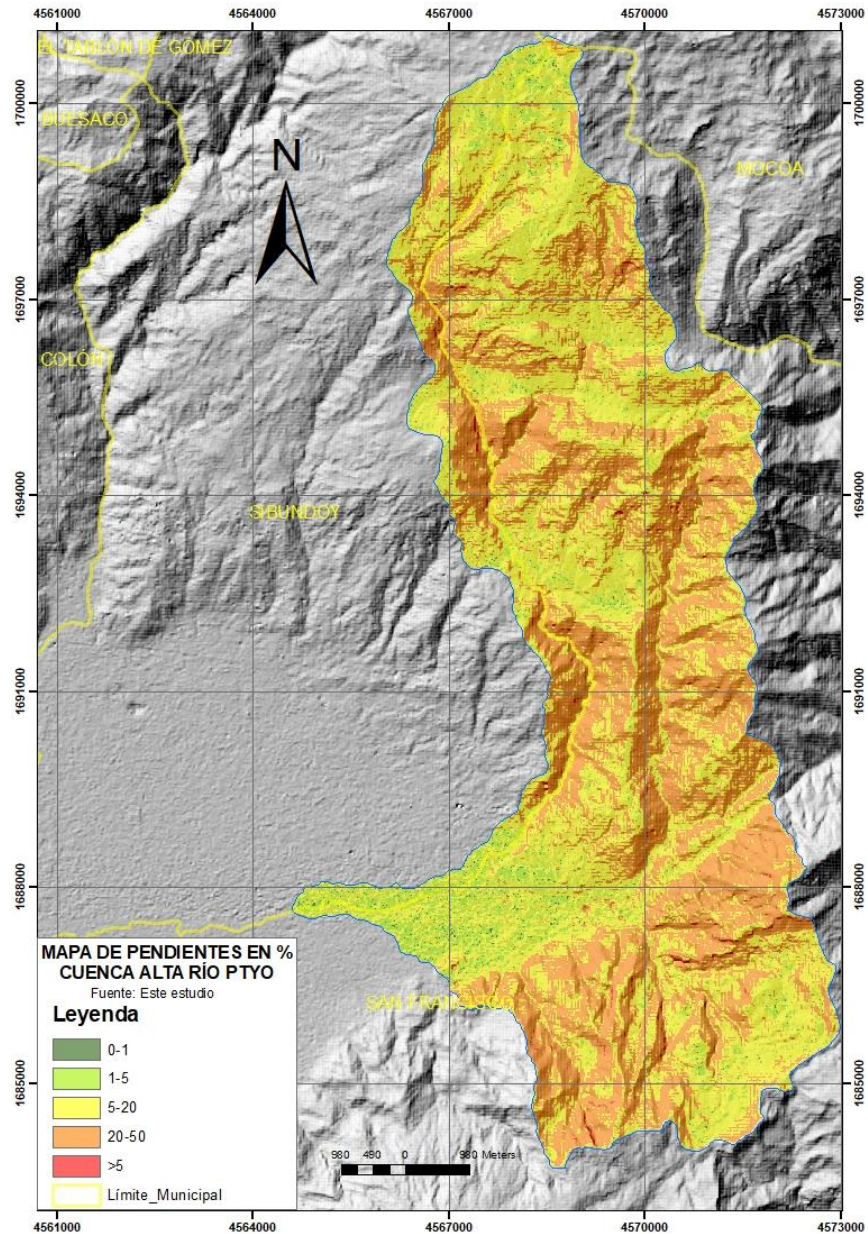


Figura. 4 Mapa de pendientes en porcentaje (%). Elaboración propia.

