



**Estimación probabilística de la amenaza de inundación de la cuenca alta de río
Chicamocha en el municipio de Paipa-Boyacá**

**Brayan Hernando Silvestre Urrutia
Estefany Carolina Vásquez González**

**Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil
Ingeniería civil
Bogotá D.C., Colombia
2021**

**Estimación probabilística de la amenaza de inundación de la cuenca alta de río
Chicamocha en el municipio de Paipa-Boyacá**

Proyecto de investigación

Brayan Hernando Silvestre Urrutia
Estefany Carolina Vásquez González

Tesis presentada como requisito parcial para obtener el título de:

Ingeniero civil

Director

Ph. D, Juan Pablo Rodríguez Rincón

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil
Ingeniería civil
Bogotá D.C, Colombia

2021

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

NOTA DE ACEPTACIÓN

Carlos Martin Molina Gallego
Jurado

Emma Ordoñez
Jurado

Lugar de desarrollo del trabajo de grado:

Bogotá, Colombia.

Universidad Antonio Nariño, Sede Sur.

TUTOR DE TESIS

Ph D. JUAN PABLO RODRÍGUEZ RINCÓN

Bogotá D.C., junio de 2021

Dedicatoria y Agradecimientos

Quiero primeramente agradecerle y dedicarle este trabajo a Dios, a mis padres y hermanos que son los pilares de mi vida; agradecerles por su apoyo comprensión paciencia y cariño durante este proceso.

Además, agradecerle al profesor Juan Pablo Rodríguez por su conocimiento guía y acompañamiento en la realización de este trabajo.

Gracias a todo el equipo docente de la Universidad Antonio Nariño por la formación brindada.

Atentamente: Estefany Vásquez

Este gran logro se lo dedico a todas las personas que me han apoyado en este punto de mi vida a mis padres, hermanos e hijos, por el apoyo y fuerza en las circunstancias más difíciles de mi carrera.

Además, agradecerle al profesor Juan Pablo Rodríguez por su conocimiento guía y acompañamiento en la realización de este trabajo.

Gracias a todo el equipo docente de la Universidad Antonio Nariño por la formación brindada.

Atentamente: Brayan Silvestre

Tabla de contenido

| | |
|---|-------------------------------|
| Resumen | 1 |
| Abstrac | ¡Error! Marcador no definido. |
| 1 Introducción | 3 |
| 2 Objetivos | 5 |
| 2.1 General. | 5 |
| 2.2 Específicos. | 5 |
| 3 Marco teórico | 6 |
| 3.1 Causas de inundaciones..... | 6 |
| 3.2 Tipo de inundaciones. | 7 |
| 3.3 Modelación numérica para inundaciones..... | 8 |
| 3.4 Discretización espacial..... | 8 |
| 3.5 Modelo unidimensional..... | 9 |
| 3.6 Modelo bidimensional..... | 9 |
| 3.7 Modelos Cuasi-2D..... | 9 |
| 3.8 Modelo tridimensional. | 10 |
| 4 Estado del arte | 12 |
| 4.1 Importancia del suelo en las inundaciones..... | 17 |
| 4.2 Evaluación del riesgo de inundaciones..... | 18 |
| 4.3 Vulnerabilidad en las zonas propensas a inundaciones..... | 19 |
| 4.4 Riesgo de inundaciones..... | 20 |
| 4.5 Evaluación del impacto de Karun 2019 Río inundación en río sedimento en área de la ciudad de Ahvaz, Irán..... | 21 |
| 5 Definición zona de estudio | 23 |
| 5.1 Descripción del municipio Paipa – Boyacá..... | 23 |
| 5.2 Descripción de la zona de estudio..... | 26 |
| 5.3 Histórico de inundaciones en Paipa – Boyacá. | 30 |
| 6 Metodología | 40 |
| 6.1 Fase 1..... | 40 |
| 6.1.1 Estaciones dentro de la zona de estudio (Paipa-Boyacá)..... | 40 |
| 6.2 Fase 2..... | 41 |
| 6.2.1 Índice Topográfico de Humedad (TWI). | 41 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 6.2.2 | Parámetro morfométrico asociado a la red de drenajes. | 44 |
| 6.2.2.1 | Orden de los cauces. | 44 |
| 7 | Análisis de resultados | 47 |
| 7.1 | Período de retorno de las estaciones pluviométricas..... | 47 |
| 7.1.1 | Estación La Sierra 24025030 (Paipa-Boyacá). | 47 |
| 7.1.1.1 | Periodo de Retorno a 25 años. | 51 |
| 7.1.1.2 | Periodo de Retorno a 50 años. | 51 |
| 7.1.1.3 | Periodo de Retorno a 100 años. | 52 |
| 7.2 | Modelo digital de elevación (DEM)..... | 53 |
| 7.3 | Índice Topográfico de Humedad (TWI ó ITH)..... | 55 |
| 7.4 | Geología y Geomorfología de la cuenca alta del Chicamocha. | 57 |
| 7.4.1 | Geología de la cuenca. | 57 |
| 7.4.2 | Geomorfología de la cuenca. | 58 |
| 7.5 | Caudales máximos del río Chicamocha y cercanías. | 58 |
| 7.6 | Caudales medios del río Chicamocha y cercanías. | 59 |
| 7.7 | Caudales mínimos del río Chicamocha y cercanías. | 60 |
| 8 | Conclusiones | 61 |
| 9 | Referencias | 63 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Inundación. Fuente: (Mendez, 2020)..... | 7 |
| Figura 2. Aproximación 1D (izquierda) y cuasi - 2D (derecha): Fuente: (AGUA, 2014)..... | 10 |
| Figura 3. Malla 2D estructurada en el cauce y no estructurada en llanuras (izquierda) y 3D (derecha). Fuente: (Bladé, 2014). | 11 |
| Figura 4. Deformaciones de los cauces. Fuente: (Ochoa rubio, 2011) | 14 |
| Figura 5. Cuenca alta del río Chicamocha. Fuente: (Corpoboyacá, 2011)..... | 17 |
| Figura 6. Río Karum. Fuente: (wikipedia)..... | 21 |
| Figura 7. Sistema de información turística en Boyacá. Fuente: (regional, 2018)..... | 24 |
| Figura 8. Ubicación geográfica de la zona de estudio en Paipa-Boyacá. Fuente: Propia..... | 26 |
| Figura 9. Cuencas hidrográficas del municipio de Paipa-Boyacá. Fuente: Propia..... | 27 |
| Figura 10. Cuencas Hidrográficas ubicada en el municipio de Paipa. Fuente:Propia:..... | 28 |
| Figura 11. Afluentes principales del río Chicamocha. Fuente: Propia | 29 |
| Figura 12. Subcuencas Hidrográficas ubicadas en el municipio de Paipa. Fuente: Propia | 29 |
| Figura 13. Inundación en la zona urbana de Paipa-Boyacá. Fuente: (Vanguardia, 2012)..... | 31 |
| Figura 14. Inundación en la zona rural de Paipa-Boyacá. Fuente: (Millan et al., 2011) | 32 |
| Figura 15. Afectaciones por las inundaciones en el municipio de Paipa – Boyacá. Fuente: (Caracol Radio, 2017)..... | 35 |
| Figura 16. Mapa indicador de porcentajes de niveles de amenazas por inundación en cuenca alta del río Chicamocha. Fuente: (Alexandra et al., 2015) | 38 |
| Figura 17. Mapa de localización de los escenarios en riesgo priorizados de la cuenca alta del río Chicamocha. Fuente: (Alexandra et al., 2015) | 39 |
| Figura 18. Metodología del proyecto. Fuente: Propia | 40 |
| Figura 19. Análisis topográfico para el cálculo del ITH y su posterior clasificación en clases relativas a la magnitud de la concentración del escurrimiento. Fuente: (José & Ulrich, 2012) ... | 41 |
| Figura 20. Mapa del índice topográfico de humedad de Paipa-Boyacá. Fuente: propia | 42 |
| Figura 21. Orden de los cauces según el método de Horton. Fuente: Propia | 44 |
| Figura 22. Red hidráulica generado por la herramienta SAGA GIS. Fuente: Propia | 45 |
| Figura 23. Mapa de la red hídrica de Paipa-Boyacá. Fuente: Propia..... | 46 |
| Figura 24. Modelo de elevación digital de la zona de estudio Paipa. Fuente: Propia | 53 |
| Figura 25. Mapa sobre el índice Topográfico de Humedad de Paipa. Fuente: Propia | 56 |
| Figura 26. Mapa sobre la geología y geomorfología de la cuenca del Chicamocha. Fuente: (Alexandra et al., 2015) | 57 |

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Tipos de suelo en el municipio de Paipa. Fuente: (Rigaud, 2008) | 18 |
| Tabla 2. Número de víctimas en el año por inundaciones. Fuente: (Pistrik, 2016) | 19 |
| Tabla 3. Crecimiento poblacional en Paipa-Boyacá. Fuente: (Desastres, 2013) | 25 |
| Tabla 4. Histórico de inundaciones en Paipa. Fuente: (Rodríguez Díaz & Silva Calixto, 2018). 34 | |
| Tabla 5. Niveles de amenaza. Fuente:(Alexandra et al., 2015) | 36 |
| Tabla 6. Coordenadas Geográficas de las estaciones de la zona de estudio Paipa – Boyacá. Fuente: IDEAM | 41 |
| Tabla 7. Grado de amenaza según el índice topográfico de humedad. Fuente: Propia | 43 |
| Tabla 8. Grado de amenaza acorde al mapa del índice topográfico de humedad respecto al área de estudio. Fuente: Propia..... | 43 |
| Tabla 9. Período de retorno de las estaciones de la cuenca alta del Chicamocha. Fuente: Propia | 47 |
| Tabla 10. Mínimos y máximos de precipitación estación Tunguavita. Fuente: Propia | 49 |
| Tabla 11. Periodos de retorno 25, 50 y 100 años con variables reducidas estación La Sierra. Fuente: Propia | 50 |
| Tabla 12. Tipo del suelo boyacense según la altura (m.s.n.m). Fuente: Propia..... | 54 |
| Tabla 13. Grado de amenaza acorde al mapa del índice topográfico de humedad de Paipa: Fuente: propia | 55 |
| Tabla 15. Caudales máximos anuales. Fuente: Propia..... | 59 |
| Tabla 16. Caudales Medios Anuales. Fuente: Propia | 60 |
| Tabla 17. Caudales Mínimos Anuales. Fuente: Propia..... | 60 |

Lista de gráficos

Gráfica 1. Indicador de porcentaje de amenazas por inundación. Fuente: Propia 36

Resumen

En los últimos años, las inundaciones han aumentado considerablemente en todo el mundo, colocando en vulnerabilidad a las sociedades por las fuerzas destructivas de la naturaleza. Colombia, no siendo la excepción, ha experimentado catastróficas y costosas inundaciones en diferentes departamentos, convirtiéndose en la amenaza natural más relevante y costosa. Por ese motivo, es de gran relevancia para el país, generar estrategias de mitigación y sistemas de alerta temprana.

El departamento de Boyacá en la última década se ha visto afectado debido a las inundaciones producidas por unos niveles elevados de la precipitación, uno de los municipios más vulnerables ante este evento ha sido Paipa, el cual ha tenido inundaciones en zona rural y en el casco urbano debido al desbordamiento de la cuenca alta del río Chicamocha por el incremento de su caudal y desvío de su cauce a causa de la alta precipitación.

Por este motivo, se pretende realizar una descripción histórica de las inundaciones que han ocurrido en el municipio de Paipa en la última década a causa del desbordamiento del río Chicamocha, y adicionalmente elaborar una descripción física de los componentes que intervienen en las inundaciones como (precipitación, humedad, geomorfología, topografía, etc).

Palabras claves: Inundación, Precipitación, Geomorfología, Topografía, Humedad, Topografía, Caudal, Municipio, Paipa, Boyacá, Vulnerabilidad, desbordamiento.

Abstract

In recent years, floods have increased considerably around the world, leaving societies vulnerable to the destructive forces of nature. Colombia, not being the exception, has experienced catastrophic and costly floods in different departments, becoming the most relevant and costly natural hazard. For this reason, it is of great relevance for the country to generate mitigation strategies and early warning systems.

The department of Boyacá in the last decade has been affected due to floods caused by high levels of precipitation, one of the most vulnerable municipalities to this event has been Paipa, which has had floods in rural areas and in the old town. urban due to the overflow of the upper basin of the Chicamocha river due to the increase in its flow and diversion of its channel due to high rainfall.

For this reason, it is intended to make a historical description of the floods that have occurred in the municipality of Paipa in the last decade due to the overflow of the Chicamocha river, and additionally to elaborate a physical description of the components that intervene in the floods such as (precipitation, humidity, geomorphology, topography, etc).

Key words: Flood, Precipitation, Geomorphology, Topography, Humidity, Topography, Flow, Municipality, Paipa, Boyacá, Vulnerability, overflow.

1 Introducción

Las inundaciones es una de las problemáticas más comunes en todo el mundo generando afectaciones en la infraestructura y vidas humanas, esta se puede presentar por varios factores como los naturales o los ocasionados por el hombre que pueden generar muchos accidentes, entre los naturales se encuentra el desbordamiento de un río que se presenta cuando el caudal es mayor al cauce que este puede soportar y es ocasionado por las lluvias o las escorrentías de tierra cercanas, por otro lado las causas que no son naturales estas ocasionadas por el hombre que entre ellas están deforestación donde hay una tala masiva de árboles, esto ocasiona que haya una gran afectación ya que esta es una defensa natural la cual ayuda a retener grandes cantidades de agua que provienen de una posible inundación.

En Colombia ocurren diversos tipos de inundaciones como las repentinas, costeras y las inundaciones urbanas que afectan mucho a la población, las inundaciones repentinas son aquellas que se generan en muy pocos minutos generando un gran flujo que puede pasar por zonas secas que son enviadas a las zonas costeras conllevando gran cantidad de rocas, lodos y escombros por su camino que puede perjudicar y generar afectaciones muy graves en la zona, también se encuentran las inundaciones costeras estas son generadas cuando se presentan fenómenos naturales como tsunamis, ciclones tropicales que golpean la costa generando grandes afectaciones y más aún cuando se generan el retiro de arrecifes o aduanas que sirven como muro para estos fenómenos, por ultimo tenemos las inundaciones urbanas éstas están presentes en ciudades que cuentan con un sistema de alcantarillado que en su dado tiempo colapsa cuando hay una alta precipitación y genera estos inconvenientes causados principalmente por falta de limpieza de a este sistema causando que se presenten daños a la población (ECOEXPLORATORIO, 2020).

En el departamento de Boyacá el estudio y análisis de los eventos meteorológicos se ha incrementado en los últimos años, estas inundaciones han generado un impacto en la zona debido al incremento de la precipitación y el desbordamiento de la cuenca alta del río Chicamocha. Paipa se encuentra entre los municipios con un alto nivel de afectación a causa de estos eventos, presentando daños en la zona rural y urbana.

Por este motivo conocimiento holístico de los factores que intervienen en una inundación es relevante desde el conocimiento de los factores meteorológicos hasta los factores de la vulnerabilidad de recuperación de resiliencia de la población es importante que diferentes entidades del país como la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGDR) generen sistemas de alerta temprana (SAT) frente a las inundaciones, y así reducir o mitigar posibles decesos en la población y daños que puedan afectar bienes materiales y el medio ambiente.

Este trabajo pretende realizar una descripción histórica de las inundaciones en la zona alta de del Chicamocha que ha sido afectada por varias inundaciones por la cuenca alta, y adicionalmente realizar una descripción física de los componentes que intervienen en las inundaciones como (precipitación, humedad, geomorfología, topografía, etc).

Este trabajo este dividido por los siguientes capítulos estructurados como se describe a continuación:

Un capítulo inicial el cual describe la zona de estudio, un segundo capítulo de investigación que habla sobre la metodología del cálculo sobre inundaciones, y un capítulo final sobre la caracterización histórica de los eventos.

2 Objetivos

2.1 General.

Realizar un análisis espacial de amenaza por inundaciones en la zona rural de Paipa (Boyacá).

2.2 Específicos.

- Realizar un análisis histórico de las inundaciones en la zona.
- Llevar a cabo un análisis hidrológico de precipitación, temperatura y caudal.
- Elaborar una caracterización física de la zona (TWI, red).
- Analizar los resultados obtenidos del análisis hidrológico y la información de la zona.

3 Marco teórico

Las inundaciones son ocupaciones que se presentan de manera parcial o de manera total de agua sobre zonas de una superficie que se encontraba seca, estos fenómenos pueden causar daños los cuales perjudican tanto en lo material y en lo humano. Las inundaciones son fenómenos naturales en los cuales pueden sobresalir las lluvias, los huracanes, derretimiento de nieve o la propia actividad generada por el ser humano (Coelho, 2019).

Las inundaciones se pueden categorizar de dos maneras, la primera es desastre natural y la segunda amenaza constante que se presenta más que todo en lugares donde mantiene lloviendo constantemente. Este fenómeno puede afectar de manera inmediata debido a que se puede presentar en cuestión de minutos, horas, días y hasta en meses, causando que ciertas zonas tengan que ser evacuadas y conlleve a tomar medidas rápidas de protección. Se puede presentar cuando una persona se encuentra viviendo cerca de un río, lago, mar o cualquier tipo de cuerpo de agua en donde se deben establecer ciertas restricciones y precauciones al tener un porcentaje mayor de que pueda haber una inundación (Méndez, 2020).

3.1 Causas de inundaciones.

La causa de las inundaciones no se da solo por la lluvia, sino también por los siguientes aspectos:

- **Lluvias excesivas.** Este fenómeno ocurre cuando las lluvias continúan provocando inundaciones durante varios días.
- **Inundaciones de ríos o lagos.** Esto sucede cuando demasiada lluvia hace que la capacidad de los ríos y lagos se desborde y provoque desastres en el medio ambiente circundante.

- **Derretimiento del hielo de la montaña.** La nieve derretida o los grandes bloques de hielo que caen al río provocarán un aumento en el flujo de agua, lo que provocará un desbordamiento.
- **Ruptura presas o muelles.** Cuando la presión del agua hace que la resistencia de un dique o presa se rompa y se desborde, se produce un flujo de agua mayor.
- **Tormenta.** Es un fenómeno natural muy común en las zonas costeras y aumentan considerablemente el flujo de agua a su alrededor (Mèndez, 2020).

