



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

ESTIMACIÓN DE LOS CAUDALES MÁXIMOS Y CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE LA SUBCUENCA DEL CAUCE EN EL SECTOR HIDRODEPENDIENTE DEL MUNICIPIO DE SAN FRANCISCO - CUNDINAMARCA

SERGIO ANDRÉS BERMEO ARTUNDUAGA
ADRIANA ROCÍO LEÓN HERNÁNDEZ
HEIDY ESPERANZA LÓPEZ LÓPEZ

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS
BOGOTÁ D.C. – 2018



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

ESTIMACIÓN DE LOS CAUDALES MÁXIMOS Y CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE LA SUBCUENCA DEL CAUCE EN EL SECTOR HIDRODEPENDIENTE DEL MUNICIPIO DE SAN FRANCISCO - CUNDINAMARCA

SERGIO ANDRÉS BERMEO ARTUNDUAGA
ADRIANA ROCÍO LEÓN HERNÁNDEZ
HEIDY ESPERANZA LÓPEZ LÓPEZ

Trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos

ASESOR: DIEGO ALEJANDRO PULGARIN MONTOYA
INGENIERO CIVIL

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS
BOGOTÁ D.C. – 2018



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN	11
1. GENERALIDADES	12
1.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN	12
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.2.1 <i>Antecedentes del problema</i>	12
1.2.2 <i>Pregunta de investigación</i>	12
1.3 JUSTIFICACIÓN	12
1.4 OBJETIVOS.....	14
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	14
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	14
1.5 CRONOGRAMA.....	14
2. MARCOS DE REFERENCIA	15
2.1 MARCO CONCEPTUAL	15
2.1.1 <i>Área de la cuenca (A)</i>	15
2.1.2 <i>Cuenca hidrográfica</i>	15
2.1.3 <i>Propiedades morfométricas de una cuenca</i>	15
2.1.4 <i>Curvas IDF</i>	15
2.1.5 <i>Modelación hidrológica</i>	16
2.1.6 <i>Hidrograma unitario</i>	16
2.1.7 <i>Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)</i>	16
2.1.8 <i>Metodologías para el cálculo de caudales máximos</i>	17
2.2 MARCO GEOGRÁFICO	18
2.3 MARCO DEMOGRÁFICO	18
2.4 ESTADO DEL ARTE.....	18
3. FUNDAMENTO METODOLÓGICO	21
3.1 METODOLOGÍA	21
3.1.1 <i>Recolección de información</i>	23
3.1.2 <i>Obtención del DEM</i>	23
3.1.3 <i>Delimitación de la cuenca</i>	24

3.1.4	<i>Caracterización morfométrica de la cuenca</i>	25
3.1.5	<i>Análisis de la serie</i>	25
3.1.6	<i>Obtención de las curvas IDF</i>	25
3.1.7	<i>Selección de la curva IDF</i>	27
3.1.8	<i>Obtención de hietogramas</i>	27
3.1.9	<i>Análisis de la cuenca hasta la estación limnimetrica Villeta</i>	27
3.1.10	<i>Obtención de caudales máximos para tiempos de retorno (Villeta)</i>	27
3.1.11	<i>Calibración de parámetros cuenca Villeta en modelación HMS</i>	27
3.1.12	<i>Análisis de metodologías cálculo de caudales máximos</i>	28
3.1.13	<i>Calibración del modelo</i>	28
3.1.14	<i>Calculo de caudales máximos</i>	28
3.1.15	<i>Definición de rango de los caudales máximos</i>	29
4.	RESULTADOS	30
4.1	DELIMITACIÓN DE LA CUENCA	30
4.2	PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA CUENCA	30
4.2.1	<i>CURVA HIPSOMÉTRICA</i>	32
4.2.2	<i>TIEMPO DE CONCENTRACIÓN</i>	33
4.3	ANÁLISIS DE LA SERIE.....	35
4.3.1	<i>PRECIPITACIÓN</i>	35
4.3.2	<i>DATOS DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA MULTIANUAL</i>	36
4.3.3	<i>ANÁLISIS DE DATOS ATÍPICOS</i>	36
4.4	OBTENCIÓN DE LAS CURVAS IDF	38
4.5	OBTENCIÓN DE HIETOGRAMA	40
4.6	ANÁLISIS DE LA CUENCA HASTA LA ESTACIÓN LIMNIMETRICA VILLETA	40
4.7	OBTENCIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS PARA TIEMPOS DE RETORNO (VILLETA)	42
4.8	CALIBRACIÓN DEL MODELO	43
4.9	ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS CALCULO DE CAUDALES MÁXIMOS	44
4.10	CALCULO DEL CAUDAL MÁXIMO	45
4.11	DEFINICIÓN DE RANGO DE LOS CAUDALES MÁXIMOS	46
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	48
	BIBLIOGRAFÍA	49