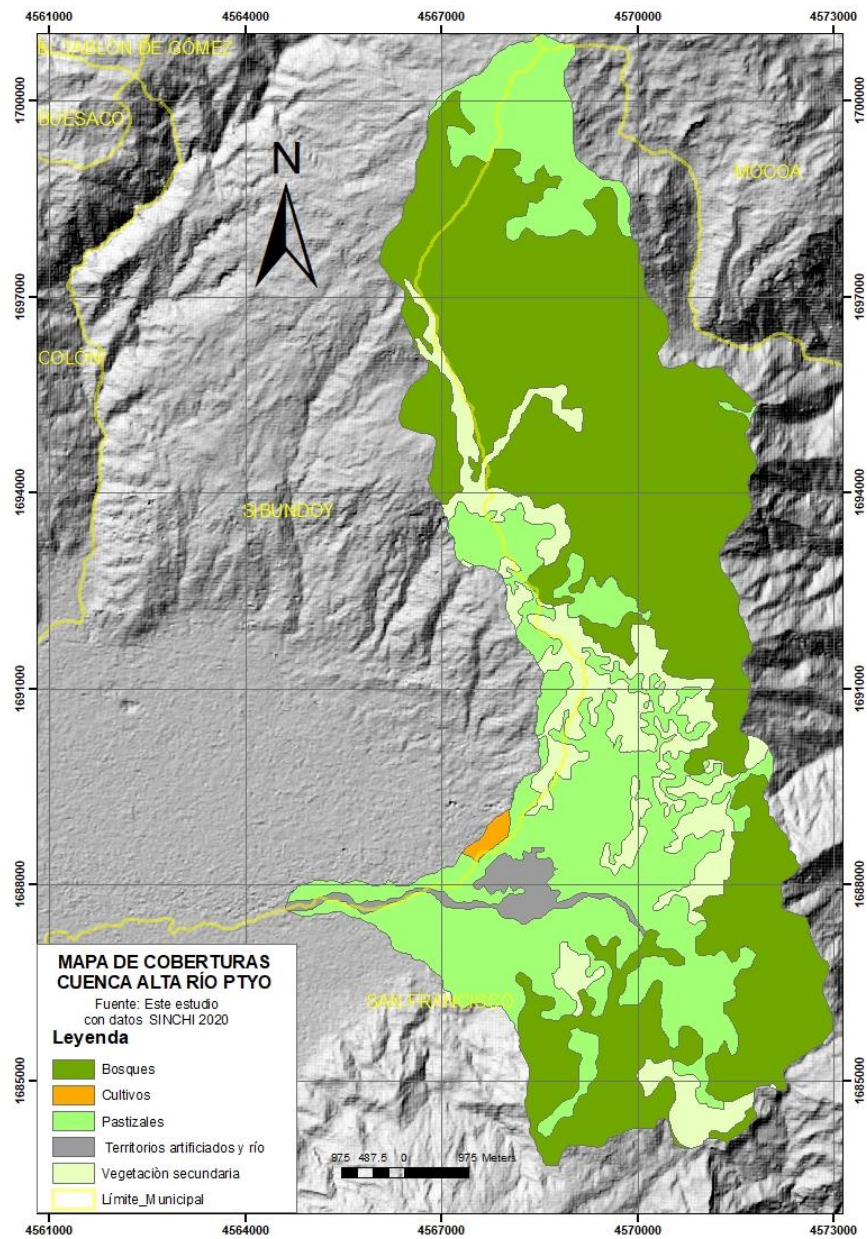


Figura. 5 Mapa de cobertura de la cuenca alta del río Putumayo (modificado SINCHI, 2020).

Tabla 5. Coeficientes de escorrentia, según Benítez et al.(1980), citado por Lemus y Navarro (2003).

COBERTURA DEL SUELO	TIPO DE SUELO	PENDIENTE (%)				
		> 50	20-50	5-20	1-5	0-1
Sin vegetación	Impermeable	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60
	Semipermeable	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
	Permeable	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
Cultivos	Impermeable	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
	Semipermeable	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	Permeable	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20
Pastos, vegetación ligera	Impermeable	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45
	Semipermeable	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
	Permeable	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15
Hierba	Impermeable	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	Semipermeable	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
	Permeable	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10
Bosque, vegetación densa	Impermeable	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
	Semipermeable	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25
	Permeable	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05

Tabla 6. Coeficientes de escorrentia según la cobertura de la cuenca.

Unidad de cobertura	Area km ²	Coefficientes de escorrentia (C)
Bosque	36.78	0.40
Cultivos	0.23	0.45
Pastizales	21.72	0.25
Territorios artificiaados	1.36	0.55
Vegetacion secundaria	8.50	0.25

Si la cuenca de estudio esta integrada por diferentes tipos de cobertura, se calcula el coeficiente de escorrentia promedio ponderado.

$$C = \frac{C_1 A_1 + C_2 A_2 + \dots + C_i A_i}{A_1 + A_2 + \dots + A_i}$$

$$C=0.33$$

9.6. Caudales maximos instantáneos anuales de crecientes

Considerando que la presente evaluacion es de nivel basico, asi como las limitaciones e incertidumbres implícitas en el modelo de elevacion del terreno disponible, se opta por emplear el método racional, el cual define el caudal para el sector de estudio en la cuenca alta del río Putumayo como:

$$Q_p = 0,278 \cdot C \cdot I \cdot A$$

Dónde:

- Q_p : caudal (m³/s).
 C : coeficiente de escorrentía (adimensional)
 I : intensidad de la lluvia (mm/h).
 A : área de la cuenca hasta el sitio a intervenir (km²).

Tabla 7. Resultados del caudal para diferentes periodos de retorno

TR	Coeficiente de escorrentía (C)	Intensidad (mm/hr)	Area de drenaje (km ²)	Caudal aportante Q (m ³ /s)
2	0.33	11	68.600	70.69
3		12		75.52
5		14		88.10
10		15.5		97.54
25		18		113.28
50		21		132.16
100		23		144.74

9.7. Análisis Hidráulico

Se realiza con el programa HEC-RAS desarrollado por Hydrologic Engineering Center en su version 5.0.7. El procedimiento basico de calculo de este programa se basa en la modelacion de inundacion en 2d de un sector del río Putumayo utilizando el DEM Alos Palsar de 12.5 metros de

lado, el caudal de diseño para un periodo de retorno de 25 años (**Tabla 1** tabla 7), y utilizando las características fisiograficas de la zona de evaluacion.