3.2 Tipo de inundaciones.

- **Inundaciones lentas.** Las inundaciones lentas pueden tardar horas, días o incluso meses en cubrir completamente toda el área.
- **Inicio rápido.** Su aparición se producirá en poco tiempo, provocando grandes daños a los edificios y a la comunidad en sus alrededores, como se evidencia en la Figura 1.



Figura 1. Efectos de las inundaciones rápidas y lentas Fuente: (Mèndez, 2020).

- Repentinas.** Esta es la mayor amenaza, que causará enormes desgastes a las edificaciones y tendrá consecuencias sociales negativas (Méndez, 2020).

3.3 Modelación numérica para inundaciones.

Según las normativas y leyes que se encuentran vigentes, la simulación numérica del caudal de agua en los ríos es el instrumento básico para evaluar el riesgo de inundaciones. Las leyes y reglamentos entienden la combinación de peligro y sus consecuencias como riesgo.

La simulación numérica de la hidrodinámica fluvial requiere el uso de la teoría hidráulica de superficie libre y la teoría hidráulica. Para solucionar las ecuaciones de conservación se utilizan métodos numéricos, actualmente este conjunto se define como hidro informática. En las últimas décadas, la arquitectura informática ha seguido desarrollándose, con máquinas muy eficaces y poderosas; Además condujo al progreso de futuras métodos numéricos. Los instrumentos disponible para la sociedad puede utilizarse cotidianamente, las similitudes han sido evidenciadas durante los últimos años, provocado a la interfaz más simple en el programa de computadora, la velocidad de realización es cada vez más rápida(Bladé, 2014).

3.4 Discretización espacial.

En el proceso de modelación se puede modelar de diversas maneras en donde existen aspectos básicos del modelo. El caudal del río es representativo de la topografía del cauce del río y la llanura aluvial. Existen herramientas de modelación numérica que permite el uso de aproximaciones unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) o tridimensionales para simular valores numéricos (3D). Contrario a qué generalmente se cree que modelar en un gran proporción de dimensiones (2D y 1D o 3D y 2D) no significa inevitablemente conducirá a mejores resultados y en algunos casos puede ser contraproducente. Ya sea 1D, 2D o 3D el resultado dependerá principalmente de

la ecuación a resolver, la solución al valor numérico utilizado para resolver estos problemas la discretización espacial compuesta de geometría y las condiciones de contorno en este caso el parámetro principal es la rugosidad del suelo (Bladé, 2014).

3.5 Modelo unidimensional.

Este modelo se comenzó a ejecutar desde el siglo XX, el modelo unidimensional se caracteriza cuando el río generalmente se ve como una línea con una serie de puntos. Dado que el resultado del cálculo es una sección transversal la forma del canal es una propiedad de cada punto o segmento del cálculo. En este caso, los supuestos básicos que más influyen en los resultados del modelo son:

- 1) El flujo de agua ocurre a lo largo del eje del río y es perpendicular a cada sección transversal.
- 2) la cota del agua es constante en cada parte.
- 3) La velocidad del agua en cada sección es constante. Existen varias modificaciones para minimizar la simplificación final basada en la parametrización teórica de la distribución de velocidad lateral, pero es particularmente adecuada para la forma y curvatura compleja de los canales. Si es así normalmente no tiene acceso (Bladé, 2014).

3.6 Modelo bidimensional.

En el espacio 2D, la secuencia no se representa como una cuadrícula separada por líneas en una serie de partes. Consiste en una serie de unidades poligonales que representan las carreteras y el terreno de una llanura aluvial. Las cuadrículas pueden ser regulares o irregulares, estructuradas o no estructuradas, puede resaltar bien la geometría y los contornos con la máxima flexibilidad, esto se puede lograr utilizando una cuadrícula irregular, generalmente formada por triángulos o rectángulos.

En la actualidad los modelos bidimensionales han sido ampliamente aceptados. El desarrollo de la arquitectura informática en los últimos años la investigación sobre las dimensiones inviables y la complejidad ahora se puede realizar desde dos dimensiones. (Bladé, 2014).

3.7 Modelos Cuasi-2D.

Un método para tratar el área accesoria del canal principal como una serie de unidades o tanques de agua conectados entre dos canales. Sí lo es. El flujo de agua entre estos depósitos se calcula mediante una fórmula simplificada. Esta simplificación es eficaz cuando no se necesitan los detalles del campo de velocidad en el área plana, pero sí se necesitan los detalles del campo de velocidad. El propósito es comprender solo el nivel de agua de la capa de agua y considerar la pila producida por la llanura en el cálculo inundación (Bladé, 2014). En la Figura 2, se puede observar modelos cuasi 2D y su aproximación.

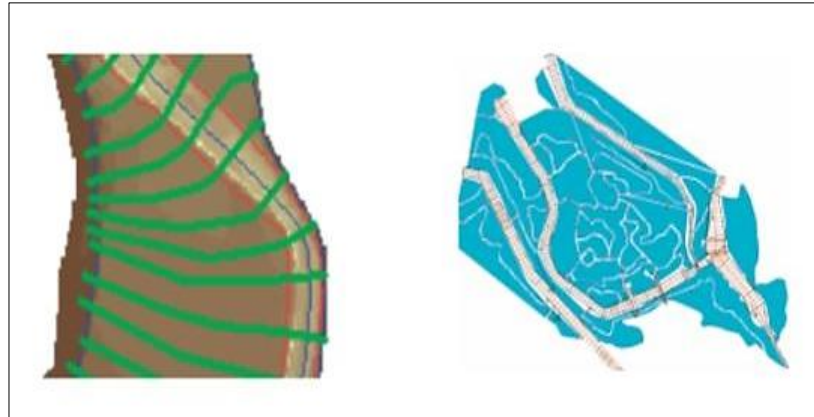


Figura 2. Aproximación 1D (izquierda) y cuasi - 2D (derecha): Fuente: (AGUA, 2014)

3.8 Modelo tridimensional.

Usar un modelo tridimensional para calcular la llanura de inundación es mucho menos que usar un modelo de inundación Modelos unidimensionales y bidimensionales, porque la expansión espacial del modelo requerirá el uso de millones de cuadrículas computacionales. Elemento, que

tiene un alto costo computacional. Los modelos 3D aplicados a la hidráulica de los ríos generalmente se limitan levantamientos, corrientes de aguas locales o curvas alrededor de estructuras hidráulicas como muelles presas y esclusas.

El modelado 3D maneja hojas libres usando varios tipos de personalizaciones espaciales relacionadas con métodos comúnmente usados, una posibilidad muy común es usar la capa sigma para crear discretización vertical. Consiste en una cuadrícula 2D horizontal, una serie de capas verticales para crear números discretos. Estas capas tienen un espesor variable y se distribuyen entre el fondo y la hoja, como se puede ver en la Figura 3. Durante el proceso de cálculo el grosor de todas las capas cambiará por lo que el contorno de la capa superior es siempre el mismo (Bladé, 2014).

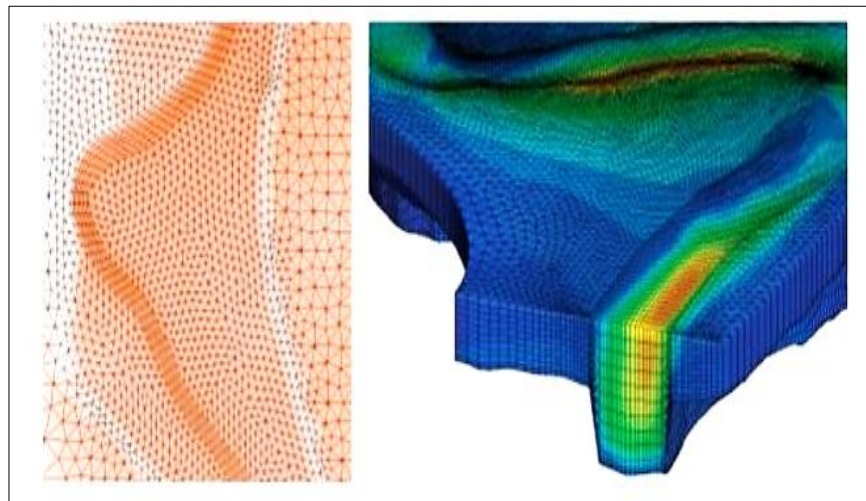


Figura 3. Malla 2D estructurada en el cauce y no estructurada en llanuras (izquierda) y 3D (derecha). Fuente: (Bladé, 2014).

4 Estado del arte

Existe un gran número de métodos de medición para evaluar los desbordamientos que se presentan en los ríos ya que es difícil lograr la medición exacta de inundación por su comportamiento no lineal, sus distintas variables como lo son el flujo, el nivel de agua y la precipitación hacen difícil estas mediciones, los científicos e investigadores han encontrado modelos de medición más precisos generando resultados que se acercan más a la realidad, uno de estos métodos son los modelos de transito de flujo unidimensional y modelos de inteligencia artificial, es decir que estos modelos utilizan redes neuronales desarrollados en Matlab con redes estadísticas de los diferentes puntos de la cuenca de un río arrojando resultados veraces y precisos, estos modelos de precisión se basan en ecuaciones diferenciales determinadas que permiten la predicción de la dinámica del nivel del agua, cuando hay una alta precipitación y que provocan inundaciones (Regional, 2008).

Estos programas como el HEC-RAS, SWMM e IBER permiten modelar de una forma precisa identificando los tipos de canales existente, transversales, naturales o artificiales, los coeficientes de fricción, las curvas IDF (intensidad, duración y frecuencia), especificando el flujo crítico y subcrítico y demás factores que influyan en la hidráulica e hidrología del río, logrando un resultado que se acerca mucho más a la realidad como se mencionaba anteriormente.

Específicamente el programa IBER cuenta con una amplia gama de funciones que permite evaluar, modelar y analizar varios parámetros, partiendo de módulos como lo son el módulo de transporte de sedimentos, un módulo del régimen de flujo laminar o turbulento en régimen permanente y un módulo hidrodinámico, (Flumen, 2010). El dispositivo capaz de transmitir las señales o interfaz de este programa está basado en GID (the personal pre and post processor) este

programa permite realizar cálculos, análisis y generar los resultados del programa, adicional a esto es esquemático y permite una mejor y mayor interpretación de los resultados.

En cuanto a los modelos de medición con redes neuronales es mucho más complejo por su comprensión matemática, pero son herramientas útiles para modelar cuando se desconocen los resultados de entrada y de salida.

Otro de los modelos o procesos estadísticos que nos deja analizar situaciones importantes es el análisis de frecuencia, este radica en generar el cálculo de la magnitud asociada a un período de retorno, donde la efectividad se basa en la longitud y calidad de la serie histórica y de la distribución de probabilidad elegida (Ashkar, 1993).

Estas modelaciones se utilizan el software Matlab Neural Network Toolbox con datos estadísticos de suministrados por las estaciones de precipitación ubicados en diferentes puntos del país (Regional, 2008).

Con base a estos sistemas de medición más exactamente el sistema de precisión IBER y basamos nuestro estudio probabilístico de las posibles amenazas de inundaciones presentadas en la cuenca del río Chicamocha del municipio de Paipa Boyacá.

Para lograr una mayor precisión en los datos iniciales se deben tener en cuenta varios parámetros importantes que nos da la geografía, suelo, relieve del río con estudios batimétricos y relieves de los alrededores del río, las laderas, la cuenca de drenaje, pendientes del río, estudio de campo detallados, aspecto que muestra la dirección del flujo y zonas potencialmente húmedas.

Por esta razón se debe entender el comportamiento hidráulico o la dinámica fluvial de un río para realizar el debido análisis del mismo, por esto la actividad erosiva de las corrientes naturales

se presentan en fuerzas positivas, estas van desplazando poco a poco el terreno, estos desplazamientos ocurren con menor o mayor fuerza dependiendo de su pendiente, el desplazamiento de sedimentos según estudios estadísticos aparecen en dos direcciones, cada partícula se desplaza de acuerdo a la corriente y velocidad que tenga el río estas partículas son las que con el cambio de los años ayudan al cambio de la morfología del río, dando lugar a los procesos morfológicos que interactúan entre sí el transporte de sedimentos, las deformaciones de los cauces, estos se pueden representar en diferentes deformaciones como se puede evidenciar en la Figura 4 (Ochoa rubio, 2011).

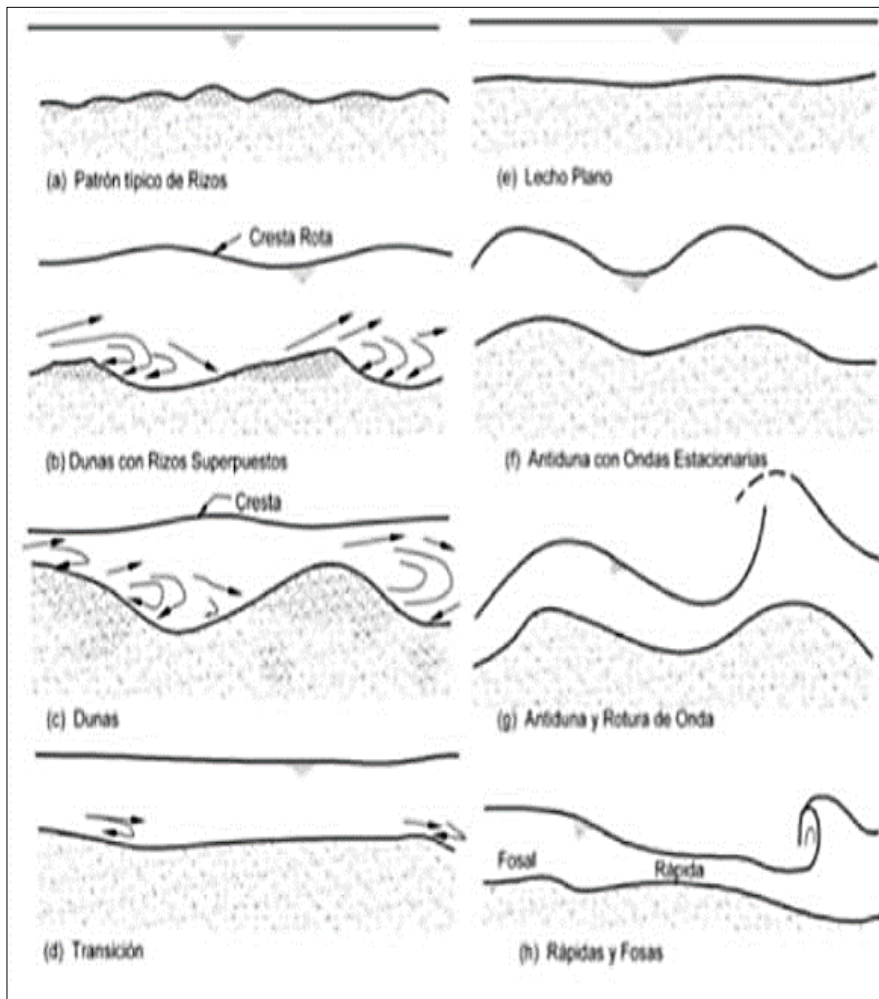


Figura 4. Deformaciones de los cauces. Fuente: (Ochoa rubio, 2011)

El índice de aridez permite generar un reporte o una estadística por medio de diferentes fórmulas midiendo el grado de suficiencia o insuficiencia de la precipitación representada en el clima.

Según (Hydrology, 2019) el río Chicamocha muestra una influencia con variación bimodal, es decir, dos períodos en los que el río tiene un mayor caudal y dos períodos en que cae el nivel del río, lo que también se conoce como sequía. Esta la variación está directamente relacionada con el clima y los períodos de precipitación. En los meses de abril a junio y de septiembre a noviembre es cuando la precipitación es mayor en la zona, lo que genera el aumento de caudal, que da un promedio de 196m³/s para estos tiempos.

También se debe tener en cuenta un parámetro fundamental que influye en las inundaciones y es un punto clave en la investigación de las posibles amenazas de inundación y son los fenómenos naturales como lo son las actividades sísmicas, estas se generan por el movimiento telúrico de las capas tectónicas, provocando movimientos bruscos en el suelo, erosiones de los valles, cañones que tienen una mayor provocación si son afectadas por actividades humanas, flujos de escombros este se puede evidenciar cuando hay poblaciones aledañas cerca de los ríos y es el arrastre de sólidos en el fondo de los ríos y caídas de rocas deslizamientos de tierra este fenómeno natural se da cuando se acumula agua en el suelo y se presentan socavaciones en el área , riachuelos y barrancos, bosques claros y sequías. Estos fenómenos generan amenazas para las poblaciones cercanas ya que influyen en el cambio de la morfología del río y se pueden presentar inundaciones cuando el pico de precipitación este más alto.

En cuanto a la contaminación en el río y fuentes antropogénicas, Chicamocha existen numerosos problemas ambientales, que influyen igualmente en las inundaciones como lo es la contaminación y el aumento de población en las zonas aledañas al río fuentes antropogénicas de

contaminantes de la minería, los desechos agrícolas, domésticos e industriales han estado afectando su calidad del agua. La contaminación del río Chicamocha, así como el medio ambiente de la cuenca, la pérdida de fauna y flora como protección elementos y calidad de vida, deterioran el ecosistema y, por tanto, calidad de vida de sus habitantes (Hydrology, 2019).

Debido a esto el cambio se ha venido presentando en el clima es factor de influencia y de vital importancia. En los años 1980 al 2012 según (U Santo Tomas, 2018) los eventos de precipitación extrema influyen en los procesos de cambios morfológicos de considerable magnitud, influyendo en vidas humanas, afectando la economía del municipio, más conocido como el fenómeno del niño estos fenómenos y estudios mostraron que un cambio del 10% en la distribución de la frecuencia de lluvia relacionada con el promedio anual, es causado por eventos extremos, como se evidencia en los patrones observados en los estudios de caso de Estados Unidos, Australia, Japón, Reino Unido Noruega, Sur de Canadá, Sur África, Noreste de Brasil, Sur de China y ex-ex-URSS, según estudios de Groisman (1999), Karl (1995), Karl y Knight (1998), Plummer (1999), Iwashima y Yamamoto (1993) y Psborn (2000).