LISTA DE IMÁGENES

IMAGEN 1. UBICACIÓN DEL MUNICIPIO DE SAN FRANCISCO EN EL DEPARTAMENTO CUNDINAMARCA. FUENTE: (ALCALDÍA DE SAN FRANCISCO DE SALES - CUNDINAMARCA, 2012). MAPA POLÍTICO DEL MUNICIPIO DE SAN FRANCISCO, CUNDINAMARCA. (ALCALDÍA DE SAN FRANCISCO DE SALES - CUNDINAMARCA, 2013).....	18
IMAGEN 2. PROCESO METODOLÓGICO DEL PROYECTO DE GRADO. FUENTE: AUTORES.....	22
IMAGEN 3. SELECCIÓN DEL ÁREA OBJETO DE ESTUDIO.	23
IMAGEN 4. SELECCIÓN DE DEM RESULTANTE DE LA BÚSQUEDA.	24
IMAGEN 5. DESCARGUE DEL DEM, DEL SATÉLITE ALOS PALSAR.....	24
IMAGEN 6. DELIMITACIÓN DE LA SUBCUENCA HASTA EL MUNICIPIO SAN FRANCISCO, A PARTIR DEL DEM OBTENIDO DEL SATÉLITE ALOS PALSAR. FUENTE: AUTORES.....	30
IMAGEN 7. DELIMITACIÓN DE LA SUBCUENCA HASTA EL MUNICIPIO SAN FRANCISCO. FUENTE: AUTORES.....	33
IMAGEN 8. UBICACIÓN DE ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA SABANETA, MUNICIPIO SAN FRANCISCO. FUENTE: HTTP://WWW.IDEAM.GOV.CO/SOLICITUD-DE-INFORMACION	35
IMAGEN 9. DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE LA CUENCA HASTA LA ESTACIÓN LIMNIMETRICA VILLETA, PROGRAMA WMS. FUENTE: AUTORES.	41
IMAGEN 10. DELIMITACIÓN DE LA CUENCA VILLETA Y DE LA SUBCUENCA SAN FRANCISCO, PROGRAMA WMS. FUENTE: AUTORES.	42
IMAGEN 11. SUBDIVISIÓN DE LA SUBCUENCA HASTA EL MUNICIPIO SAN FRANCISCO, CUNDINAMARCA. FUENTE: AUTORES	45



LISTA DE TABLAS

TABLA 1. FASES DEL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	14
TABLA 2. CRONOGRAMA DE DESARROLLO DEL PROYECTO	14
TABLA 3. LINEAMIENTOS CURVAS IDF	16
TABLA 4. METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MÁXIMOS.....	17
TABLA 5. PARÁMETROS DE CÁLCULO	26
TABLA 6. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA CUENCA.....	30
TABLA 7. VALORES DE LA CURVA HIPSOMÉTRICA.....	32
TABLA 8. DATOS DE CADA UNA DE LAS SUBDIVISIONES DE LA SUBCUENCA PARA LA MODELACIÓN DEL HIDROGRAMA UNITARIO SCS.	34
TABLA 9. CÁLCULOS OBTENIDOS PARA LA SUBCUENCA.	34
TABLA 10. CÁLCULOS OBTENIDOS PARA CADA UNA DE LAS SUBDIVISIONES DE LA SUBCUENCA.	34
TABLA 11. DATOS DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS.....	36
TABLA 12. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN DE LA ESTACIÓN SABANETA.	36
TABLA 13. DATOS Y CÁLCULOS ESTADÍSTICOS DE LA ESTACIÓN SABANETA, MUNICIPIO SAN FRANCISCO, CUNDINAMARCA.	37
TABLA 14. MÉTODO WATER RESOURCES COUNCIL.	37
TABLA 15. PROPIEDADES MORFOMÉTRICAS CUENCA VILLETA.....	40