Para este analisis fue evaluado un tramo de 3.134 km y un area de 410 km² el coeficiente de rugosidad para el diseño se utilizó de acuerdo a la literatura correspondiente al material tipo río insitu para este tipo de drenajes.

Tabla 8. Coeficiente de rugosidad (Fuente: Bolinaga, J.J “Drenaje Urbano” INOS 1979

Tipo que canal	Buena calidad	Regular calidad
Tierra, seccion irregular y malezas	0.030	0.035
Tierra, con lados limpios de vegetación y fondo de grava	0.025	0.030
Roca lisa y con pocas irregularidades	0.035	0.040
Tierra, limpio de vegetación	0.016	0.018
Roca dentada y con muchas irregularidades.	0.040	0.045

El valor del coeficiente de rugosidad utilizado según las condiciones del lugar sera de **0.025**

9.7.1. Modelamiento hidraulico del tramo

A partir de la informacion cartografica y según los caudales de diseño obtenido por analisis hidrológico, se procedió con la ayuda del programa HEC-RAS a procesar la informacion con los siguientes valores para la simulacion de la inundacion.

Flow Hydrograph

SA: aregeometria BCLine: aguasarriba

Read from DSS before simulation Select DSS file and Path

File:

Path:

Enter Table Data time interval: 1 Hour

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

Use Simulation Time: Date: 15JUL2021 Time: 00:00

Fixed Start Time: Date: 15JUL2021 Time: 00:00

No. Ordinates

Hydrograph Data			
	Date	Simulation Time (hours)	Flow (m3/s)
59	17jul2021 1000	58:00	10
60	17jul2021 1100	59:00	10
61	17jul2021 1200	60:00	10
62	17jul2021 1300	61:00	10
63	17jul2021 1400	62:00	10
64	17jul2021 1500	63:00	10
65	17jul2021 1600	64:00	10
66	17jul2021 1700	65:00	10
67	17jul2021 1800	66:00	10
68	17jul2021 1900	67:00	10
69	17jul2021 2000	68:00	10
70	17jul2021 2100	69:00	10
71	17jul2021 2200	70:00	10
72	17jul2021 2300	71:00	10
73	17jul2021 2400	72:00	10
74	18jul2021 0100	73:00	113
75	18jul2021 0200	74:00	113
76	18jul2021 0300	75:00	113
77	18jul2021 0400	76:00	113
78	18jul2021 0500	77:00	113
79	18jul2021 0600	78:00	113
80	18jul2021 0700	79:00	113
81	18jul2021 0800	80:00	113
82	18jul2021 0900	81:00	113
83	18jul2021 1000	82:00	113

Time Step Adjustment Options ("Critical" boundary conditions)

Monitor this hydrograph for adjustments to computational time step

Max Change in Flow (without changing time step):

Min Flow: Multiplier: EG Slope for distributing flow along BC Line: 0.05 TW

Figura. 6. Valores de caudal utilizados en el programa HEC-RAS para la simulación de inundación incluyendo el caudal de inundación de 113 m³/s para el 18 de Julio de 2021.