Según (PNUD, 2012) El departamento de Boyacá ha sido afectado por la ocurrencia del fenómeno La Niña, como ocurrió en 2010-2011, que dejó 80.544 personas afectadas por inundaciones y deslizamientos de tierra: 50 muertos, 87 heridos y una persona desaparecida, como se puede evidenciar en la Figura 5.



Figura 5. Cuenca alta del río Chicamocha. Fuente: (Corpoboyacá, 2011)

4.1 Importancia del suelo en las inundaciones.

Los suelos también son un tema que tratar en las inundaciones ya que dependiendo de sus usos mejora o empeora las zonas aledañas a los ríos. En estas zonas o rondas hidráulicas se pueden presentar estabilización de taludes, captación, remoción de contaminantes y son de vital importancia en el área ambiental. En la Tabla 1 se pueden observar los tipos de suelo en el municipio de Paipa y su afectación.

| Tipo de conflicto | Área (ha) | Porcentaje con respecto al área total de ronda | Longitud (m) | Porcentaje con respecto a la longitud total de corrientes |
|---------------------------|------------------|---|---------------------|--|
| Municipio de Paipa | | | | |
| Crecimiento urbano | 26 | 1 | 2.282 | 1 |
| Alto | 703 | 20 | 116.408 | 20 |
| Medio | 1.629 | 48 | 280.973 | 48 |
| Bajo | 520 | 15 | 90.408 | 15 |
| Equilibrio | 542 | 16 | 95.190 | 16 |
| Total | 3.420 | 100 | 585.261 | 100 |
| Quebrada el Rosal | | | | |
| Crecimiento urbano | 5 | 12 | 768 | 12 |
| Alto | 8 | 20 | 1.352 | 20 |
| Medio | 14 | 35 | 2.154 | 33 |
| Bajo | 10 | 25 | 1.706 | 26 |
| Equilibrio | 3 | 8 | 575 | 9 |

| | | | | |
|-----------------------|----|-----|--------|-----|
| Total | 40 | 100 | 6.554 | 100 |
| Río Chicamocha | | | | |
| Crecimiento urbano | 37 | 41 | 6.514 | 43 |
| Alto | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Medio | 7 | 8 | 510 | 3 |
| Bajo | 1 | 1 | 139 | 1 |
| Equilibrio | 45 | 50 | 8.106 | 53 |
| Total | 90 | 100 | 15.268 | 100 |

Tabla 1. Tipos de suelo en el municipio de Paipa. Fuente: (Rigaud, 2008)

Se debe tener especial cuidado a estas rondas hidráulicas ya que, en las zonas de más afectación, más contaminantes se presentan en las zonas aledañas y contaminantes al río.

Dando continuidad a la investigación se presentan los siguientes ejemplos donde probabilísticamente se hacen estudios por amenazas de inundaciones:

4.2 Evaluación del riesgo de inundaciones.

Los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo se han utilizado ampliamente en varias disciplinas con un significado diferente, impidiendo la interdisciplinariedad cooperación para enfrentar eventos peligrosos. Incluso para peligros naturales, como inundaciones, no se han aceptado ampliamente definiciones y procedimientos de evaluación únicos.

Según (Pistrika, 2016) los problemas sociales y económicos de las inundaciones en 20 países, donde se encuentran aproximadamente el 80% del número total de las mayores presas. El mayor número de víctimas por inundaciones se produce en los países asiáticos, como se muestra en la Tabla 2.

| Víctimas | Países |
|----------|---|
| 0-10 | Argentina, Australia, Brasil, Canadá, Francia, Irlanda, Italia, Países Bajos, Noruega, Sudáfrica, Suecia, Rusia |
| 10-20 | España |
| 50-100 | Indonesia, USA |
| 100-150 | Japón |
| >150 | Corea (250), Bangladés (200), India (1500), China (2000-3000) |

Tabla 2. Número de víctimas en el año por inundaciones. Fuente: (Pistrik, 2016)

Además de los daños económicos y sociales, las inundaciones pueden tener graves consecuencias, donde se inundan sitios culturales de gran valor arqueológico o donde las áreas protegidas de humedales son destruidas.

4.3 Vulnerabilidad en las zonas propensas a inundaciones.

Según (UNDRR, 2001) La vulnerabilidad se presenta cuando hay una serie de condiciones los cuales tiene unos procesos resultantes de factores físicos, sociales, ambientales y factores económicos, que aumentan la probabilidad de una comunidad al impacto de riesgos.

Generalmente, la vulnerabilidad de un sistema frente a un determinado peligro no es fácil. Se pueden distinguir tres rutas para la evaluación:

- Económico.
- Social.
- Cultural.

Según (UNDRR, 2001) la evaluación de la vulnerabilidad en áreas propensas a inundaciones depende de los siguientes factores:

- La exposición del sistema.
- La capacidad de afrontamiento inicial (disponibilidad de recursos) del sistema.
- La magnitud e intensidad del evento peligroso.

- La respuesta social del sistema (alertas tempranas, experiencia indígena, conciencia pública, etc.).
- La falta de claridad de los lados interrelacionados de la vulnerabilidad (capacidad de afrontamiento y exposición).

4.4 Riesgo de inundaciones.

Según (COM, 2006) es la probabilidad de una inundación junto con el daño real a la salud y la vida humana, el medio ambiente y la actividad económica asociados con ese evento de inundación.

En esto el riesgo de inundación de contexto puede considerarse como la amenaza real, en otras palabras, la fuente real de peligro de inundación en las áreas afectadas.

Según (Pistrika, 2016), el riesgo en general incorpora los conceptos de peligro {H} (iniciando caso de modos de falla) y vulnerabilidad {V} (condiciones específicas de espacio / tiempo). Está acostumbrado a expresar riesgo (R) como una relación funcional de peligro (H) y vulnerabilidad (V), como se puede ver en la siguiente ecuación el riesgo es el producto de la relación del peligro con la vulnerabilidad.

$$R = H * V \quad (1)$$

El riesgo podría ser medido en las mismas unidades que el peligro. En términos cuantitativos, el riesgo anualizado puede ser estimado como el producto de la probabilidad de ocurrencia del fenómeno peligroso y la consecuencia real, combinada en todos los escenarios.

Estas estimaciones implican restricciones importantes como:

- Se puede aplicar solo en peligros de origen natural debido al análisis probabilístico.
- Aunque se ajusta a un marco metodológico general, es muy específico para cada caso.

- Altamente confiable en el juicio de expertos.

4.5 Evaluación del impacto de Karun 2019 Río inundación en río sedimento en área de la ciudad de Ahvaz, Irán.

Se presenta un estudio adicional del río Karun, donde se logran ver otros puntos de vista desde diferentes países, este río ubicado en la ciudad de Ahvaz, Irán, que inicia desde el río Shatt al-Arab y termina en Koohrang tal cual se evidencia en la Figura 6.



Figura 6. Río Karun. Fuente: (wikipedia)

Este estudio realizado para evaluar el impacto en las características fisicoquímicas y las concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (PTE) en los sedimentos después de la inundación del 2019.

Según (Rastmanesh, 2020) en este estudio se recolectaron muestras superficiales del lecho del río que se extiende a través de la ciudad de Ahvaz para su análisis y evaluación. Las propiedades fisicoquímicas de los sedimentos y las concentraciones de PTE (Mn, Fe, Cr, Ni, As, Zn, Pb y Cu) en las muestras se determinaron mediante metodología estándar.

La contaminación de las concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (PTE) en sedimentos se evaluó calculando el factor de contaminación y el grado de contaminación. El índice de riesgo ecológico potencial (RI) se utilizó para evaluar el grado de contaminación y los efectos ecológicos de los PTE en los sedimentos. Los resultados comparativos mostraron que la inundación redujo la concentración de PTE y carbono orgánico en los sedimentos.

La evaluación del riesgo ecológico posterior a la inundación reveló que los sedimentos seguían siendo de bajo riesgo en comparación con el estado anterior a la inundación.

5 Definición zona de estudio

5.1 Descripción del municipio Paipa – Boyacá.

Paipa se encuentra localizado en el departamento de Boyacá en el centro-oriente de nuestro país a 15km de Duitama en la provincia de Tundama, se caracteriza por ser uno de los sitios turísticos más grandes en Colombia considerado como la capital turística, según (regional, 2018) en el estudio que se generó en el mes de febrero el municipio tuvo un muy buen porcentaje de visitas que llego a tener 34.52%, seguido por Villa de Leiva con un 27.1% de visitas por turismo, se evidencio que las personas visitaban el municipio más por lo personal que labora teniendo un porcentaje de 92% de interés en lo personal.

Como conclusión el municipio se caracteriza por tener excelentes paisajes y condiciones naturales muy buenas con las cuales su economía depende del turismo donde podemos visitar diferentes lugares como la reserva natural de ranchería, el pantano de Vargas etc.

Según (regional, 2018), En la Figura 7 se evidencia que la gente visita el municipio de Paipa más que todo y en su mayoría es para vacacionar con un porcentaje de 81.27% y con un 18.73% por otros motivos en donde gran de la población que visita Paipa es de Bogotá con un 57.5% de turistas seguidos de ciudades como Medellín, Bucaramanga, Yopal e Ibagué. En Paipa se ofrece a los turistas diversa variedades tanto en hospedaje donde encontramos hoteles, casa de familia entre otros, también se destaca mucho las artesanías y actividades al aire libre esto hace de Paipa un lugar muy relajante para que la gente pueda pasar con su familia una muy buena experiencia.

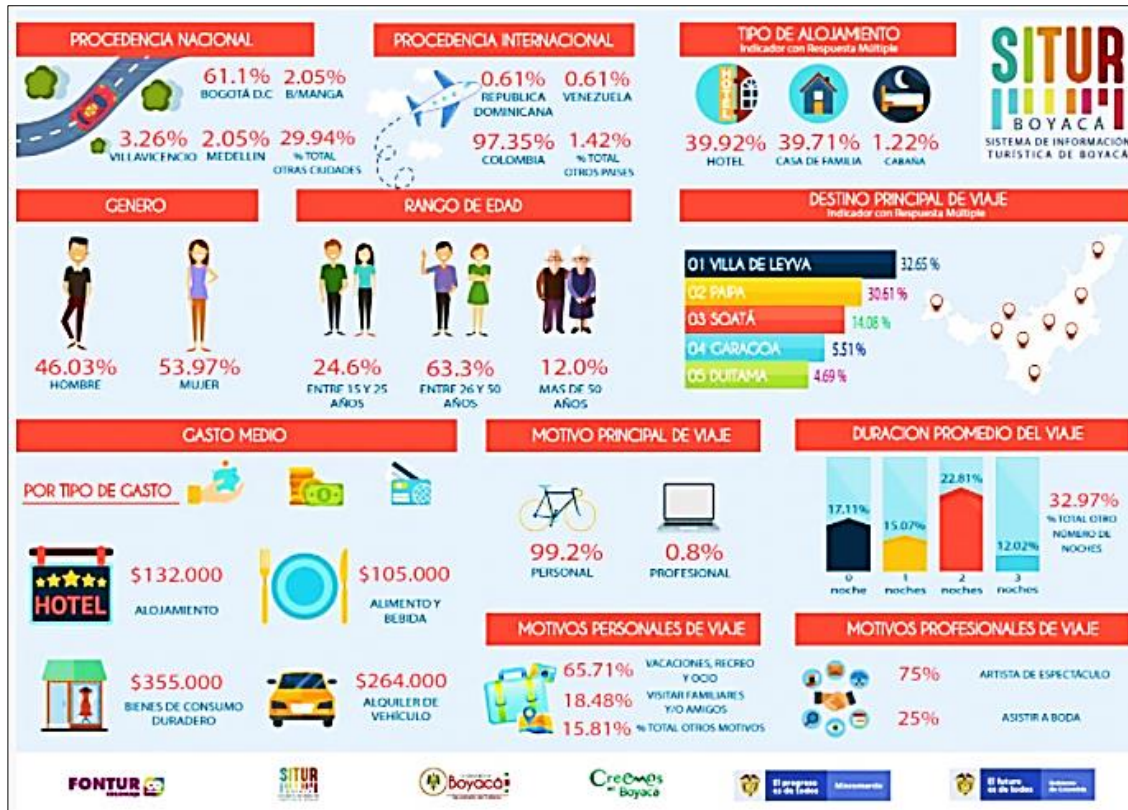


Figura 7. Sistema de información turística en Boyacá. Fuente: (regional, 2018)

Según (Desastres, 2013), Paipa es un municipio que con los años tendrá un crecimiento poblacional con cada año que pase generando una mayor demanda de vivienda, estudio, deporte etc. En los censos realizado en el año 2005 se esperó que para el año 2013 Paipa tuviera una población de 30.176 habitantes siendo el 0.23% del total de la población del departamento, este porcentaje se divide en mujeres y hombres donde la mayoría son mujeres con el 50.95% (14.801) y hombres con un porcentaje de 49.04(15.375), donde el 60.07% de la población está en la zona urbana con 18.127 habitantes, y 39.93% de la población con 12.49 habitantes en zona rural de Paipa.

En la Tabla 3 se encuentra la estadística del crecimiento que el municipio tuvo hasta el 2020. Estas estadísticas demuestran que Paipa es uno de los seis municipios más poblados del departamento de Boyacá después de Tunja, Duitama, Sogamoso, Chiquinquirá y Puerto Boyacá.

| Año | Resto | Cabecera | Total |
|------------|--------------|-----------------|--------------|
| 2005 | 12.338 | 15.428 | 27.766 |
| 2006 | 12.276 | 15.807 | 28.083 |
| 2007 | 12.220 | 16.181 | 28.401 |
| 2008 | 12.166 | 16.548 | 28.714 |
| 2009 | 12.103 | 16.909 | 29.012 |
| 2010 | 12.054 | 17.264 | 29.318 |
| 2011 | 11.994 | 17.612 | 29.606 |
| 2012 | 11.936 | 17.954 | 29.890 |
| 2013 | 11.885 | 18.291 | 30.176 |
| 2014 | 11.830 | 18.623 | 30.453 |
| 2015 | 11.790 | 18.950 | 30.740 |
| 2016 | 11.749 | 19.272 | 31.021 |
| 2017 | 11.710 | 19.587 | 31.297 |
| 2018 | 11.685 | 19.897 | 31.582 |
| 2019 | 11.666 | 20.202 | 31.868 |
| 2020 | 11.664 | 20.500 | 32.164 |

Tabla 3. Crecimiento poblacional en Paipa-Boyacá. Fuente: (Desastres, 2013)

5.2 Descripción de la zona de estudio.

La zona de estudio se encuentra en el municipio de Paipa – Boyacá, el cual está localizado en el valle de Sogamoso, uno de los valles más significativos de la región andina, en el centro oriental del País y noroccidental del departamento de Boyacá a 2525 m.s.n.m (El Tiempo, 2021).

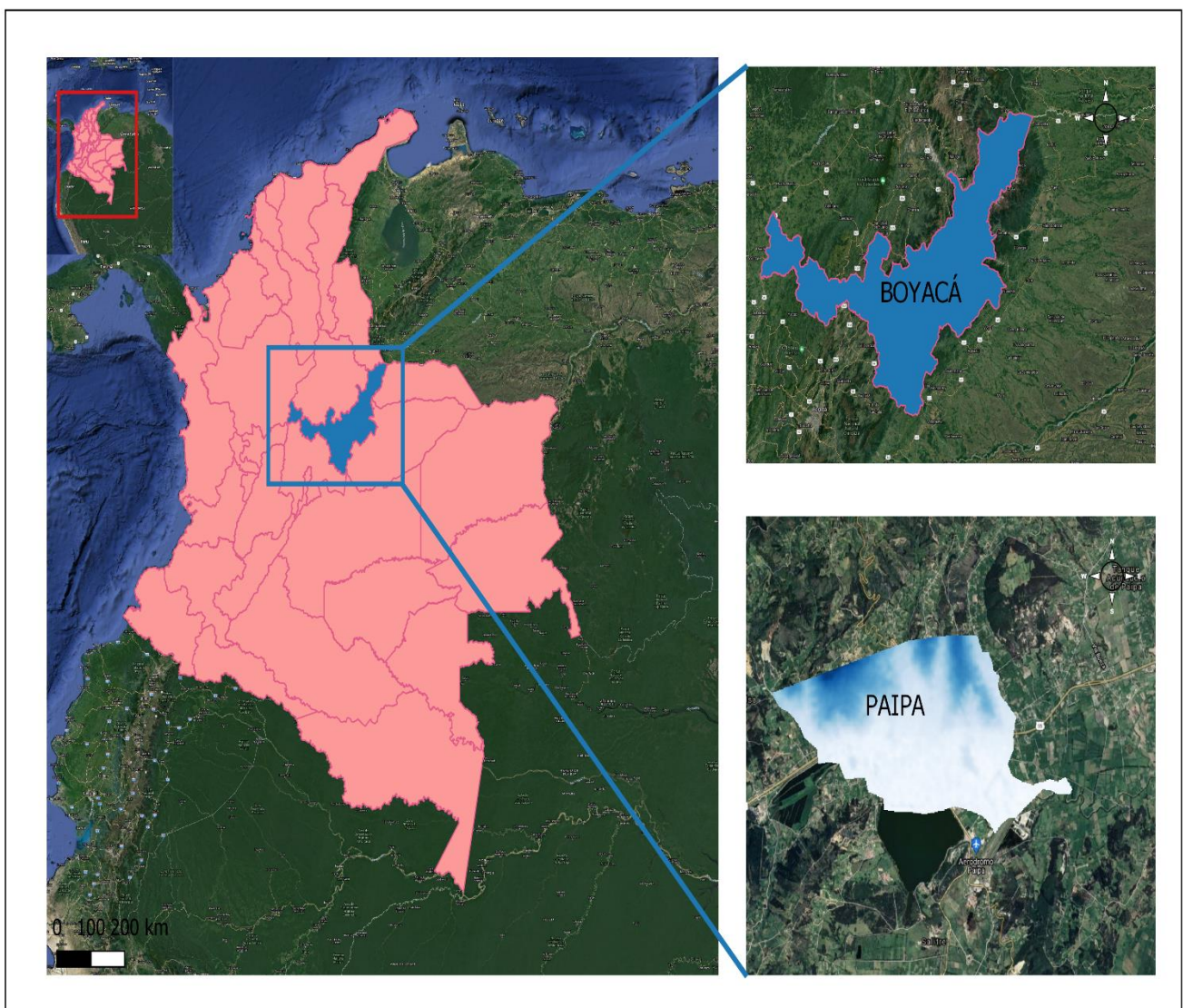


Figura 8. Ubicación geográfica de la zona de estudio en Paipa-Boyacá. Fuente: Propia

Como evidenciamos en la Figura 9. Este municipio cuenta con las siguientes cuencas hidrográficas.