TABLA 16. CALCULO DEL TC DE CADA SUBCUENCA DE LA CUENCA DE VILLETA.....	42
TABLA 17. CAUDALES MÁXIMOS ANUALES ESTACIÓN LIMNIMETRICA VILLETA.....	43
TABLA 18. CAUDALES MÁXIMOS ESTIMADOS POR HIDROESTA.	43
TABLA 19. VALORES DE CAUDALES MÁXIMOS PARA TIEMPOS DE RETORNO CON EL PROCESO ESTADÍSTICO LOG NORMAL.....	43
TABLA 25. PARÁMETROS USADOS EN LA MODELACIÓN DE LA CUENCA VILLETA EN EL PROGRAMA HEC-HMS	44
TABLA 26. VALORES DE CAUDALES MÁXIMOS PARA TIEMPOS DE RETORNO EN LA MODELACIÓN HEC-HMS.....	44
TABLA 27. DIFERENCIA ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN HIDROESTA Y LOS MODELADOS EN HEC-HMS.....	44
TABLA 28. ÁREA DE LAS SUBDIVISIONES DE LA SUBCUENCA MODELADA.....	45
TABLA 29. CAUDALES MÁXIMOS RESULTANTES DE LA MODELACIÓN DE LA SUBCUENCA HASTA EL MUNICIPIO DE SAN FRANCISCO CUNDINAMARCA.	46
TABLA 30. CALCULO DE CAUDALES MÁXIMOS CON DIFERENTES MÉTODOS PARA CADA UNO DE LOS TIEMPOS DE RETORNO PARA LA SUBCUENCA DE SAN FRANCISCO CUNDINAMARCA.	46
TABLA 31. RANGO DE VALORES DE CAUDALES MÁXIMOS DE LA SUBCUENCA HASTA EL MUNICIPIO SAN FRANCISCO, CUNDINAMARCA.	46

LISTA DE GRAFICAS

GRÁFICA 1. CURVA HIPSOMÉTRICA. FUENTE: AUTORES.....	32
GRÁFICA 2. CAJA DE BIGOTES. FUENTE: AUTORES.....	37
GRÁFICA 3. DISPERSIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS DE LA ESTACIÓN SABANETA MUNICIPIO SAN FRANCISCO CUNDINAMARCA. FUENTE: AUTORES	38
GRÁFICA 4. CURVAS POR REGRESIONES MATEMÁTICAS PARA LA SUBCUENCA SAN FRANCISCO, CUNDINAMARCA. FUENTE: AUTORES	39
GRÁFICA 5. BLOQUE ALTERNO 50%. FUENTE: AUTORES.	40

RESUMEN

El agua, es prioridad para todos los que habitan este planeta, por esta razón se han constituido en todo el mundo organizaciones que velan por la gestión adecuada del recurso hídrico, sin embargo, la gestión por parte de las organizaciones gubernamentales encargadas es insuficiente, generando escasez y desinformación hidrológica en gran parte de las cuencas del país, este es el caso de San Francisco Cundinamarca, debido a ello la alcaldía no cuenta con un estudio hidrológico de su cauce principal, por tanto, el objetivo principal de este documento es presentar la modelación hidrológica de la subcuenca que abastece al municipio, mediante el uso del software HEC-HMS así como las herramientas de los Sistema de Información Geográfica (SIG) e informes hidrológicos de una estación del IDEAM -Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-, además del modelo de elevación digital de Vertex, portal de datos de la Instalación de Satélites de Alaska para imágenes de la Tierra con sensores remoto, con el fin de estimar los caudales máximos para los periodos de retorno de 2, 10, 25, 50 y 100 años bajo la modelación del HEC-HMS con los métodos de los Hidrograma unitarios de SCS, SNYDER y CLARK, el método de estimación por módulo de rendimiento que acoge la función de distribución log Pearson III y el método racional.