9.8. Modelamiento inundación 2021 río Putumayo

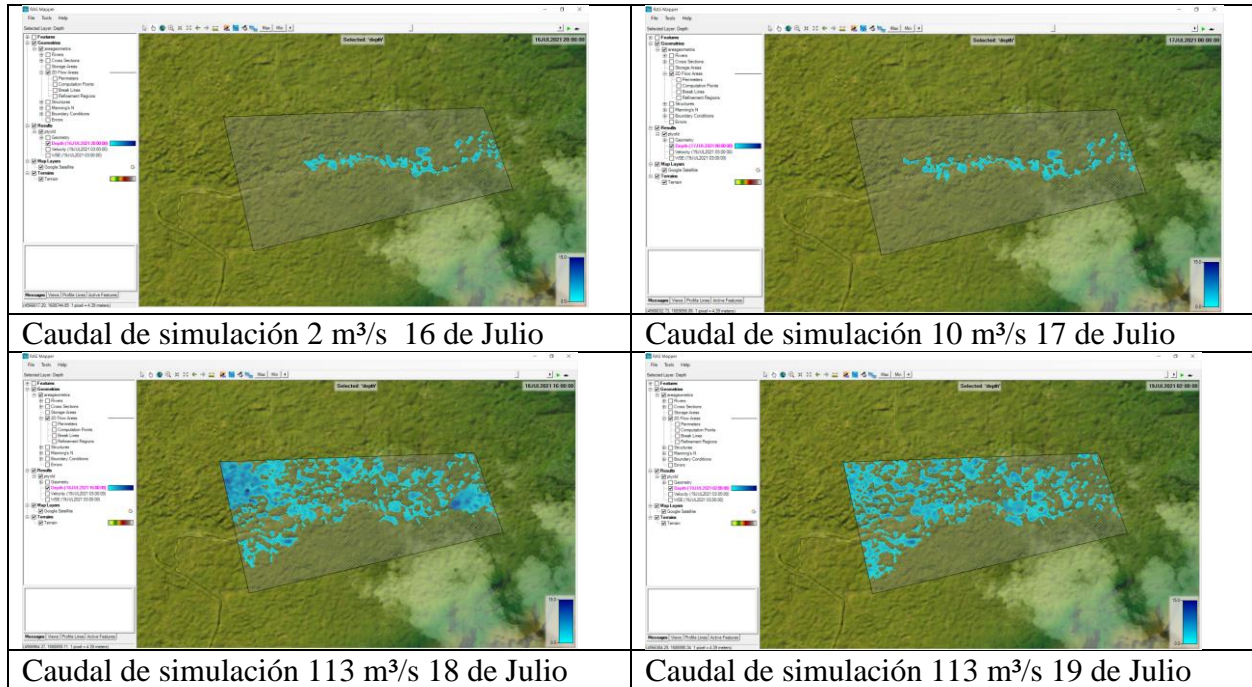


Figura.7 Simulación de la inundación sobre el río Putumayo utilizando el programa HEC-RAS, en color azul oscuro son las mayores profundidades hasta 15 metros.

9.9. Procesamiento de imágenes satelitales

Se consultaron imágenes gratuitas como sentinel 1, sentinel 2, landsat 8, satélites Google y Bing Maps descargadas de páginas de Internet, así como las imágenes Spot 5 proporcionadas por Corpoamazonia, para delimitar rasgos de inundación de diferentes años, se utilizó el Dem Alos Palsar para verificar los niveles de inundación con base en diferencia de cotas y rangos de profundidad obtenidos de la modelación hidráulica, seguidamente se prosiguió con el traslape y procesamiento de estas imágenes con el programa Arc GIS comparando las bandas del color natural sentinel 2, con las imágenes radar sentinel 1 SAR para una mejor cartografía actualizada de las áreas inundables.