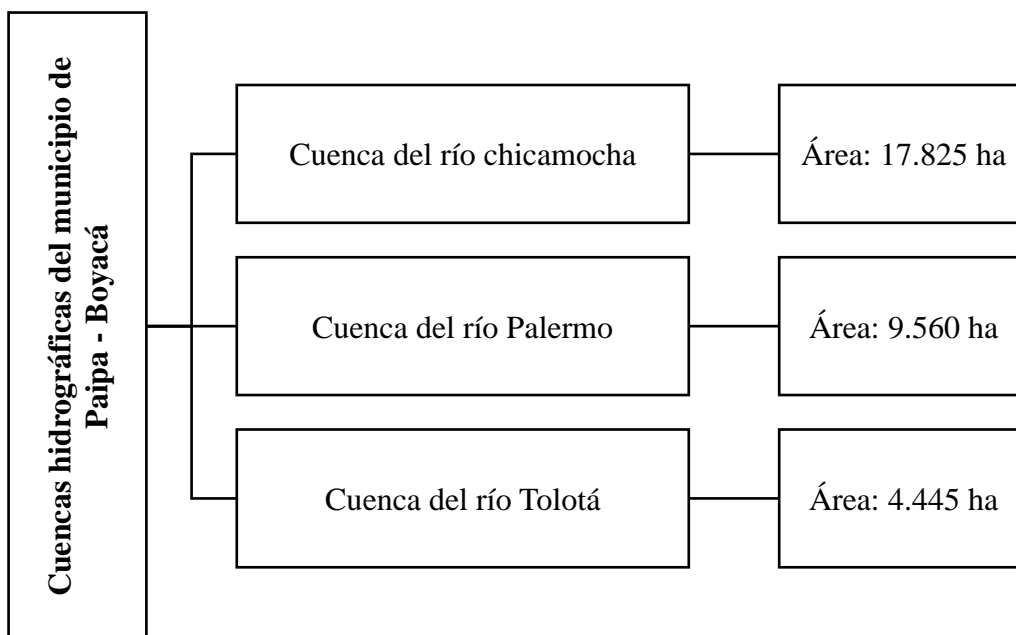


Figura 9. Cuencas hidrográficas del municipio de Paipa-Boyacá. Fuente: Propia

Actualmente se ha evidenciado que Paipa está siendo afectado por los altos niveles de precipitación causando inundaciones, afectando a la comunidad tales como Balcones de San Luis, San Daniel y El Bosque, etc. La cuenca alta del río Chicamocha es el principal causante de estos eventos debido a su desbordamiento (El Tiempo, 2021; Infobae, 2021).

La cuenca alta del río está localizada en el centro del país, donde se genera un altiplano llamado altiplano Cundiboyacense, el cual parte de la jurisdicción de la corporación autónoma de Boyacá (CORPOBOYACA). El río Chicamocha nace a la altura del municipio de Tuta, extendiéndose por los municipios de Paipa, Duitama, Nobsa, Sogamoso, Belencito, Topaga, Corrales, Beteitiva, Tasco, finalizando a la altura de Paz del Río (Cubillos Monroy, 2017).

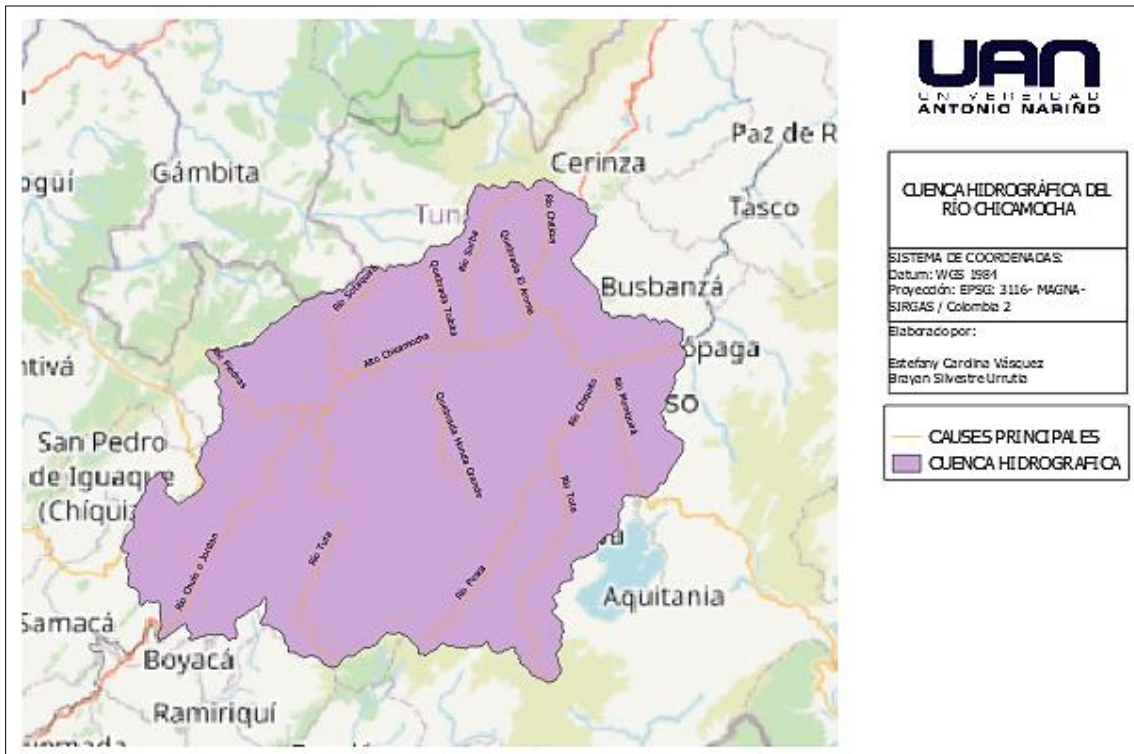


Figura 10. Cuencas Hidrográficas ubicada en el municipio de Paipa. Fuente: Propia

Esta cuenca cuenta con un drenaje de casi la tercera parte del departamento de Boyacá con la cual también cuenta con área de aproximadamente de $1,536 \text{ Km}^2$, como se evidencia en la Figura 10 que nos muestra su ubicación en el departamento de Boyacá presentando una elevación de 2950 m.s.n.m y una pendiente media de 1,10%, durante su recorrido recibe otros afluentes importantes las cuales se pueden observar en la Figura 11.

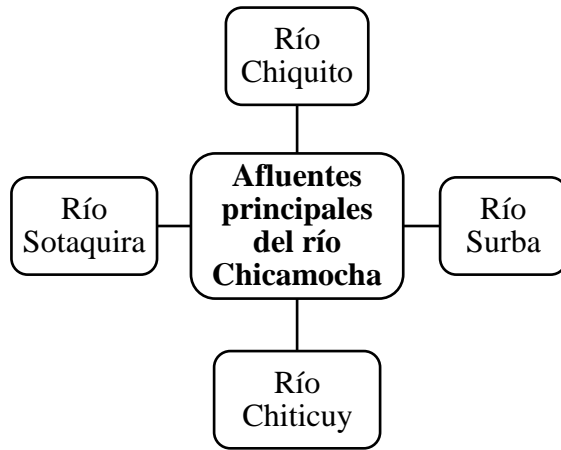


Figura 11. Afluentes principales del río Chicamocha. Fuente: Propia

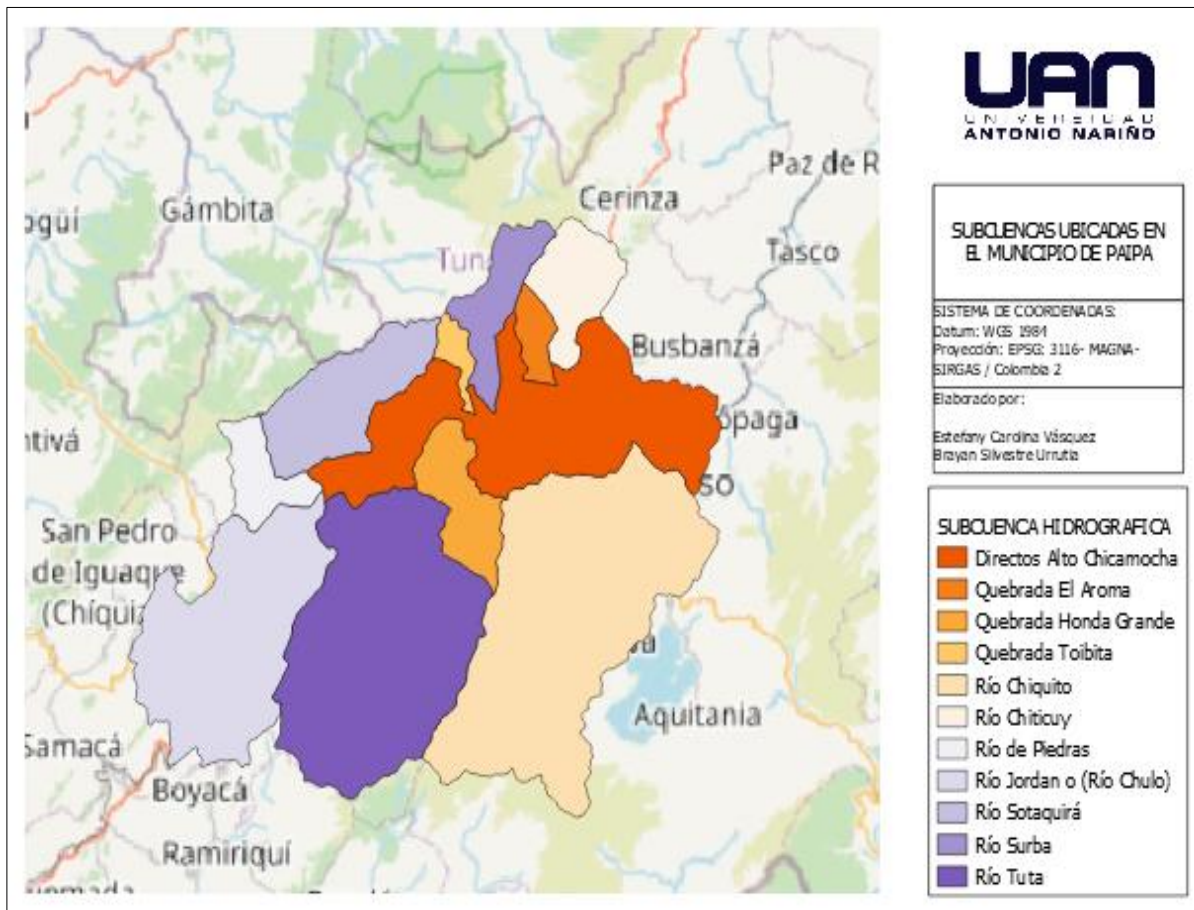


Figura 102. Subcuentas Hidrográficas ubicadas en el municipio de Paipa. Fuente: Propia

El río Chicamocha cumple con abastecimiento de una gran parte de las demandas de agua en su recorrido. Como se puede observar en la Figura 12, La regulación de su caudal se realiza mediante el embalse La Playa sobre el río Jordán, de este río depende en gran medida el desarrollo, tanto turístico, ecológico como industrial en la región. Existen diversas captaciones de agua durante su recorrido, donde alimenta una red de canales, caños, etc de varios kilómetros de longitud que tienen como función conducir y drenar la zona amplia zona entre Paipa y Sogamoso (Cubillos Monroy, 2017) .

Asimismo, la demanda es utilizada para el consumo humano por diferentes municipios alcanzando $0,722 \text{ m}^3/\text{s}$. El uso que se le brinda a estos suministros son muy vitales para la agricultura y ganadería debido a la intensa actividad agropecuaria y el riego de cultivos y pastos con una demanda de $2,94 \text{ m}^3/\text{s}$.

El uso industrial está concentrado en el corredor industrial, la necesidad del agua en las industrias de mayor consumo con un total de $0,67 \text{ m}^3/\text{s}$. En síntesis, la demanda de agua estimada es de $4,59 \text{ m}^3/\text{s}$.

En el área Cundiboyacense es variable la precipitación, ya que no llega a los 1000 mm anuales, pero en sus alrededores las precipitaciones son diversas, principalmente en la Sabana de Bogotá donde su precipitación es mayor alrededor de 1500 mm, al sur occidente desciende a los 1000 mm, y al occidente del altiplano alcanzan 2500 mm.

5.3 Histórico de inundaciones en Paipa – Boyacá.

En los últimos años en el municipio de Paipa las inundaciones han aumentado de manera notable, ocasionada por las altas precipitaciones, desbordamiento del río Chicamocha, y de varias de las quebradas del municipio inundando el sector turístico de la ciudad y barrios en su casco

urbano, y sectores como lo son; sectores :Aeropuerto, Caños, Br El Bosque, Balcones de San Luis, Represa Termo, Río Arriba, Bugalons, Orquídeas, Fontaneros, Codornices, Conjunto Residencial Torcoroma, Colegio y Br Vianney, Matadero, El Rosal. Como se puede observar en la Figura 13.



Figura 13. Inundación en la zona urbana de Paipa-Boyacá. Fuente: (Vanguardia, 2012)

La zona rural, como se puede observar en la Figura 14, también se ha visto afectada por las inundaciones en la vereda el volcán parte baja, Vargas, corregimiento de Palermo, peña amarilla (paso por la quebrada San Martín y sector el Curubito), evidencia que se encuentra en los censos del CMGRD Municipal.



Figura 14. Inundación en la zona rural de Paipa-Boyacá. Fuente: (Millan et al., 2011)

Estos eventos han causado desastres produciendo un deterioro ambiental para las personas afectadas en el espacio ocupado por ellas, representando destrucción de viviendas, pérdidas de cultivos, daños en el ganado y otros efectos (Cubillos Monroy, 2017).

También se evidencia barrios afectados, viviendas y sectores aledaños con probabilidades altas de inundación de acuerdo con el histórico de eventos en este municipio. Seguidamente, en la Tabla 4, se puede observar el histórico de las inundaciones más importantes ocurridas en Paipa.

| Fecha | Fenómeno meteorológico | Impactos registrados |
|-------------------|-------------------------------|--|
| 28/noviembre/2008 | Fuertes lluvias | Alerta naranja por aumento de precipitaciones |
| 10/diciembre/2008 | Fuertes lluvias | Alerta roja aumento de precipitaciones. |
| 27/marzo/2009 | Inundaciones | 200 viviendas afectadas. |
| 16/julio/2010 | Fuertes lluvias | Aumento en los niveles del río Chicamocha afectando los municipios de Paipa, Tunja, Sotaquirá, Santa Rosa. |
| 19/Julio/2010 | Fuertes lluvias | Alerta naranja por aumento de precipitaciones. |
| 15/abril/2011 | Inundaciones | Se inundó la zona urbana y rural aledaña al río Chicamocha afectando también la zona hotelera. |
| 17/abril/2011 | Inundaciones | Se inundó el aeropuerto. |
| 23/abril/2011 | Inundaciones | Se inundó el casco urbano y varios barrios. Se inundaron los barrios Mirabal, Llano Grande, Delicias, Sativa La Villa Panorama, Volcán, Río Arriba quebrada |
| 26/abril/2011 | Inundaciones | Honda Caños, Rosal, Pastoreros Bonza, Salitre, Toiba Chital, Medios, La Playa Tunal, Romita, Pantano de Vargas, Varguitas. |
| 14/diciembre/2011 | Inundaciones | Se inundó el puente Tabala. Se inundaron los barrios el Bosque, San Luis, Villa Jardín, Villa Panorama, Balcones de San Luis, Alameda, Varguitas, |
| 23/abril/2012 | Inundaciones | Caños, Romita, La Esperanza, Mirabal, Cruz de Bonza, Toibita abajo. |
| 10/marzo/2016 | Inundaciones | Se inundaron las carreras 19 y 23, y el hotel La Posada. |
| 25/abril/2016 | Inundaciones | Se inundó un hotel turístico y se vieron afectadas dos vías principales. |

| | | |
|---------------|-----------------|---|
| 11/marzo/2016 | Fuertes lluvias | Se inundaron las carreras 20 y 23 entre las calles 22 y 23 por producto del colapso de las redes de alcantarillado, se vieron afectadas 10 viviendas y el hotel la posada”. |
| 15/marzo/2017 | Inundaciones | Desbordamiento del Lago Sochagota. |
| 28/marzo/2017 | Inundaciones | Desbordamientos de las quebradas Honda, Salitre y Canal de Vargas. |
| 29/marzo/2017 | Inundaciones | Desbordamiento lago Sochagota. |
| 07/abril/2017 | Inundaciones | Inundación en varios barrios. |
| 22/abril/2017 | Inundaciones | Desbordamiento lago Sochagota. |
| 25/abril/2017 | Inundaciones | Se inundaron las carreras 23-22-21, y las calles 22 y 23, y el barrio Fátima. |
| 07/mayo/2017 | Inundaciones | Se inundaron varios sectores. |
| 11/mayo/2017 | Inundaciones | Desbordamiento del Lago Sochagota. |
| 20/junio/2017 | Inundaciones | Se inundaron las veredas Sativa, Romita, Toibita. |
| 20/julio/2017 | Inundaciones | Se inundo el casco urbano. |

Tabla 4. Histórico de inundaciones en Paipa. Fuente: (Rodríguez Díaz & Silva Calixto, 2018)



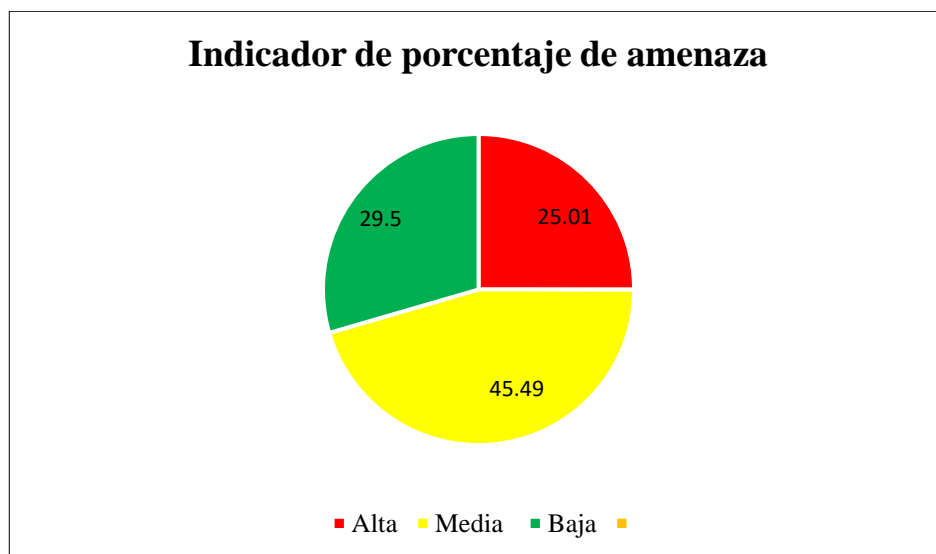
Figura 15. Afectaciones por las inundaciones en el municipio de Paipa – Boyacá. Fuente: (Caracol Radio, 2017)
Figura superior izquierda. Inundaciones en Paipa-Boyacá a causa de las fuertes lluvias. **Figura superior derecha.** Inundaciones en Tunja a causa de las fuertes lluvias. **Figura del centro izquierdo.** Vías colapsadas en Duitama a causa de las fuertes lluvias. **Figura del centro derecho.** Granizada en Villa de Leyva, Boyacá a causa de las fuertes lluvias. **Figura inferior izquierda.** Inundación en la zona urbana de Paipa-Boyacá. **Figura inferior derecha.** Inundación en la zona rural de Paipa-Boyacá

Diferentes entidades como Corpoboyacá y el Plan de Ordenación y manejo de la Cuenca Hidrográfica han realizado un estudio preliminar sobre la cuenca alto río Chicamocha, debido a las diversas inundaciones que han sucedido a causa de los altos niveles de precipitación afectando el municipio de Paipa – Boyacá.