Palabras claves: caudales máximos, HEC-HMS, hidrograma unitario.

ABSTRACT

The water is essential for everybody on this planet. Hence, organizations around the world were established to ensure a proper management of water resources. However, the management by government organizations is insufficient, causing scarcity and hydrologic misinformation in a large part of the basins of the country. Such is the case of San Francisco – Cundinamarca. As a result, the mayor's office does not have a hydrological study of its main channel. Therefore, the principal objective of this document is to present the hydrological model of the micro-basin that caters to the people by using the HEC-HMS software, as well as the tools of Geographic Information System (GIS) and hydrological reports from the IDEAM station -Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies-, in addition to the digital elevation model of Vertex, data portal of the Alaska Satellite Installation for Earth images with remote sensors, in order to estimate the maximum flow rates for the return periods of 2, 10, 25, 50 and 100 years using the modeling of HEC-HMS with SCS, SNYDER and CLARK unit hydrograph methods, besides of used the estimate performance module that receive the function of distribution Lognormal.

Keywords: maximum flow, HEC-HMS, unit hydrograph.

INTRODUCCIÓN

Es un hecho, que las cuencas hidrográficas constituyen la base que sostiene la estabilidad social actual, aportando un recurso considerado no renovable y del cual depende la continuidad de la vida en el planeta, tal como se conoce. De allí la importancia del cuidado del recurso hídrico por lo que surge la necesidad de conocer a mayor profundidad parámetros como las características, el comportamiento y cuidados que a la comunidad tanto le ha costado y que no ha sabido apreciar particularmente a la población colombiana ocasionando pérdidas considerables a nivel económico, productivo y social.

Una de las poblaciones afectadas por esta problemática se encuentra al norte del departamento de Cundinamarca en el municipio de San Francisco donde se evidencia escasez del recurso agua debido posiblemente a su exceso de habitantes en temporada turística y a una insuficiencia en la oferta del cuerpo de agua que abastece al municipio, lo que lleva al caso en cuestión, en el proyecto de grado se efectuó una metodología que tuvo contemplado la obtención de un modelo digital de elevación (DEM) de resolución de 12.5 metros, el cual se usó para la delimitación de la cuenca hidrológica usando el software de Sistema de información geográfica ARCGIS, con esta delimitación se seleccionó la estación más cercana al área de influencia. A si mismo se desarrolló el procesamiento de los datos obtenidos de la estación Climatológica Sabaneta operada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, para rastrear datos atípicos y obtener datos de precipitación máxima de 24 horas.

Además de ello se realizó la identificación del tipo de suelo y cobertura vegetal que compone el área en estudio, con el fin de obtener la curva número, crear las curvas IDF sintéticas para diferentes tiempos de retorno, elaborar el hietograma por bloque alterno y el hietograma de precipitación neta e infiltración, permitiendo la elaboración de los hidrogramas unitarios con ayuda del Software de modelado Hidrológica HEC-HMS y por último la estimación del cálculo del caudal máximo mediante diferentes métodos.



1. GENERALIDADES

1.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Línea de Saneamiento de Comunidades (Aguas), avalada por la Universidad Católica de Colombia

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1 Antecedentes del problema

El municipio de San Francisco Cundinamarca en la actualidad no cuenta con estudios hidrológicos que puedan aportar herramientas para la adecuada gestión del recurso agua, así como de herramientas para la gestión en la época de invierno y prevenir desbordes e inundaciones por el río cañas, así como en la época de verano se pueda prevenir escasez del recurso hídrico. Es necesario mencionar que el río cañas cruza gran parte del territorio del municipio.