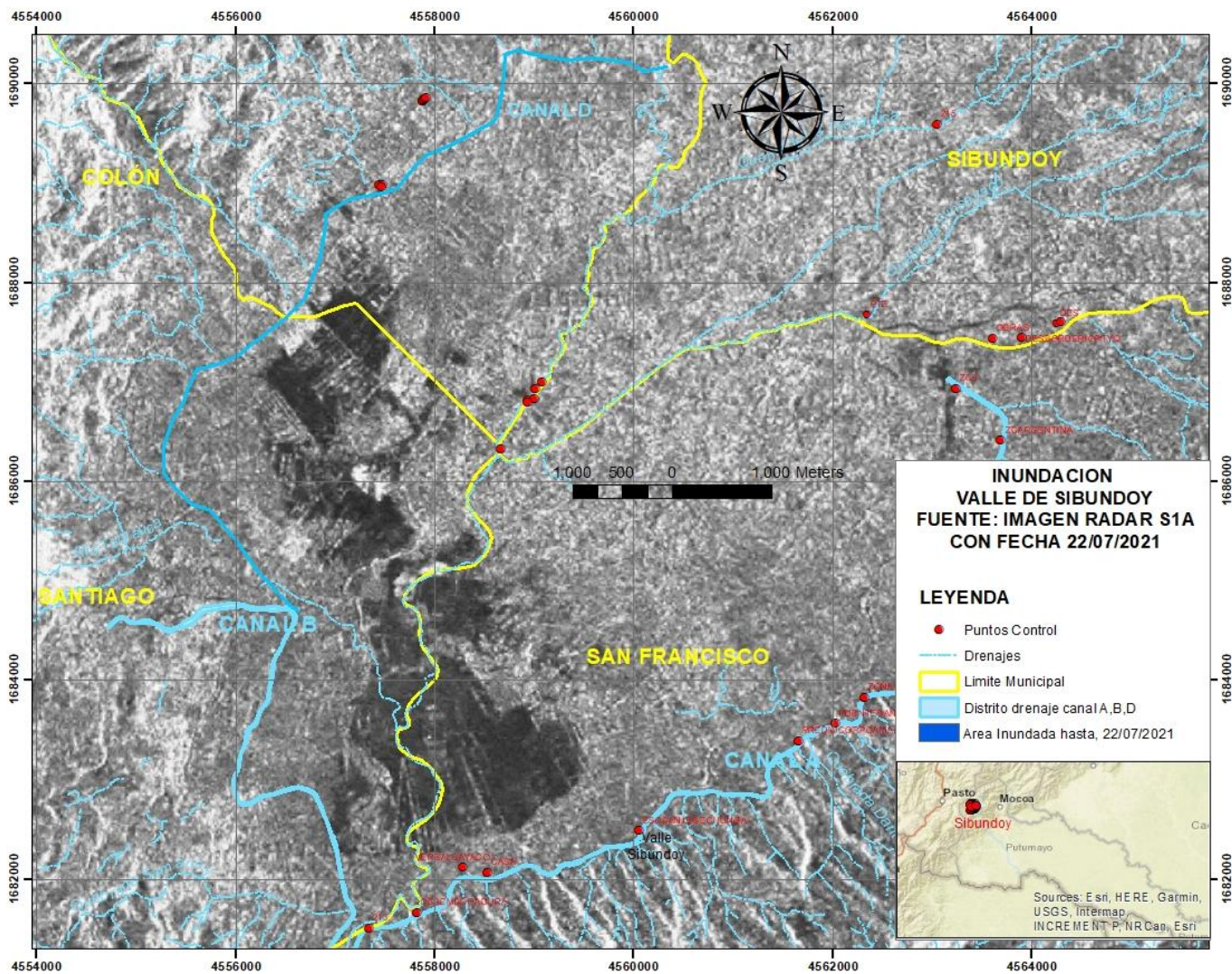


Figura. 8 Imagen sentinel 1, de julio de 2021 en formato tif con procesamiento en el programa SNAP.

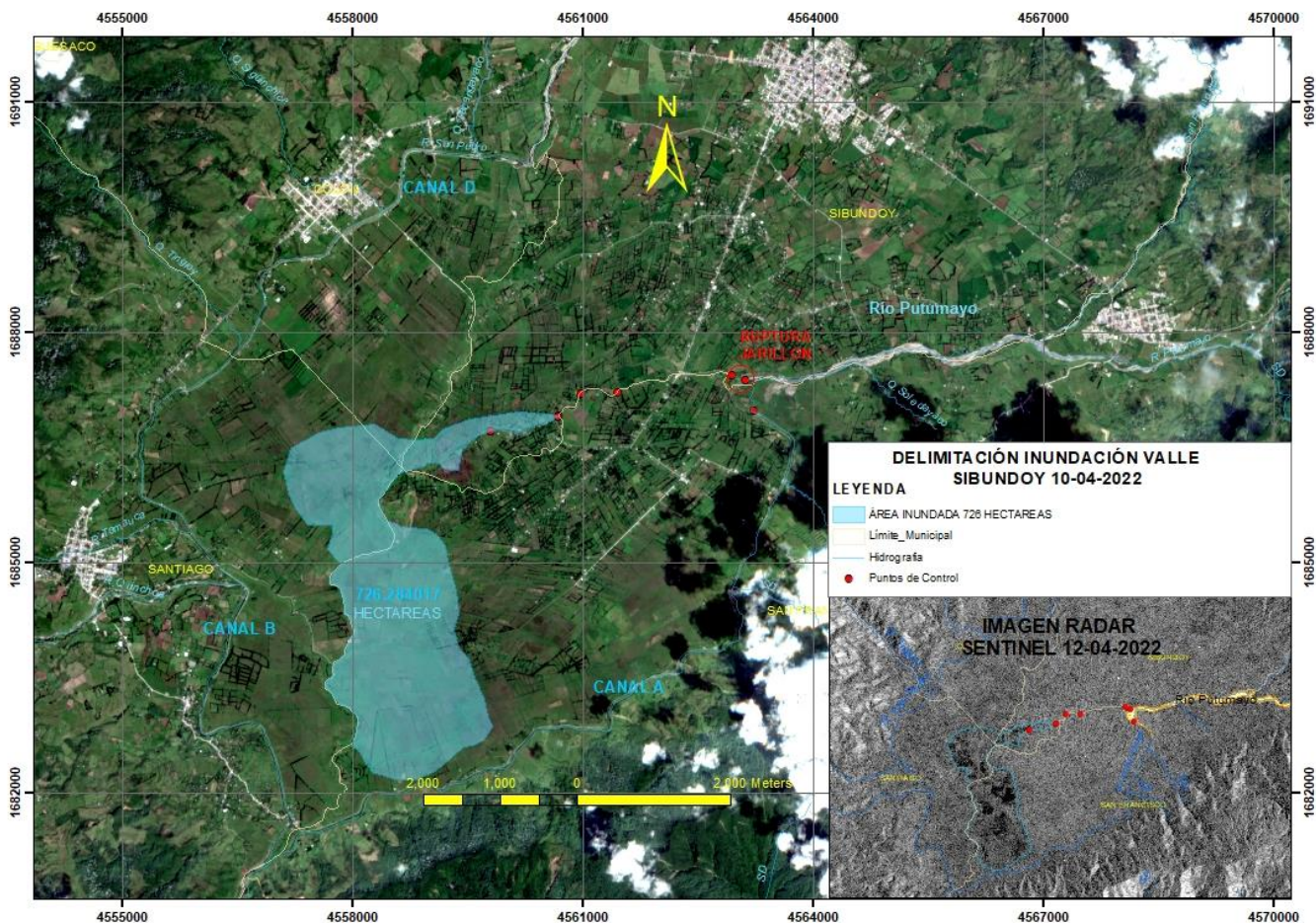


Figura. 10 Resultado de procesamiento de imágenes sentinel 1 y 2, de abril de 2022 en formato shapefile con el programa ARCGIS.