En la Figura, se puede ver el indicador de amenazas por inundación en la zona de Paipa, en donde se analizaron los siguientes niveles de amenaza teniendo en cuenta las áreas afectadas. En la Gráfica 1 y la Tabla 5 se observa que la amenaza con mayor predominancia es la media de color amarillo con un porcentaje de 45,49% ocupando gran parte del territorio Boyacense.

| Color | Amenaza | Área (Has) | % |
|----------|---------|------------|-------|
| Verde | Baja | 63363,42 | 29,50 |
| Amarillo | Media | 97703,59 | 45,49 |
| Rojo | Alta | 53703,37 | 25,01 |

Tabla 5. Niveles de amenaza. Fuente:(Alexandra et al., 2015)



Gráfica 1. Indicador de porcentaje de amenazas por inundación. Fuente: Propia

A partir del estudio del nivel de amenaza por inundaciones fue un punto de partida para generar los diferentes escenarios que se encuentran en riesgo por las altas precipitaciones y los altos niveles en el caudal de la cuenca alta del río Chicamocha ocasionando desbordamientos. En la

Figura y 17 se puede ver en las convenciones que el escenario llamado inundación se encuentra en un nivel de amenaza alta, también se encuentran los diferentes sectores afectados.

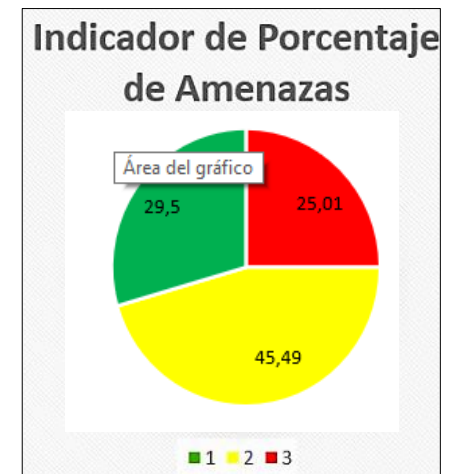
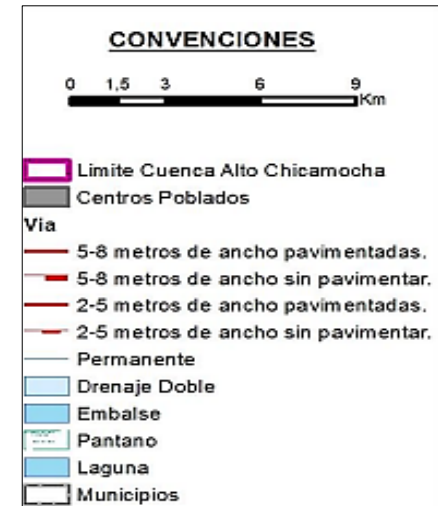
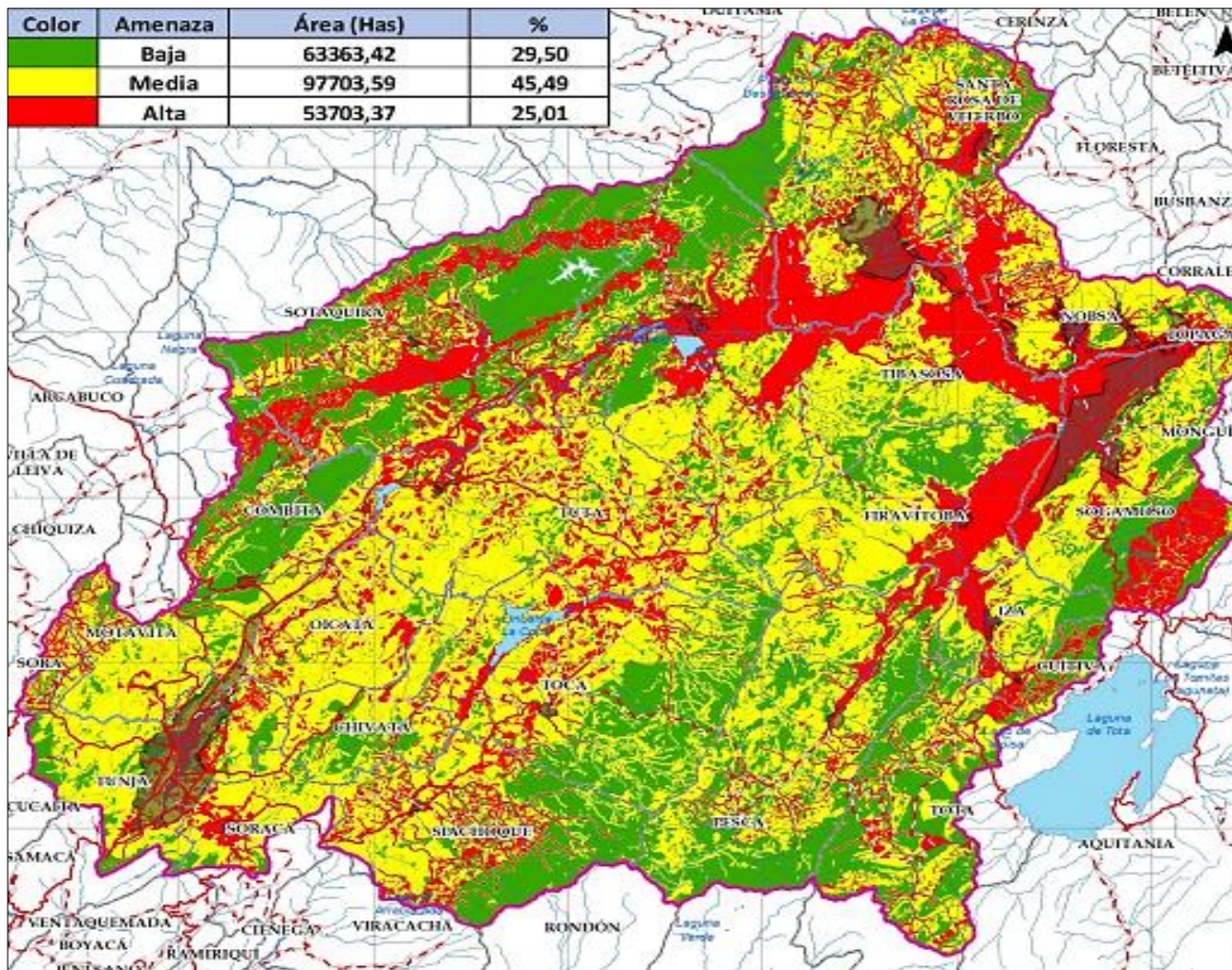


Figura 16. Mapa indicador de porcentajes de niveles de amenazas por inundación en cuenca alta del río Chicamocha. Fuente: (Alexandra et al., 2015)

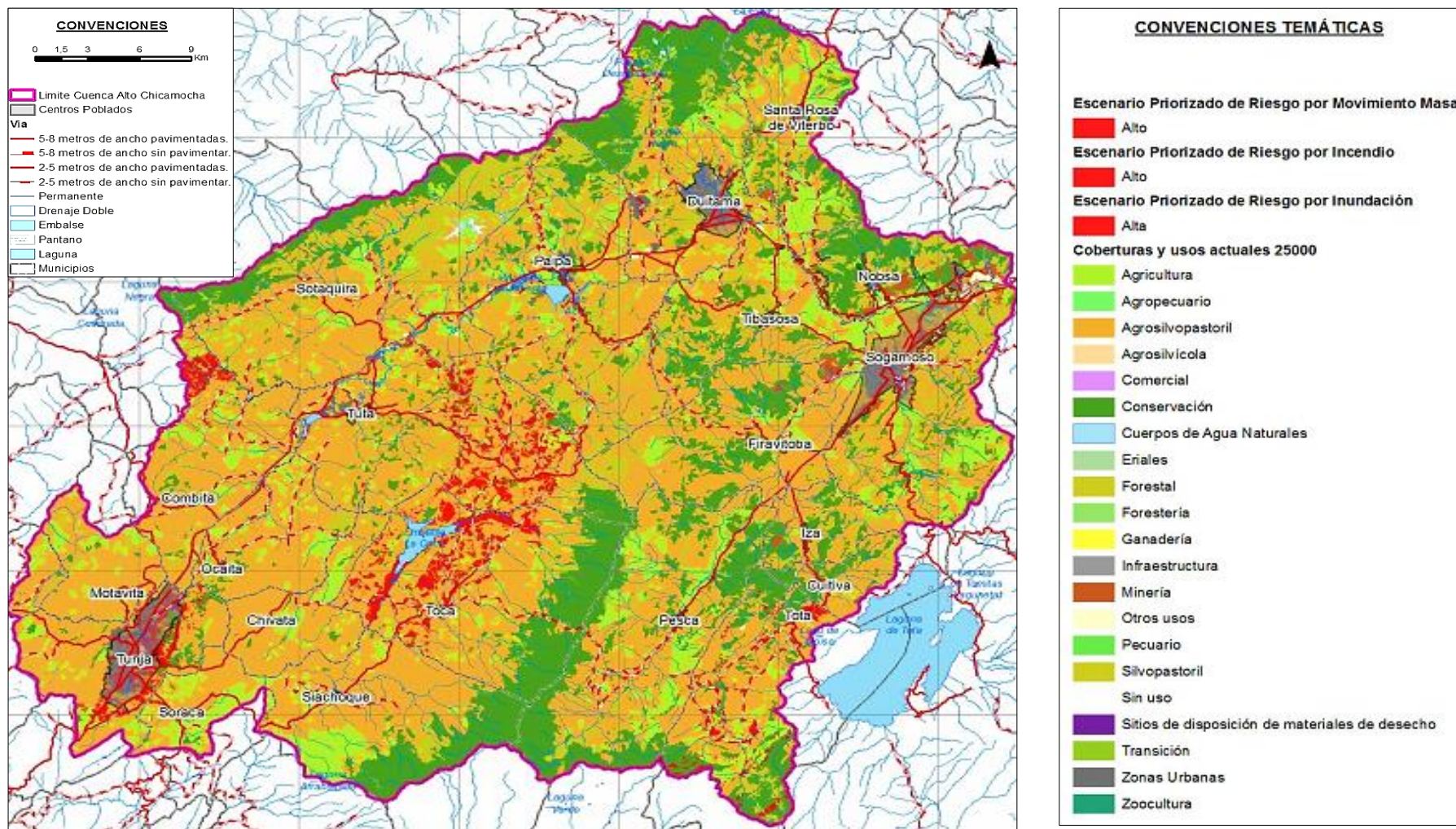


Figura 17. Mapa de localización de los escenarios en riesgo priorizados de la cuenca alta del río Chicamocha. Fuente: (Alexandra et al., 2015)

6 Metodología

La metodología de este proyecto de este proyecto se basa en la modelación hidrológica de la cuenca alta del río Chicamocha, analizando los datos recolectados de las diferentes fuentes de información. Este estudio tendrá dos fases fundamentales como se puede observar en la Figura 18.

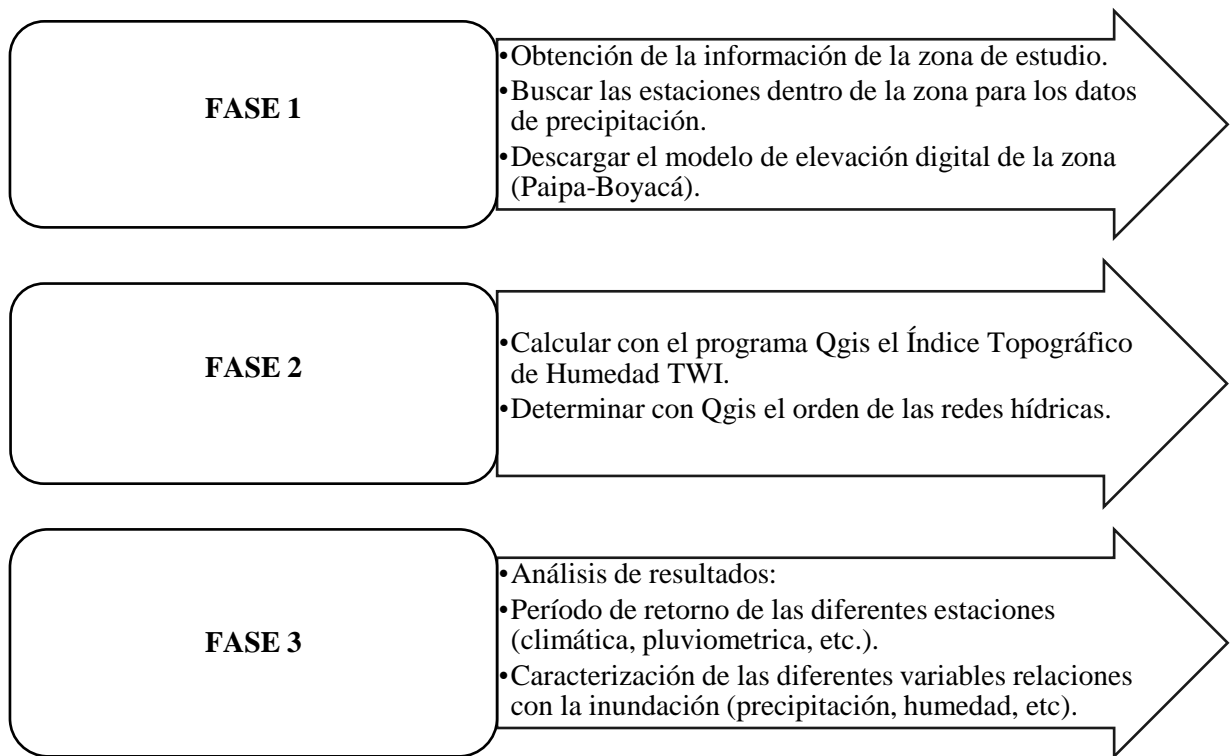


Figura 18. Metodología del proyecto. Fuente: Propia

6.1 Fase 1.

6.1.1 Estaciones dentro de la zona de estudio (Paipa-Boyacá).

La compilación de estas fases permite identificar el comportamiento de la cuenca alta en condiciones normales y el rendimiento durante condiciones extremas futuras. Las coordenadas geográficas de las estaciones de la zona de estudio se encuentran en la Tabla 6.

| Código | Nombre | Departamento | Municipio | Latitud | Longitud | Altitud |
|----------|------------|--------------|-----------|------------|--------------|---------|
| 24035430 | Tunguavita | Boyacá | Paipa | 5,74591667 | -73,11636111 | 2470 |
| 24025030 | La Sierra | Boyacá | Paipa | 5,96638889 | -73,16389139 | 2700 |
| 24030510 | El Cerezo | Boyacá | Paipa | 5,69930556 | -73,07175 | 2900 |

Tabla 6. Coordenadas Geográficas de las estaciones de la zona de estudio Paipa – Boyacá. Fuente: IDEAM

6.2 Fase 2.

6.2.1 Índice Topográfico de Humedad (TWH).

Es la variable que se relaciona con la humedad del suelo y refleja la tendencia de una celda a acumular agua. Como se puede ver en la Figura 19 ya que áreas con mayor valor del índice, como producto de su configuración topográfica y edáfica, son más propensos a generar escorrentía derivada de la precipitación (Abarca, 2010).