Según el Estudio Nacional de Agua, “*de no tomarse medidas de conservación y manejo adecuadas, para 2015 y 2025, respectivamente el 66% y el 69% de los colombianos podrían estar en riesgo alto de desabastecimiento en condiciones hidrológicas secas.*” (IDEAM, 2014, pág. 38)

1.2.2 Pregunta de investigación

¿Cuál es el rango de los valores de caudales máximos de la subcuenca hidrográfica hasta el municipio San Francisco, Cundinamarca; a partir de la modelación HEC-HMS y el método de estimación por rendimiento de área?

1.3 JUSTIFICACIÓN

La planeación adecuada del recurso hídrico debe ser considerada prioridad para el país así como para las instituciones educativas, desafortunadamente a lo largo de los años las actividades antrópicas han afectado este recurso debido a esto las consecuencias de estas prácticas y a la planeación y manejo inadecuado han sido más evidentes durante los últimos tiempos, en donde zonas en las que las comunidades contaban con disposición del recurso en este momento presentan problemas de desabastecimiento o carencia de infraestructura adecuada para tal fin.

De acuerdo a lo anterior es necesario desarrollar una modelación hidrológica de la subcuenca que rodea el casco urbano del municipio, debido a que la falta de estos estudios causa una escasez de herramientas a las autoridades municipales para que generen estrategias frente a fenómenos de inundación o escasez del recurso hídrico.

Así como el desarrollo del presente trabajo de grado nos ofrece herramientas y experiencia en dicha modelación del mismo modo permite desarrollar competencias para futuros proyectos en la vida laboral.

En el municipio de San Francisco se han presentado diferentes fenómenos de inundación causados en los niveles de precipitación y aumento de los caudales del río Cañas y sus cuerpos de agua aportantes, un claro ejemplo en Noviembre 30 de 2008, se presentó *“inundación, afectación a 25 personas, 5 familias, 2 Hectáreas, perdida de cultivos, la fecha de recibo 02 de diciembre de 2008 no es atendida la emergencia, reporta el CREPAD.”* (Bentacourt Reyes & Torres Vidal, pág. 134)

Estructuras afectadas por los problemas de inundación generando la *“socavación por río cañas - puente colgante afectado inhabilitación del puente.”* (Rocha Aldana, 2017, pág. 95), esta socavación se presentó en la segunda temporada de lluvias del año 2016, en el cual se desbordo la quebrada Arrayanes, quebrada aportante del río Cañas. (Rocha Aldana, 2017, pág. 97)

Para finalizar en Abril 16 de 2012, se presentó problemas de inundación, a esta se le desarrollo *“..., seguimiento y control a la emergencia tuvo tramite y fue atendido y apoyado por el departamento de Cundinamarca, Inundación por rebosamiento de alcantarillas en el barrio San Francisco del municipio San Francisco de Sales, en el perímetro Urbano, causando pánico y emergencia sanitaria, atiende el CLOPAD, Bomberos y Policía. Reporta CREPAD Cundinamarca.”* (Bentacourt Reyes & Torres Vidal, pág. 134)



1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Determinar el rango de los cuales máximos a partir de la modelación HEC-HMS y el método de estimación por rendimiento de área; de la subcuenca hidrográfica hasta el municipio San Francisco, Cundinamarca.

1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar la caracterización morfométrica de la subcuenca hidrológica del río Cañas.
- Elaborar la curva de intensidad, duración-frecuencia (IDF) de la subcuenca del río Cañas.
- Calcular los caudales máximos de la cuenca hasta la estación limnimetrica Villeta a partir de la herramienta HidroEsta.
- Modelar y calibrar las cuenca hasta la estación limnimetrica Villeta usando la modelación HEC-HMS.
- Modelar la subcuenca hasta el municipio San Francisco, utilizando los parámetros de calibración obtenidos en la modelación de la cuenca hasta la estación limnimetrica Villeta.
- Determinar los caudales máximos la subcuenca hasta el municipio San Francisco, utilizando el método de estimación por rendimiento de área

1.5 CRONOGRAMA

A continuación se plasma el cronograma que se desarrolló en el cálculo de los caudales máximos de la subcuenca hasta el municipio de San Francisco, Cundinamarca.