9.10. Categorización de amenaza por inundación

La categorización de amenaza por inundación se realizó con base en lo plasmado en la guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación del IDEAM y centro nacional de Modelación CNM, los cuales representan la tres categorías de acuerdo al Departamento del Interior de los Estados Unidos, a través de la comisión técnica de ingeniería e investigación donde se elaboró el Memorando Técnico N°11 (Acer Technical Memorandum N°11, US Department of

Interior, Bureau of Reclamation, 1988,) en donde clasifica la amenaza en función de los elementos expuestos con el fin de comunicar el efecto combinado de la profundidad de la inundación y la velocidad en estructuras, casas móviles, varios tipos de vehículos y peatones.

En la siguiente grafica muestran la clasificación de amenaza por inundación adaptada por el IDEAM:

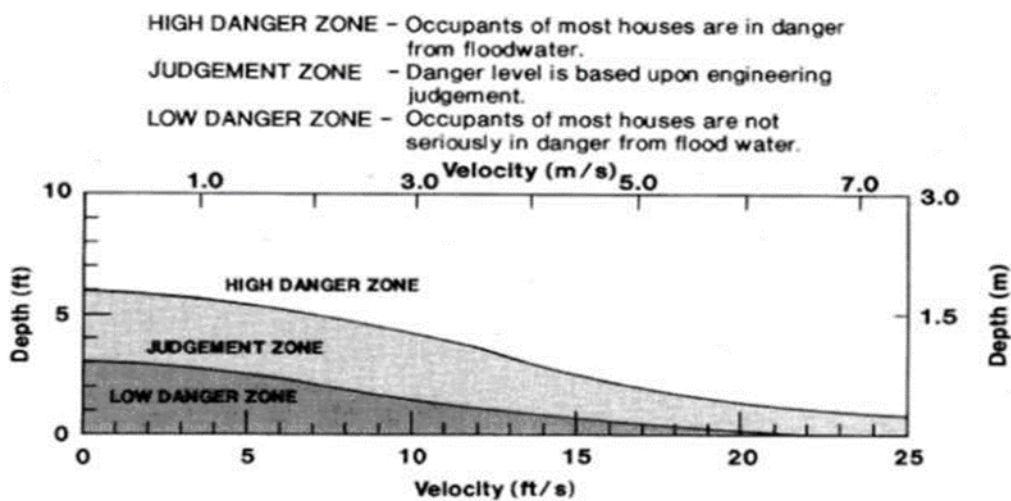





Figura. 11 Relación Profundidad-Velocidad para determinación del grado de amenaza por la USBR.

Basados en la figura 11, y teniendo en cuenta que para que la zona de estudio presenten rangos de profundidades de inundación distintas al método aplicado por el IDEAM, se puede destacar que no importa la combinación profundidad-velocidad dado que a cualquier valor de velocidad la profundidad tendrá una gran variabilidad, por lo tanto la zona de estudio en su parte mas baja queda en amenaza alta y media, de acuerdo a lo anterior se elaboro la siguiente tabla para la categorización de Inundación.

Tabla 9 Categorización de amenaza por inundación para el Valle del Sibundoy (Elaboración propia).

CATEGORIZACION DE AMENAZA POR INUNDACION			
SIMBOLO	CATEGORIA	DESCRIPCION	AREA (ha)
	ALTA	Los ocupantes de la mayoría de las viviendas, fincas e infraestructura civil se encuentran en peligro de inundación. Se localizan en las cotas mas baja del Valle de Sibundoy entre 2050-2069 msnm sobre los depositos fluvíolacustres Sibundoy	3808
	MEDIA	Los ocupantes de la mayoría de las viviendas, fincas e infraestructura civil se encuentran en peligro y daños moderados de inundación. Se localizan en las cotas 2069 - 2076 msnm sobre los Abanicos y depositos fluvíolacustres Sibundoy	1725
	BAJA	Los ocupantes de la mayoría de las viviendas fincas e infraestructura civil no se encuentran en peligro de inundación, Se localizan en las cotas 2076-3000 msnm. sobre rocas etamorficas, igneas, y sedi- mentarias que conforman el relieve alto.	