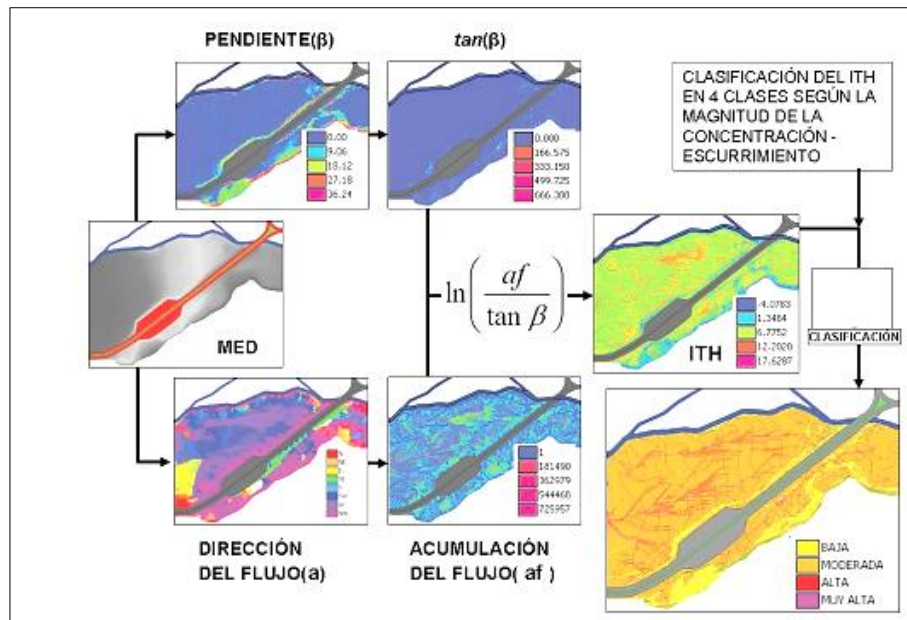


Figura 19. Análisis topográfico para el cálculo del ITH y su posterior clasificación en clases relativas a la magnitud de la concentración del escurrimiento. Fuente: (José & Ulrich, 2012)

Este índice se calcula mediante la siguiente expresión:

$$TWI_i = \ln \left[\frac{ACU_i}{\tan(\beta_i)} \right] \quad (2)$$

Donde: ACU_i : es la acumulación de flujo en la celda i . $\tan(\beta_i)$: es la pendiente local en la celda i .

El cálculo del índice Topográfico de Humedad se basa en una secuencia de análisis de modelos digitales de terreno y su morfología para identificar las zonas con un alto índice de humedad. Para localizar las zonas con un alto potencial de humedad y calcular el TWI se debe utilizar un DEM de la zona de estudio (Paipa – Boyacá).

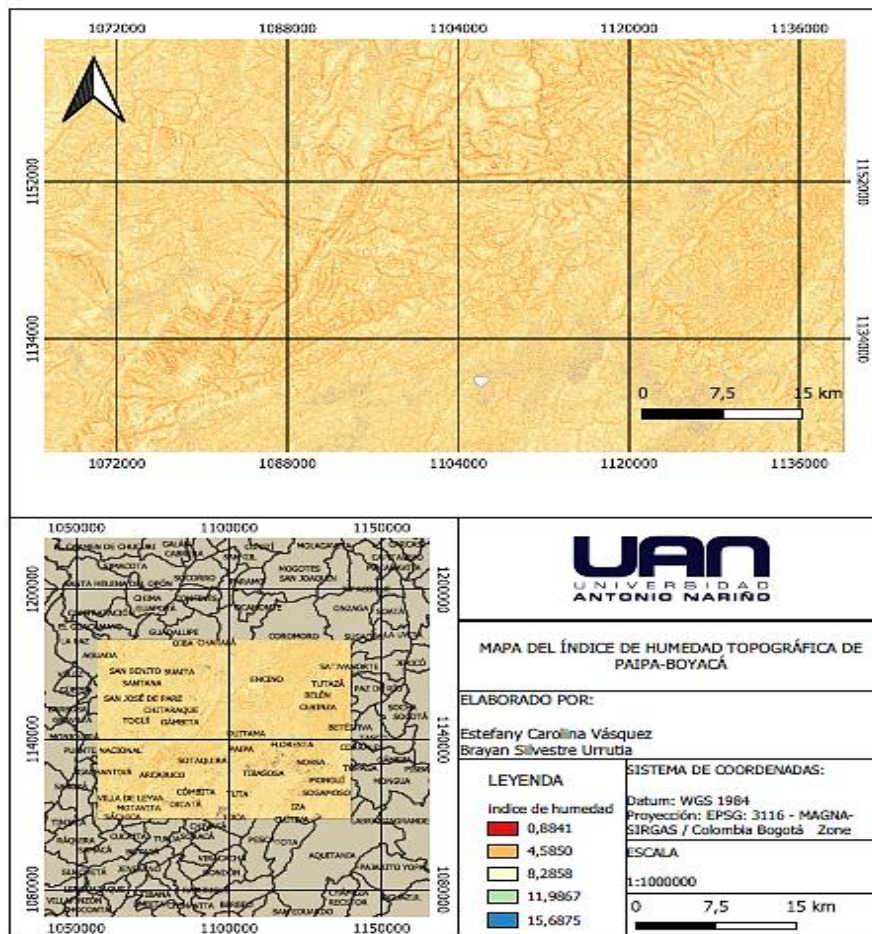


Figura 20. Mapa del índice topográfico de humedad de Paipa-Boyacá. Fuente: propia

Al emplear la herramienta **r. topidx** del programa Qgis se logra crear una capa de índices topográficos a partir de la capa ráster de elevación (DEM) de la zona de estudio, como se puede ver en la Figura 20. En la leyenda del mapa se encuentran los diferentes intervalos del TWI.

En la Tabla 7 se presenta el grado de amenaza según el índice topográfico de humedad, entre más alto es el índice de humedad menor es el grado de amenaza.

| TWI | Grado de amenaza |
|------------------------|-------------------------|
| Alto índice de humedad | 1 |
| | 2 |
| | 3 |
| Bajo índice de humedad | 4 |

Tabla 7. Grado de amenaza según el índice topográfico de humedad. Fuente: Propia

Teniendo en cuenta el resultado arrojado por la herramienta **r. topidx** como se observa en la Figura 20, se encuentra los intervalos arrojando un valor predominante en el grado de amenaza 2 de acuerdo con el mapa del índice topográfico de humedad.

| TWI | Grado de amenaza |
|-------------------|-------------------------|
| 0,8841 – 4,5850 | 1 |
| 4,5850 – 8,2858 | 2 |
| 8,2858 – 11,9867 | 3 |
| 11,9867 – 15,6875 | 4 |

Tabla 8. Grado de amenaza acorde al mapa del índice topográfico de humedad respecto al área de estudio. Fuente:

Propia

6.2.2 Parámetro morfométrico asociado a la red de drenajes.

6.2.2.1 Orden de los cauces.

El orden de fujo es una clasificación que proporciona el grado de conectividad dentro de la cuenca. Hay varias formas de derivar el orden de los canales, pero la más conocida y la más utilizada es el método Horton. Este considera como corrientes de primer orden a las corrientes fuertes que son portadoras de agua de nacimiento que no tienen afluentes. Cuando se unen dos corrientes de orden uno, resulta una corriente de orden dos. De tal forma que, cuando se unen dos corrientes de orden i , resulta una corriente de orden $i+1$. Cuando una corriente se une con otra de un mayor orden, resulta una corriente que conserva el mayor orden. En la Figura 21 se puede ver el número de orden de las corrientes según el método de Horton.

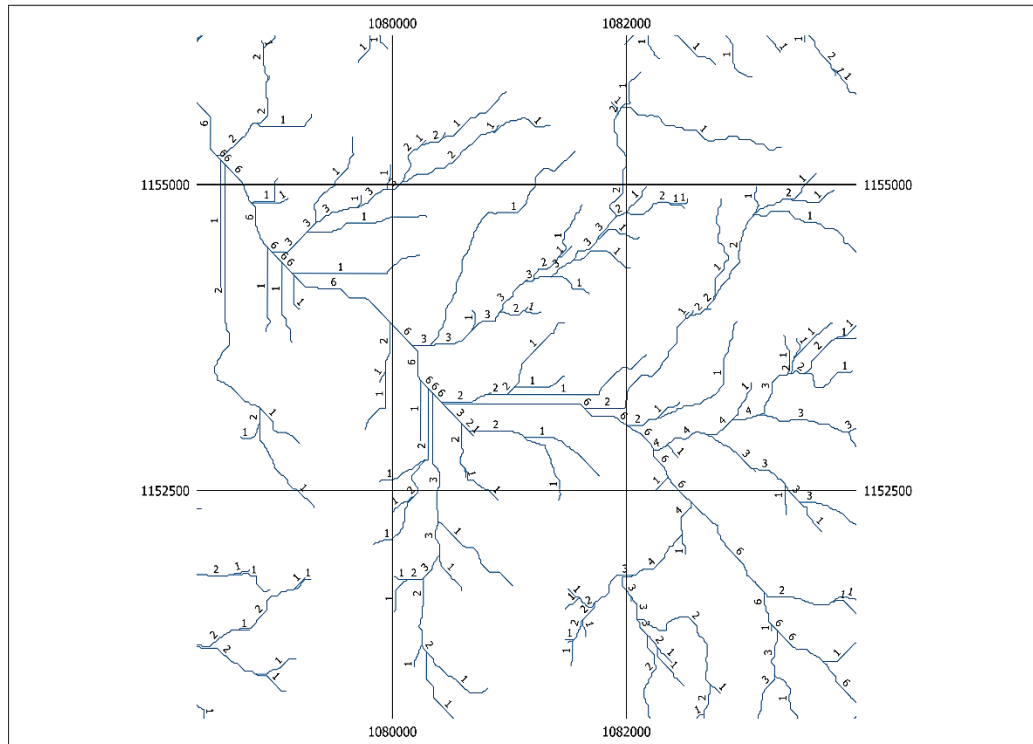


Figura 21. Orden de los cauces según el método de Horton. Fuente: Propia

Este orden se realizó con la ayuda de SAGA GIS usando una serie de herramientas como lo son Flow Direction, Fill Skins, entre otras; para ello fue relevante hacer uso del DEM de la zona, donde se obtuvo como resultado el mapa de la red hídrica que se puede observar en las Figuras 22 y 23 donde se evidencia la gran riqueza que tiene este municipio.

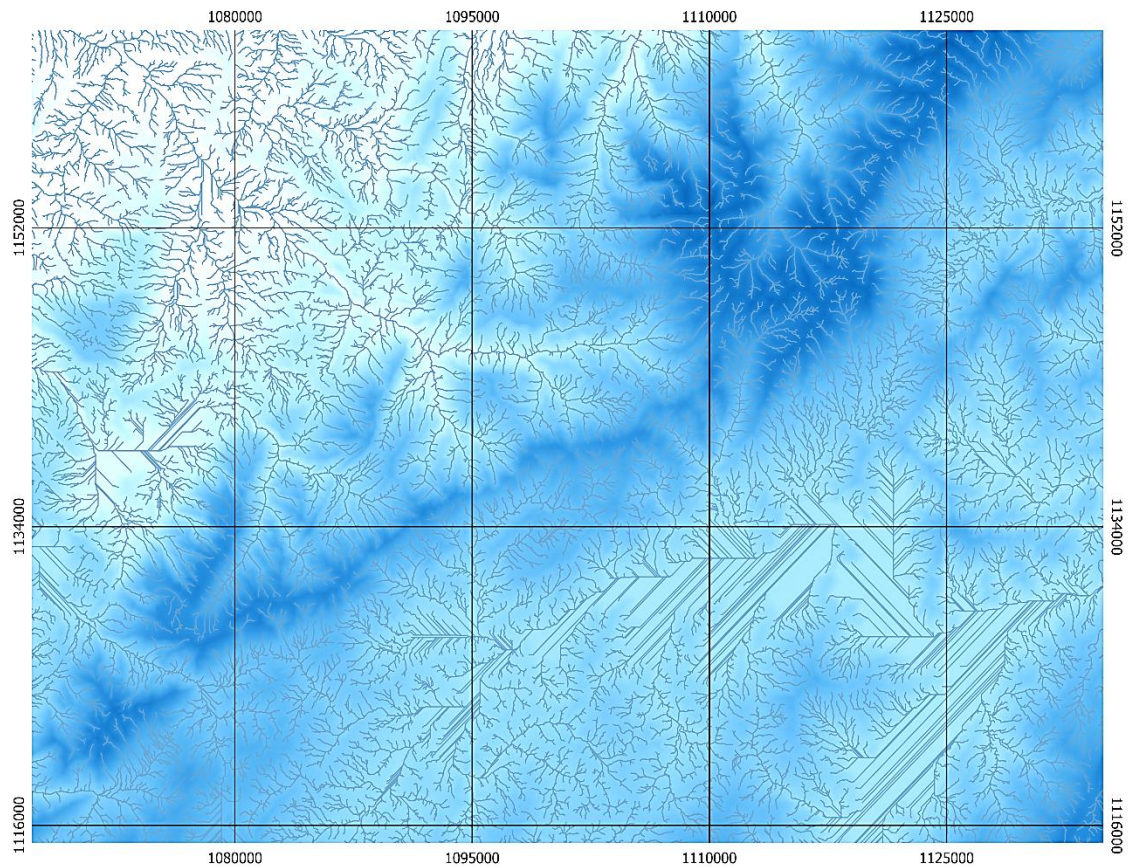


Figura 22. Red hídrica generado por la herramienta SAGA GIS. Fuente: Propia

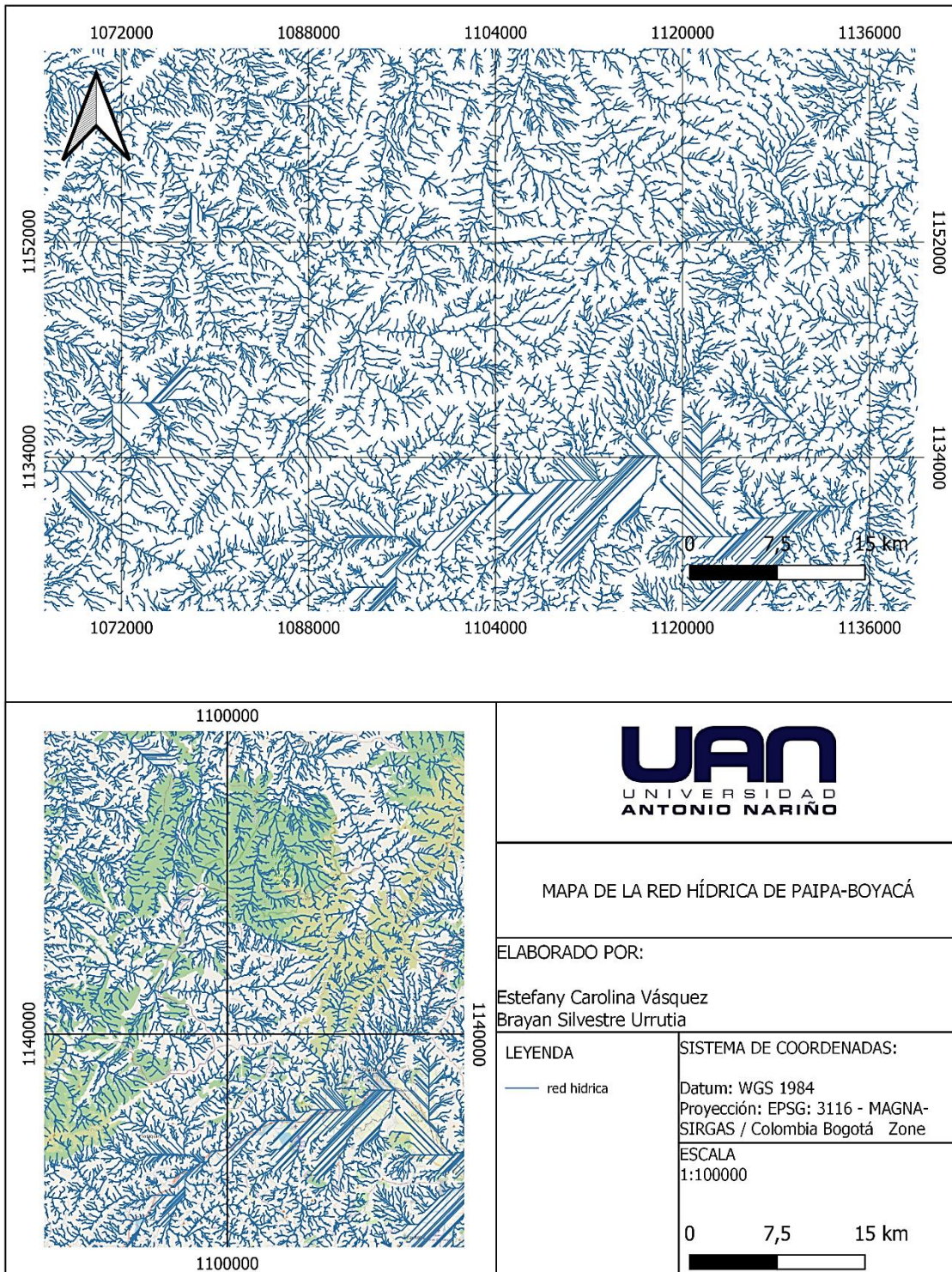


Figura 23. Mapa de la red hídrica de Paipa-Boyacá. Fuente: Propia

7 Análisis de resultados

7.1 Período de retorno de las estaciones pluviométricas.

La modelación hidrológica e hidrodinámica desarrollada en la cuenca alta del Chicamocha permitió determinar con base a los datos brindados por el IDEAM de tres estaciones que se encuentran ubicadas en el departamento de Boyacá en el municipio de Paipa, entre los años 1991 al 2020 hay variaciones relevantes en la intensidad de la lluvia lo cual ocasiono inundaciones entre el año 2008 al 2017 en el municipio de Paipa cercano al río Chicamocha.

| Código | Nombre | Departamento | F(T) 50 | Probabilidad | F(T) 100 | Probabilidad |
|----------|------------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|
| 24035430 | Tunguavita | Boyacá | 67,74197 | 0,98 | 73,92583 | 0,99 |
| 24025030 | La Sierra | Boyacá | 71,48202 | 0,98 | 76,59827 | 0,99 |
| 24030510 | El Cerezo | Boyacá | 61,18690 | 0,98 | 65,73470 | 0,99 |

Tabla 9. Período de retorno de las estaciones de la cuenca alta del Chicamocha. Fuente: Propia

Los períodos de retorno se calcularon con proyecciones de 25, 50 y 100 años, en el cual se podrá establecer el período de ocurrencia y la cantidad de precipitación que tendrá la zona de estudio, arrojando un riesgo alto de inundación en la actualidad. La predicción se realizó de acuerdo con los datos de la Tabla 10.