Tabla 1. Fases del desarrollo de la investigación

FASE	ACTIVIDAD
1	Recolección de información
2	Procesamiento de datos
3	Modelación de la cuenca
4	Elaboración del documento final
5	Entrega del documento final

Fuente: Autores

Tabla 2. Cronograma de desarrollo del proyecto

FASES/	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY
Recolección de información						
Procesamiento de datos						
Modelación de la cuenca						
Elaboración del documento final						
Entrega del documento final						

Fuente: Autores

2. MARCOS DE REFERENCIA

2.1 MARCO CONCEPTUAL

2.1.1 Área de la cuenca (A)

Definida como la superficie de la cuenca delimitada por la divisoria topográfica, se considera como el área que contribuye con la escorrentía superficial, la cual afecta las crecidas, flujo mínimo y la corriente media en diferentes modos. (CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA -CAR-, 2002)

2.1.2 Cuenca hidrográfica

La Cuenca Hidrográfica se define como la unidad territorial natural que capta la precipitación, y es por donde transita el escurrimiento hasta un punto de salida en el cauce principal o sea es un área delimitada por una divisoria topográfica denominada parte-agua que drena a un cauce común (Gregersen, Brooks, Dixon, & Hamilton, 1985)

2.1.3 Propiedades morfométricas de una cuenca

La morfometría particular de cada cuenca hidrográfica es proporcional con la posibilidad de cosecha hídrica, ante eventos climáticos, y con la generación de una respuesta a los mismos, como ser la escorrentía superficial, expresada en términos de caudales, la incidencia en el transporte de sedimentos y nutrientes a lo largo de los ecosistemas que la integran. (Gaspari a, y otros, 2012)

Las características físicas de una cuenca tienen una relación estrecha con el comportamiento de los caudales que transitan por ella. Los parámetros Morfométricos de una cuenca integran un conjunto de estimaciones realizadas, en la mayoría de los casos, al iniciar un estudio hidrológico, con fines de aprovechamiento o control. Según (Gaspari a, y otros, 2012). El análisis morfométrico es el estudio de un conjunto de variables lineales, de superficie, de relieve y drenaje; que permite conocer las características físicas de una cuenca, lo cual permite realizar comparaciones entre varias cuencas, así como ayuda a la interpretación de la funcionalidad hidrológica y en la definición de las estrategias para la formulación de su manejo.

2.1.4 Curvas IDF

Las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) constituyen la base climatológica para la estimación de los caudales de diseño. Estas curvas sintetizan las características de los eventos extremos máximos de precipitación de una determinada zona y definen la intensidad media de lluvia para diferentes duraciones de eventos de precipitación con periodos de retorno específicos. Es necesario verificar la existencia de curvas IDF para la localidad. Si existen, éstas deben ser analizadas para establecer su validez y confiabilidad para su aplicación al proyecto. Si no existen, es necesario obtenerlas a partir de información existente de lluvias.



La obtención de las curvas IDF debe realizarse con información pluviográfica de estaciones ubicadas en la localidad, derivando las curvas de frecuencia correspondientes mediante análisis puntuales de frecuencia de eventos extremos máximos. La distribución de probabilidad de Gumbel se recomienda para estos análisis, aunque otras también pueden ser ajustadas. Eventualmente, es posible hacer análisis regionales de frecuencia en caso de disponer de más de una estación pluviográfica. Si no existe información en la población, debe recurrirse a estaciones localizadas en la zona lo más cercanas a la población. Si esto no permite derivar curvas IDF aceptables para el proyecto, deben ajustarse curvas IDF por métodos sintéticos, preferencialmente derivados con información pluviográfica colombiana. De acuerdo con el nivel de complejidad del sistema, la manera mínima permitida de obtención de las curvas IDF se define en la siguiente tabla.