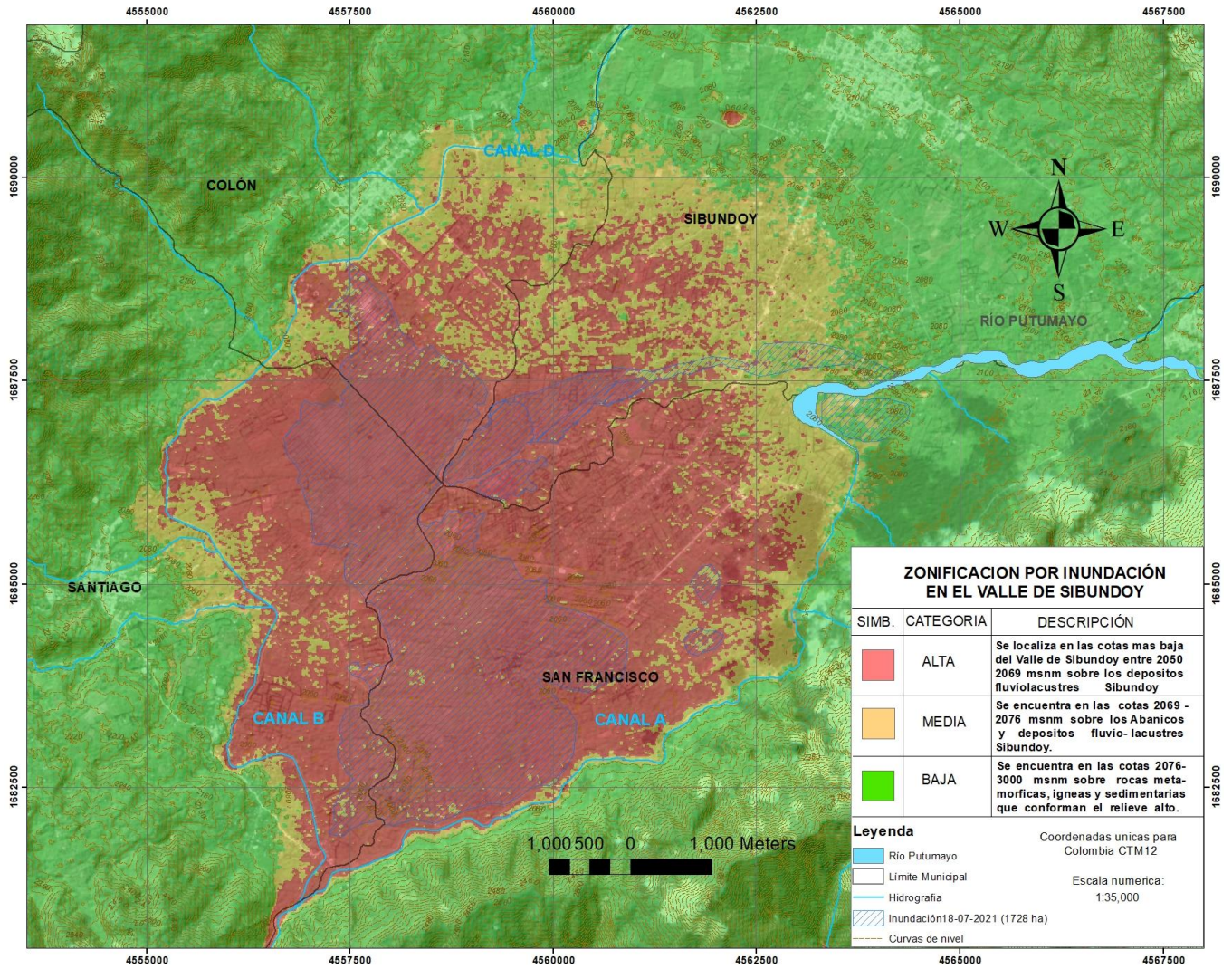


Figura. 12 Mapa de zonificación por inundación en el valle de Sibundoy.

10. Conclusiones

1. El caudal máximo a partir de lluvias para el periodo de retorno de 25 años de acuerdo a las curvas IDF de la estación Sibundoy proporcionadas por el IDEAM y parámetros fisiográficos de la cuenca fue de 113 m³/s.
2. De acuerdo al trabajo de campo y modelamiento hidráulico de la cuenca alta del río Putumayo se pudo identificar que los canales y río Putumayo se encuentran colmatados de sedimentos aluviales y cada vez disminuye su sección hidráulica, por lo tanto la cantidad de agua que fluye por esta sección no tendrá capacidad suficiente y se desbordará creando inundaciones.
3. Con la realización de la zonificación por inundación realizada para el Valle de Sibundoy se encuentran en amenaza alta de inundación 3808 hectáreas entre las cotas 2050- 2069 msnm dado que esta es la zona más baja de la zona y de acuerdo con la recurrencia de inundaciones en los últimos años. Así mismo se encuentra 1725 hectáreas en amenaza media entre las cotas 2069- 2076.
4. La modificación del régimen hidrológico del valle de Sibundoy con la construcción del distrito de drenaje para habilitar zonas naturalmente inundables para la producción agrícola genera vulnerabilidad de inundación en estas zonas debido a las altas lluvias dado que en el momento las instituciones competentes entre ellas la Agencia de

Desarrollo Rural (ADR) encargada de administrar el distrito y alcaldías municipales no tienen un mantenimiento constante como lo requiere esta obra civil.