7.1.1 Estación La Sierra 24025030 (Paipa-Boyacá).

Las estaciones meteorológicas de dónde se tomaron los respectivos datos cuenta con un funcionamiento desde el año 1981 con el cual nos permite tener una mayor información de la precipitación que ha tenido durante varios años y así poder aplicarla en posibles cálculos que permitirá mirar el comportamiento de la precipitación para futuros años, y sea de mucho beneficio

para una población ya que con esta probabilidad se puede mitigar futuros impactos negativos a la sociedad.

| Año | Valores Máximos | N° | X_i | $(X_i - X)^2$ |
|------|-----------------|----|-------|---------------|
| 1991 | 30,96 | 1 | 30,96 | 115,318962 |
| 1992 | 46,5 | 2 | 46,5 | 23,0528018 |
| 1993 | 43,4 | 3 | 43,4 | 2,89453511 |
| 1994 | 44,5 | 4 | 44,5 | 7,84746844 |
| 1995 | 34,7 | 5 | 34,7 | 48,9813351 |
| 1996 | 36,8 | 6 | 36,8 | 23,9969351 |
| 1997 | 50,4 | 7 | 50,4 | 75,7132018 |
| 1998 | 56,4 | 8 | 56,4 | 216,129202 |
| 1999 | 51,8 | 9 | 51,8 | 102,036935 |
| 2000 | 29 | 10 | 29 | 161,256135 |
| 2001 | 51,6 | 11 | 51,6 | 98,0364018 |
| 2002 | 48,1 | 12 | 48,1 | 40,9770684 |
| 2003 | 37,5 | 13 | 37,5 | 17,6288018 |
| 2004 | 39,3 | 14 | 39,3 | 5,75360178 |
| 2005 | 41,4 | 15 | 41,4 | 0,08920178 |
| 2006 | 45,6 | 16 | 45,6 | 15,2204018 |
| 2007 | 30,6 | 17 | 30,6 | 123,180402 |
| 2008 | 36,4 | 18 | 36,4 | 28,0758684 |
| 2009 | 35,6 | 19 | 35,6 | 37,1937351 |
| 2010 | 36,8 | 20 | 36,8 | 23,9969351 |
| 2011 | 42,6 | 21 | 42,6 | 0,81240178 |

| | | | | |
|------------|-------------|-----------|----------------|-------------------|
| 2012 | 31,4 | 22 | 31,4 | 106,062535 |
| 2013 | 34,4 | 23 | 34,4 | 53,2705351 |
| 2014 | 54,8 | 24 | 54,8 | 171,644935 |
| 2015 | 39,2 | 25 | 39,2 | 6,24333511 |
| 2016 | 62,7 | 26 | 62,7 | 441,056002 |
| 2017 | 32,4 | 27 | 32,4 | 86,4652018 |
| 2018 | 41,2 | 28 | 41,2 | 0,24866844 |
| 2019 | 48,4 | 29 | 48,4 | 44,9078684 |
| 2020 | 36,5 | 30 | 36,5 | 27,0261351 |
| MAX | 62,7 | 30 | 1250,96 | 2105,11755 |

Tabla 10. Mínimos y máximos de precipitación estación Tunguavita. Fuente: Propia

Se determinó el valor máximo de precipitación de la Tabla 10, desde 1981 hasta 2020 en el cual sobresalió como valor máximo el 62,7 en el año 2016. A continuación, se puede observar los cálculos pertinentes a la tabla anterior a partir de las siguientes ecuaciones.

N= Número de datos de precipitación desde 1991 hasta 2020.

$$N = 30$$

$\sum x_i$ = Sumatoria de los 32 valores máximos de precipitación.

$$\sum xi = 30,96 + 46,5 + 43,4 + 44,5 + 34,7 + 36,8 + 50,4 + \dots + 36,5 = 1250,96$$

X= Variable Probabilística de precipitación # 1.

$$X = \frac{\sum xi}{\sum N} = \frac{1250,96}{30} = 41,70 \text{ mm}$$

$(xi - x)^2 =$ Precipitación anual.

$$(xi - x)^2 = (30,96 - 41,70)^2 = 115,32 \text{ mm}$$

$\sum(xi - x)^2 =$ Valor acumulado de precipitación Anual.

$$\sum(xi - x)^2 = 115,32 + 23,05 + 2,89 + 7,85 + \dots + 27,03 = 2105,12 \text{ mm}$$

De acuerdo con la tabla anterior se pueden ver los análisis que se deben realizar para la predicción de los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años. En la Tabla 11 se muestran los valores de los periodos de retorno bajo los parámetros de variables reducidas.

| Periodo de retorno Años | Variable reducida YT | Precipitación mm XT' (mm) | Prob. De ocurrencia F(xT) | Corrección intervalo fijo XT (mm) |
|----------------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---|
| 25 | 3,198534261 | 58,69709938 | 0,96 | 66,32772229 |
| 50 | 3,901938658 | 63,25843002 | 0,98 | 71,48202592 |
| 100 | 4,600149227 | 67,78608052 | 0,99 | 76,59827099 |

Tabla 11. Periodos de retorno 25, 50 y 100 años con variables reducidas estación La Sierra. Fuente: Propia

$$X2 = \sqrt{\sum \frac{(xi - x)^2}{(N - 1)}} = \sqrt{\frac{2105,12}{30 - 1}} = 8,32 \text{ mm}$$

X3= Variable Probabilística de Precipitación #3.

$$X3 = \sqrt{\left(\frac{6}{\pi}\right)} * X2 = 6,48 \text{ mm}$$

X4= Variable Probabilística de Precipitación #4.

$$X4 = X - (0,5772 * X3) = 42,70 \text{ mm} - (0,5772 * 6,48 \text{ mm}) = 37,96 \text{ mm}$$

Con respecto al análisis y el cálculo de las variables probabilísticas como se muestra en la tabla anterior, se realiza la proyección de los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años.

7.1.1.1 Periodo de Retorno a 25 años.

YT= Variable Reducida.

$$YT = LN \left(LN \left(\frac{25}{25 - 1} \right) \right) = 3,1985$$

XT^= Precipitación mm.

$$XT^ = X4 + (X3 * YT) = 37,96 \text{ mm} + (6,48 * 3,1985) = 58,70 \text{ mm}$$

F(xT)= Probabilidad de Ocurrencia.

$$F(xT) = 0,9600 = 96\%$$

XT= Corrección del Intervalo Fijo.

$$XT = XT^ * 1,13 = 58,70 * 1,13 = 66,33 \text{ mm}$$

7.1.1.2 Periodo de Retorno a 50 años.

YT= Variable Reducida.

$$YT = LN \left(LN \left(\frac{50}{50 - 1} \right) \right) = 3,9019$$

X_T = Precipitación mm.

$$X_T = X_4 + (X_3 * Y_T) = 37,96 \text{ mm} + (6,48 * 3,9019) = 63,26 \text{ mm}$$

$F(x_T)$ = Probabilidad de Ocurrencia.

$$F(x_T) = 0,9800 = 98\%$$

X_T = Corrección del Intervalo Fijo.

$$X_T = X_T * 1,13 = 63,26 * 1,13 = 71,48 \text{ mm}$$

7.1.1.3 Periodo de Retorno a 100 años.

Y_T = Variable Reducida.

$$Y_T = LN \left(LN \left(\frac{100}{100 - 1} \right) \right) = 4,6001$$

X_T = Precipitación mm.

$F(x_T)$ = Probabilidad de Ocurrencia.

$$F(x_T) = 0,9900 = 99\%$$

X_T = Corrección del Intervalo Fijo.

$$X_T = X_T * 1,13 = 63,26 * 1,13 = 76,60 \text{ mm}$$

7.2 Modelo digital de elevación (DEM).

Representa la topografía de la zona, la cual determina los parámetros de la modelación hidrológica (pendientes), en la zona comprendida se identificaron sectores con diferentes tipos de relieve los cuales se asocian con los metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m).

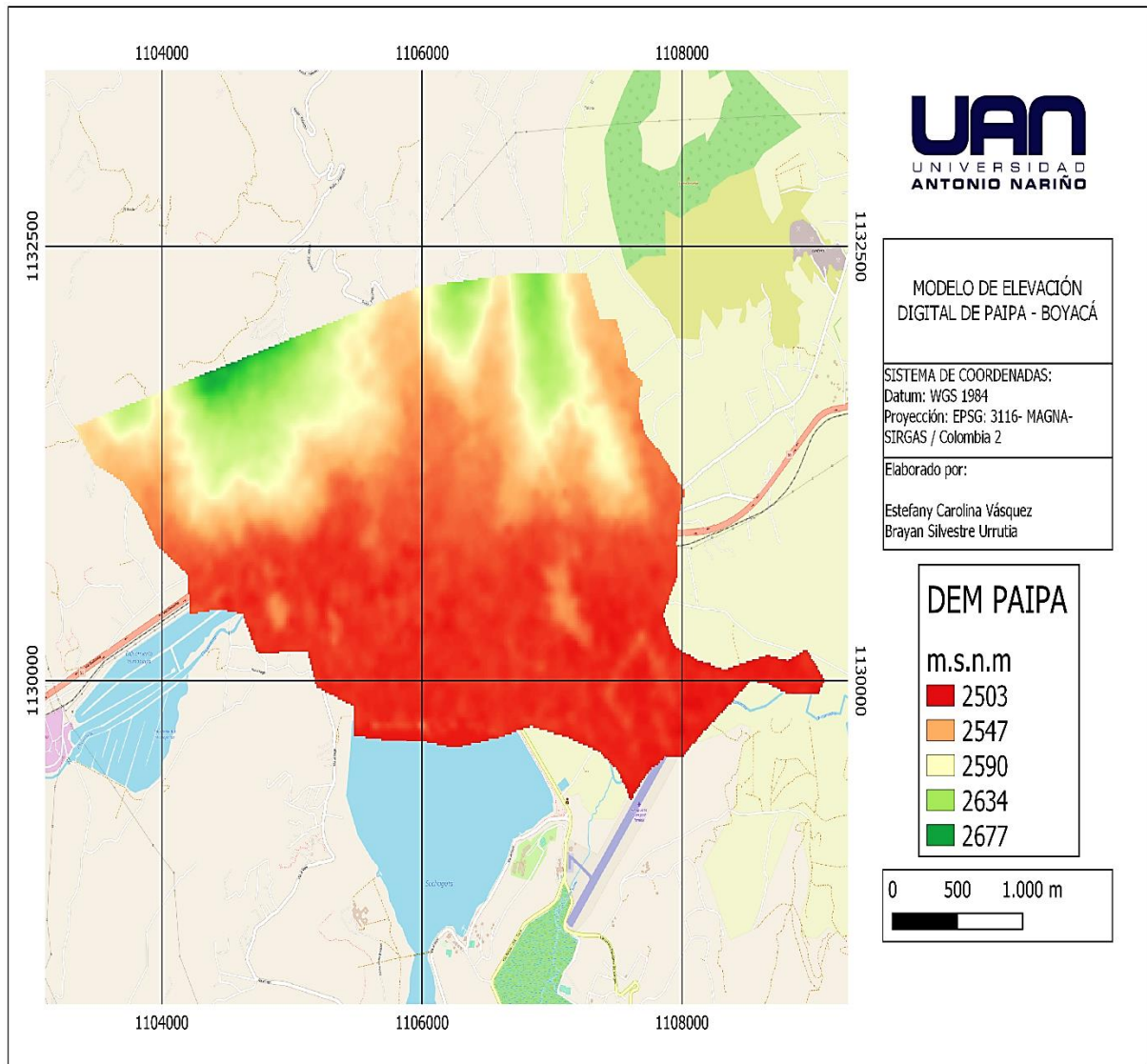


Figura 24. Modelo de elevación digital de la zona de estudio Paipa. Fuente: Propia

La Figura corresponde a la zona seleccionada de estudio, la franja de relieve pertenece al municipio de Paipa ubicado en el departamento de Boyacá.

La escala que se muestra a continuación permite realizar un análisis más detallado acerca de las elevaciones de la cuenca alta del Chicamocha donde se encuentra la diversa caracterización del tipo de terreno que conforma el territorio. En la Tabla 12, se puede ver el tipo de suelo según la altura.

| Tipo de suelo | Altitud (m.s.n.m) |
|----------------------------------|--------------------------|
| Suelos de colina | 50 – 300 |
| Suelos de planicie de piedemonte | 500 – 2500 |
| Suelos de altiplanos | 2600 - 2800 |

Tabla 12. Tipo del suelo boyacense según la altura (m.s.n.m). Fuente: Propia

El rango de (2503 - 2590) muestra la altitud sobre la zona de la cuenca del río Chicamocha, en el cual se puede observar un suelo de planicie de piedemonte que se caracterizan por ser los suelos del piso térmico cálido, los cuales se localizan entre 500 y 2500 m.s.n.m., se desarrollaron sobre abanicos aluviales. Tienen una gran cantidad de arcilla en su composición, son de color marrón rojo y gris, tienen altos niveles de agua y baja fertilidad.

En cambio, el rango de (2634 - 2677) el cual se encuentra de color verde oscuro y verde claro, indica elevaciones de suelos del altiplano correspondientes a suelos de templados a fríos, están localizados a 2600 y 2800 m.s.n.m., son superficiales con un alto nivel de drenaje y son de color pardos y rojizos. También tienen una tasa de fertilidad baja y están erosionadas.

7.3 Índice Topográfico de Humedad (TWI o ITH).

La descripción de los Modelos digitales de elevación (DEM) y sus características geométricas como la topografía permite determinar el TWI, que está directamente relacionado con la cantidad de agua depositada en el terreno, cuanto más altura sobre el nivel del mar tenga una zona mayor será la humedad en el sector.

Por lo tanto, se asume que las lluvias en el territorio norte de Colombia junto a los datos obtenidos de las estaciones pluviométricas aledañas a la cuenca, y la edafología de la zona permite analizar el escurrimiento superficial y la infiltración dependiendo el tipo de suelo (arena, arcilla y limos) en la cuenca alta del Chicamocha, e identificar las zonas con una alta probabilidad de acumulación de agua.

Teniendo en cuenta el resultado arrojado por la herramienta r. topidx como se observa en la Figura 25, se encuentra los intervalos arrojando un valor predominante en el grado de amenaza 1 de acuerdo con el mapa del índice topográfico de humedad.

| TWI | Grado de amenaza |
|-------------------|-------------------------|
| 2,7651 – 5,1848 | 1 |
| 5,1848 – 7,6046 | 2 |
| 7,6046 – 10,0243 | 3 |
| 10,0243 – 12,4440 | 4 |

Tabla 13. Grado de amenaza acorde al mapa del índice topográfico de humedad de Paipa: Fuente: propia