11. Recomendaciones

1. Se recomienda a las instituciones competentes Alcaldía Municipal, El departamento, Unidad Nacional para la gestión del riesgo de desastres UNGRD la Agencia de desarrollo Rural ADR como medida de emergencia realizar obras de mitigación, como descolmatación, ampliación de la sección hidráulica de canales, ríos y quebradas así como también apilamiento de material fluvial tipo enrocado (Jarillón) en los sectores más críticos como medida de reducción de impactos por inundaciones a viviendas y cultivos. Así como también para salvaguardar las obras públicas como la vía y mantener la movilidad del sector y prevenir futuras tragedias.
2. Para todas las obras definitivas que se propongan en el sector (gaviones, bolsacretos) se les recomienda realizar descolmatación del sector en mención puesto que el área presenta topografía relativamente plana, es una zona activa de depositación de materiales aluviales y el cauce activo es variable y dinámico en estas condiciones; por lo tanto, los puntos críticos o de amenaza posiblemente se desplazan a otro lugar quedando la obra civil (Jarillón) sin cumplir el objetivo propuesto. Adicionalmente, debe contar con estudios hidrológicos, hidráulicos, de socavación, geología, geomorfología que permita diseñar las obras más adecuadas para este tipo de problemáticas.
3. Promover, educar y concientizar a las comunidades asentadas en las rondas hídricas por posibles inundaciones y erosión lateral para que no se sigan urbanizando estas áreas de amenaza y se promueva su protección.

4. Crear sobre las zonas de depositación de los ríos Putumayo, San Pedro, y Putumayo un área de explotación de material aluvial con diseños que ayude a controlar la alta sedimentación en el distrito de drenaje.

5. A los Consejos Departamentales y Municipales de Gestión del Riesgo de Desastres, mantener activos los planes de prevención ante el incremento de lluvias con el fin de evitar la ocurrencia de emergencias y desastres, revisando los recursos técnicos, logísticos y operativos que permitan poner en marcha acciones de preparación, prevención y respuesta de manera inmediata.

12. Referencias

Alarcón Álvarez, R. A., Castillo Bastidas, M. A., & Narvárez Campaña, N. L. (2016). Evaluación de susceptibilidad por inundación de la Cuenca Alta del Río Putumayo-Valle de Sibundoy.

Cruz, K. S., Escobar, Y. C., & Díaz, Á. J. Á. (2013). Análisis de aspectos que incrementan el riesgo de inundaciones en Colombia. *Revista Luna Azul (On Line)*, (37), 219-238.

Delgado-Gómez, M. D. (2019). Evaluación de la generación de sedimentos en el distrito de drenaje del Valle de Sibundoy, departamento del Putumayo (Colombia). *Ambiente y Desarrollo*, 23(44).

Herrera Sánchez, M. D., & Navarro Bermúdez, O. D. (2021). Evaluación de riesgo de desastre por inundación usando herramientas SIG y HEC HMS y RAS para el Distrito de Conservación de Suelos Kirpas, Pinilla La Cuerera de la ciudad de Villavicencio–Meta.

IDEAM, CNM. (2018). Guía Metodológica para la elaboración de mapas de inundación.

MINISTERIO DE AGRICULTURA, INCODER (2013) programa de servicios complementarios para distritos de adecuación de tierras convenio N° 000536. Plan de manejo ambiental Distrito de drenaje Valle de Sibundoy.

MAVDT, CORPOAMAZONIA. (2009). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Alta del Río Putumayo. Sibundoy.

Moreno, J. M., Sánchez, J. M., & Espitia, H. E. (2020). Use of computational intelligence techniques to predict flooding in places adjacent to the Magdalena River. *Heliyon*, 6(9), e04872.

Polanía, B. S., Aldana, A. M., Bottin, M., Cruz, D. M., Castro-Lima, F., Stevenson, P. R., & Sanchez, A. (2020). Effect of seasonal rains and floods on seedling recruitment and compositional similarity in two lowland tropical forests. *Forests*, 11(12), 1297.

Rodríguez, M. E. S. (2020). Zonificación de la amenaza ante inundaciones a partir de un método de evaluación multicriterio en la ciudad de Santiago de Cali, Colombia. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (25), 47-76.

Rodriguez, M. E. S., Peña, L. C. B., Cejudo, L. C. A., & Hurtado, E. D. J. S. (2020). Identificación de zonas de inundación a partir de imágenes (SAR) y de eventos históricos de inundación: caso de estudio Santiago de Cali, Colombia. *Cuadernos geográficos de la Universidad de Granada*, 59(2), 308-329.

A. Anexo: Nombrar el anexo A de acuerdo con su contenido

Los Anexos son documentos o elementos que complementan el cuerpo del trabajo y que se relacionan, directa o indirectamente, con la investigación, tales como acetatos, cd, normas, etc.

Los anexos deben ir numerados con letras y usando el estilo “Título anexos”.

B. Anexo: Nombrar el anexo B de acuerdo con su contenido

Al final del documento es opcional incluir índices o glosarios. Éstos son listas detalladas y especializadas de los términos, nombres, autores, temas, etc., que aparecen en el trabajo. Sirven para facilitar su localización en el texto. Los índices pueden ser alfabéticos, cronológicos, numéricos, analíticos, entre otros. Luego de cada palabra, término, etc., se pone coma y el número de la página donde aparece esta información.