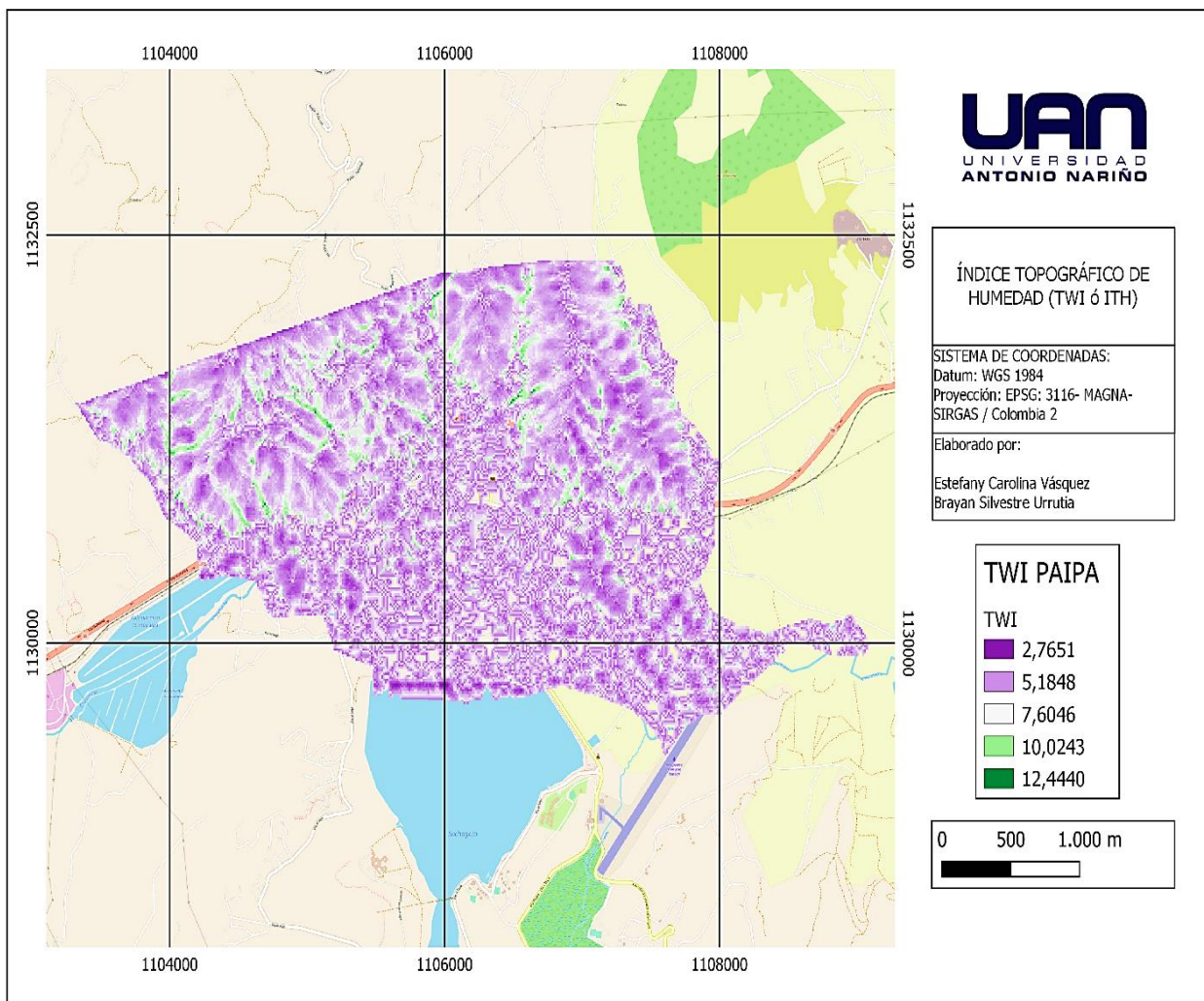


Figura 25. Mapa sobre el índice Topográfico de Humedad de Paipa. Fuente: Propia

7.4 Geología y Geomorfología de la cuenca alta del Chicamocha.

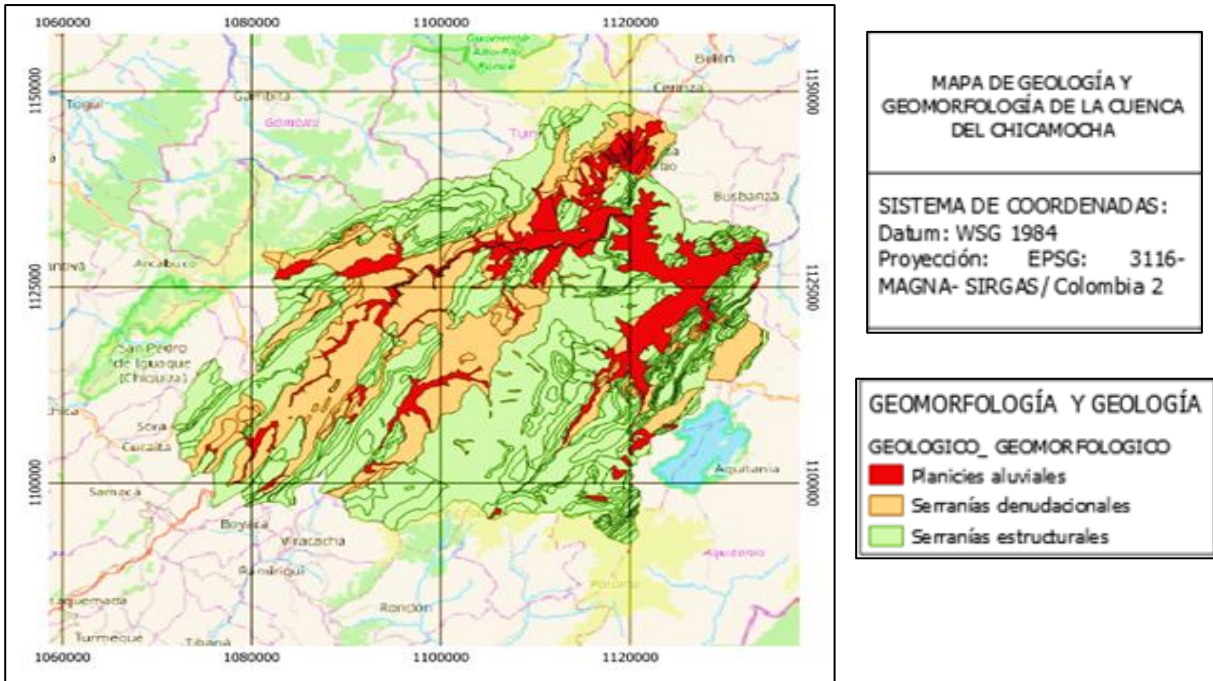


Figura 26. Mapa sobre la geología y geomorfología de la cuenca del Chicamocha. Fuente: (Alexandra et al., 2015)

7.4.1 Geología de la cuenca.

Como se puede ver en la Figura 26, la Cuenca del río Chicamocha se caracteriza por la presencia de rocas sedimentarias depositadas en una variedad de ambientes, desde oceánicos hasta continentales, como resultado de diversos eventos geológicos que han afectado la cuenca a lo largo de la historia del Planeta Tierra.

En el área de la Cuenca del río Chicamocha, se forman pliegues y fallas, que se relacionan con dos grandes fallas regionales las cuales son las fallas de Boyacá y de Soapaga, generando una cuenca con un área de gran complejidad estructural.

7.4.2 Geomorfología de la cuenca.

Los principales problemas encontrados en la cuenca del río Chicamocha son la erosión de las vías fluviales y el desplazamiento de importantes afluentes como los ríos Paipa, Duitama, Sogamoso. Después de salir del embalse de Copa, los principales afluentes como el río Tuta cambiaron la dirección del flujo lo que provocó la erosión de las orillas, el movimiento lateral de los ríos, cambios en la forma de las terrazas y exportaciones.

En el mapa anterior se puede inferir de acuerdo con la leyenda del mapa que la mayor parte del territorio su geología y geomorfología es de tipo serranías estructurales, con una reducida parte de planicies aluviales.

7.5 Caudales máximos del río Chicamocha y cercanías.

Estudios hidrológicos realizados por diferentes entidades como POMCA y el IDEAM, han permitido identificar los valores máximos de los caudales de las diferentes corrientes hídricas como son la del río Chicamocha y sus fuentes aledañas. En la Tabla 15, se muestra las diferentes fuentes hídricas cercanas al municipio de Paipa con el valor máximo del caudal anual, siendo la corriente Directos Alto Chicamocha con el valor más alto del $Q_{Max_{Anual}}$.

| Corrientes Hídricas | Caudal Máximo Anual |
|--------------------------|---------------------|
| Río Jordán o (Río Chulo) | 4061,138151 |
| Río Tuta | 9087,163113 |
| Río Sotaquirá | 3197,845113 |
| Quebrada Honda Grande | 369,7023684 |
| Quebrada Toibita | 287,2423923 |
| Río Surba | 1538,325084 |
| Quebrada El Aroma | 238,21327 |

| | |
|--------------------------|-------------|
| Río Chiticuy | 1588,334667 |
| Río Chiquito | 5881,531122 |
| Río de Piedras | 1339,983061 |
| Directos Alto Chicamocha | 30928,78639 |

Tabla 14. Caudales máximos anuales. Fuente: Propia

7.6 Caudales medios del río Chicamocha y cercanías.

Estudios hidrológicos realizados por diferentes entidades como POMCA y el IDEAM, han permitido identificar los valores medios de los caudales de las diferentes corrientes hídricas como son la del río Chicamocha y sus fuentes aledañas. En la Tabla 16, se muestra las diferentes fuentes hídricas cercanas al municipio de Paipa con el valor medio del caudal anual, siendo la corriente Directos Alto Chicamocha con el valor más alto del $Q_{MedioAnual}$.

| Corrientes Hídricas | Caudal Medio Anual |
|----------------------------|---------------------------|
| Río Jordán o (Río Chulo) | 824,6877304 |
| Río Tuta | 2667,747413 |
| Río Sotaquirá | 1339,784565 |
| Quebrada Honda Grande | 71,56294332 |
| Quebrada Toibita | 93,69331916 |
| Río Surba | 817,3503909 |
| Quebrada El Aroma | 45,64048863 |
| Río Chiticuy | 590,164835 |
| Río Chiquito | 2317,360221 |
| Río de Piedras | 539,1072632 |
| Directos Alto Chicamocha | 10265,35432 |

Tabla 15. Caudales Medios Anuales. Fuente: Propia

7.7 Caudales mínimos del río Chicamocha y cercanías.

Estudios hidrológicos realizados por diferentes entidades como POMCA y el IDEAM, han permitido identificar los valores mínimos de los caudales de las diferentes corrientes hídricas como son la del río Chicamocha y sus fuentes aledañas. En la Tabla 17, se muestra las diferentes fuentes hídricas cercanas al municipio de Paipa con el valor mínimo del caudal anual, siendo la corriente Directos Alto Chicamocha con el valor más alto del $Q_{Min_{Anual}}$.

| Corrientes Hídricas | Caudal Mínimo Anual |
|--------------------------|---------------------|
| Río Jordán o (Río Chulo) | 123,6280303 |
| Río Tuta | 1134,922866 |
| Río Sotaquirá | 404,8533149 |
| Quebrada Honda Grande | 1,157543609 |
| Quebrada Toibita | 2,795704401 |
| Río Surba | 441,3775104 |
| Quebrada El Aroma | 0,567057277 |
| Río Chiticuy | 162,090003 |
| Río Chiquito | 1233,059598 |
| Río de Piedras | 205,8173495 |
| Directos Alto Chicamocha | 4474,959329 |

Tabla 16. Caudales Mínimos Anuales. Fuente: Propia

8 Conclusiones

El trabajo de investigación consistió en el desarrollo de un histórico de las inundaciones más relevantes en la última década en el municipio de Paipa ubicado en el departamento de Boyacá; la metodología empleada tiene como base el análisis histórico de la zona por inundación y la caracterización física de la misma a partir del análisis hidrológico de las diferentes variables (precipitación, humedad, topografía, etc).

La metodología utilizada se compone de la recolección de datos de las diferentes estaciones pluviométricas ubicadas en el municipio de Paipa en la zona alta del Chicamocha con picos máximos de precipitación desde 1991 hasta 2020 (76,60 mm – 56,60 mm), obteniendo una diferencia considerable con la precipitación en el año 2015 de acuerdo a la proyección del período de retorno a 100 años a partir de los datos de las diferentes estaciones, incrementando el riesgo de inundación por el recorrido del río Chicamocha por el municipio de Paipa y la topografía del terreno con abundantes serranías estructurales.

Con las proyecciones realizadas se desarrolló un mapa por medio del Sistema de información geográfico (Qgis), se delimito la zona de la cuenca alta del Chicamocha identificando el riesgo de inundaciones por medio del índice topográfico de humedad (TWI o ITH), el cual se encuentra relacionado con la cantidad de agua acumulada en el terreno.

La cuenca alta del Chicamocha presenta una topografía variada, como serranías y zonas planas, para la identificación de estas características fue fundamental los modelos digitales de elevación (DEM). En cuanto al índice topográfico de humedad (TWI o ITH) el Sistema de información geográfico (Qgis), suministro una escala compuesta por un rango numérico el cual indica que entre más elevado sea el TWI mayor será la humedad en la zona, el valor (2,7651 – 5,1848) corresponde

a un grado de amenaza 1, ocupando gran parte de la zona, (5,1848 – 7,6046) con grado 2, (7,6046 – 10,0243) grado 3, y (10,0243 – 12,4440) con un grado 4 zona de planicie y de menor altitud, estos contienen diferentes grados de humedad, también depende de la edafología y geomorfología del terreno.

9 Referencias

- Abarca, O. (2010). Desarrollo de un modelo de geoprocésamiento para la valoración productiva y tributaria de tierras agrícolas en Venezuela [Universidad Politécnica de Madrid]. In *Universidad Politécnica de Madrid E.T.S de Ingenieros en Topografía Geodesia y Cartografía*. http://redgeomática.rediris.es/redlatingeo/2010/OSCAR_ABARCA.pdf
- ABIERTOS, F. D. (8 de JUNIO de 2011). SLIDESHARE. Obtenido de https://es.slideshare.net/renton_1/flujoencanalabierto
- ACADEMY, K. (16 de OCTUBRE de 2015). ECUACION DE BERNOULLI. Obtenido de <https://es.khanacademy.org/science/physics/fluids/fluid-dynamics/a/what-is-bernoullis-equation>
- Alexandra, D., Viasus, A., Johana, A., & Mendieta, F. (2015). *ANÁLISIS SOBRE LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES EN BOYACÁ*. <http://rdigitales.uptc.edu.co/memorias/index.php/sig/sig/paper/viewFile/1614/1613>
- Ashkar. (1993). Estimadores robustos en análisis de frecuencia hidrológica. *Engineering Hydrology*. 1993, pág. 347-352.
- Bladé, E. C. (26 de 06 de 2014). Ingeniería del agua. Obtenido de <http://www.ingenieriadelagua.com/2004/download/18-1%5Carticle6.pdf>
- BOYACÁ, C. A. (31 de JULIO de 2006). PLAN DE ORDENAMIENTO Y MANEJO AMBIENTAL. Obtenido de corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2015/11/diagnostico-capitulo1-pomca-chicamocha.pdf
- BOYACA, G. D. (2011). MAPA DE RIESGO DE CALIDAD DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO DEL MUNICIPIO DE PAIPA. Obtenido de https://www.boyaca.gov.co/SecSalud/images/Documentos/Salud_Publica/Ano_2014/AGU_A_CONSUMO_HUMANO/MAPA_RIESGO/MAPA%20DE%20RIESGO%20DE%20PAIPA.pdf
- Caracol Radio. (2017). *Un hotel y dos calles inundadas dejan las fuertes lluvias en Paipa, Boyacá: Un hotel y dos calles inundadas dejan las fuertes lluvias en Paipa, Boyacá | Tunja | Caracol Radio*. Tunja. https://caracol.com.co/emisora/2016/04/25/tunja/1461590708_982214.html
- Coelho, F. (01 de 01 de 2019). Inundaciones. Obtenido de <https://www.significados.com/inundaciones/>
- COM. (3 de febrero de 2006). Comisión de las comunidades Europeas . Obtenido de Comisión de las comunidades Europeas : <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2006:0775:FIN:ES:PDF>
- Cubillos Monroy, F. A. (2017). *Generación del Mapa de Inundación del Río Chicamocha Departamento de Boyacá, Mediante una Aplicación SIG*. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/4775/CubillosMonroyFerneAle xander2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- DANE. (26 de MAYO de 2015). CIFRAS DE DESASTRES NATURALES. Obtenido de <https://www.dnp.gov.co/Paginas/3-181-muertos,-21-594-emergencias-y-12,3-millones-de-afectados-las-cifras-de-los-desastres-naturales-entre-2006-y-2014-.aspx>
- Desastres, C. M. (2013). Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres. Obtenido de https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/28456/PMGRD%20_Paipa_Boyaca.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- El Tiempo. (2021). *500 familias damnificadas por desbordamiento del río Chicamocha - Archivo Digital de Noticias de Colombia y el Mundo desde 1.990 - eltiempo.com*. REDACCIÓN BOYACÁ 7 DÍAS. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-11647861>
- Flumen, I. (2010). Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas. España: CIMNE.
- Hydrology, I. J. (2019). Discovering the geoeconomic value of the lower. *Med Crave*, 4.
- HYperphysics. (2005). Ecuación de Bernoulli. Obtenido de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/hph.html>
- IDEAM. (9 de FEBRERO de 2014). Amenazas por inundación. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion>
- Infobae. (2021, March 4). *Por incremento de lluvias se hará la apertura de compuertas en el Lago Sochagota y la represa La Copa* . <https://www.infobae.com/america/colombia/2021/03/05/por-incremento-de-lluvias-se-hara-la-apertura-de-compuertas-en-el-lago-sochagota-y-la-represa-la-copa/>
- José, R. L., & Ulrich, K. (2012). Use of the topographic wetness index (TWI) for the diagnosis of the river overflow threat, Trujillo State-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 53(1), 109–126. <https://www.redalyc.org/pdf/3477/347730388007.pdf>
- Méndez, C. (2020). Inundación. Obtenido de <https://www.geoenciclopedia.com/inundación/>
- Millan, P. R., Alberto, E., Moreno, S., Carlos, J., Martín, M., De Educación, S., Fernando, O., Blanco, B., Lozano, M. M., Delegada En Bogotá, S., Rodríguez, Z., & Privada, S. (2011). *Susceptibilidad del Departamento de Boyacá a Inundaciones y deslizamientos*. https://www.dapboyaca.gov.co/descargas/publicaciones/susceptibilidad_inundaciones.pdf
- Ochoa rubio, T. (2011). Hidráulica de ríos y procesos morfológicos . Bogotá : Kimpres Ltda.
- Pistrika, A. (2016). university of athens. university of athens, 1-3.
- PNUD . (19 de 11 de 2012). PNUD Programa para el desarrollo de las naciones unidas para el desarrollo. Obtenido de PNUD Programa para el desarrollo de las naciones unidas para el desarrollo: <https://www.undp.org/content/undp/es/home/librarypage/mdg/the-millennium-development-goals-report-2012.html>
- Rastmanesh, F. (1 de 10 de 2020). Scopus. Obtenido de Scopus: <https://ezproxy.uan.edu.co:2063/record/display.uri?eid=2-s2.0-85091419463&origin=resultslist&sort=plf->

f&src=s&st1=+statistical+analysis+of+flooding+in+rivers&st2=&sid=5e179035184329582c0ba2b5d140e5d9&sot=b&sdt=b&sl=58&s=TITLE-ABS-KEY%28+statistical+analys

- Regional, C. A. (2008). Comparación de modelos físicos y de inteligencia artificial para predicción de niveles de inundación. *Index*, 2, 3 y 6. .
- regional, s. d. (28 de febrero de 2018). Indicadores de Turismo. Obtenido de situr.boyaca.gov.co/indicadores-visitantes-de-turistas-en-el-mes-de-febrero/#:~:text=El%20municipio%20más%20visitado%20fue,%2C52%25%20para%20actividades%20profesionales.
- Rigaud, M. (12 de 2008). E-libro. Obtenido de E-libro: <https://ezproxy.uan.edu.co:2830/es/ereader/bibliouan/6114?page=2>
- Rodríguez Díaz, H. E., & Silva Calixto, K. Y. (2018). *DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE ÁREAS EN AMENAZA Y ESCENARIOS EN CONDICIÓN DE RIESGO POR INUNDACIÓN A ESCALA 1:25000 PARA LA ZONA RURAL Y 1:5000 PARA LA ZONA URBANA DEL MUNICIPIO DE MONQUIRÁ-BOYACÁ* . <https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/2508/1/TGT-1094.pdf>
- U Santo Tomas, L. G. (2018). Effect of Climate Change on Rainfall in the Upper Basin of Chicamocha River in the Period of 1980-2012. Scielo.
- UNDRR. (06 de 2001). UNDRR Oficinas de naciones unidas para la prevención de riesgos y desastres. Obtenido de UNDRR Oficinas de naciones unidas para la prevención de riesgos y desastres: <https://eird.org/esp/acerca-eird/marco-accion-esp.htm>
- Vanguardia. (2012, April 22). *Boyacá en emergencia por el invierno*. Vanguardia. <https://www.vanguardia.com/colombia/boyaca-en-emergencia-por-el-invierno-FFVL153521>