Tabla 3. Lineamientos curvas IDF

NIVEL DE COMPLEJIDAD DEL SISTEMA	DE	OBTENCIÓN MÍNIMA DE CURVAS IDF
Bajo y medio		Sintética
Medio alto		Información pluviografica regional
Alto		Información pluviograficas local

Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, INVIAS, 2009

2.1.5 Modelación hidrológica

“La modelación hidrológica es una herramienta de gran importancia para el estudio de avenidas que se ha extendido por todo el mundo, fundamentalmente en países desarrollados. En la actualidad, con el empleo de estos modelos, se realiza el análisis y la prevención de las inundaciones; además, es posible manejar hipótesis suficientemente realistas o previsibles que ofrezcan un cierto grado de confianza para la toma de decisiones, ya sea en la ordenación del territorio en torno a los ríos o para exigir criterios de diseño de obras e infraestructuras capaces de soportar y funcionar adecuadamente en situaciones de emergencia. Incluso, alertar a los servicios de protección civil y establecer protocolos de actuación ante posibles situaciones de peligro por intensas lluvias.” (IDEAM, s.f.)

2.1.6 Hidrograma unitario

El hidrograma unitario muestra el cambio en el caudal, o flujo, por unidad de escurrimiento o escorrentía a lo largo del tiempo; en otras palabras, muestra cómo la adición de una unidad de escurrimiento influirá en el caudal de un río con el tiempo. El hidrograma unitario es una herramienta útil en el proceso de predecir el impacto de la precipitación sobre el caudal.

2.1.7 Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)

“Está diseñado para simular los procesos hidrológicos completos de los sistemas de cuencas dendríticas. El software incluye muchos procedimientos tradicionales de análisis hidrológico, como la infiltración de eventos, los hidrogramas unitarios y el enrutamiento

hidrológico. HEC-HMS también incluye los procedimientos necesarios para la simulación continua, incluida la evapotranspiración, el deshielo y la contabilidad de la humedad del suelo. También se proporcionan capacidades avanzadas para la simulación de escorrentía en cuadrícula utilizando la transformación de escorrentía cuasi-distribuida lineal (ModClark). Se proporcionan herramientas de análisis complementarias para la optimización del modelo, el flujo de flujo de predicción, la reducción del área de profundidad, la evaluación de la incertidumbre del modelo, la erosión y el transporte de sedimentos, y la calidad del agua.” (iAgua, 2016)

2.1.8 Metodologías para el cálculo de caudales máximos

Existen metodologías empíricas y algunas con antigüedad para estimar el cálculo de caudales de crecientes máximos instantáneos anuales de crecientes dentro de estas se encuentran las siguientes:

Tabla 4. Metodologías para el cálculo de caudales máximos

MÉTODOS	PARÁMETROS	Limitaciones
1. DATOS HISTÓRICOS DE CAUDAL	Estación Hidrométrica	Estación Hidrométrica
2. TRANSPOSICIÓN DE DATOS DE CAUDAL	$Q_{sp} = Q_{EH} \times (A_{sp}/A_{EH})^x$	Estación Hidrométrica, área de cuencas
3. ANÁLISIS REGIONAL DE CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS ANUALES	$Q_{2.33}=f(A)$	Varias Estaciones Hidrométrica Con Caudales Máx. Históricos
4. DIRECTO	$Q=(1/n)*(AR)^{(2/3)}*S^{(1/2)}$	Condiciones De Campo (Mannig)
5. RACIONAL	$Q=CIA/360$	Áreas Menores Y No Considera Perdidas
6. HIDROGRAMA UNITARIO		
6.1 HIDROGRAMA UNITARIO SCS	$Q_p = CA/tp$	Calibración
6.2 HIDROGRAMA UNITARIO SNYDER	$Q_p = 0,275 C_p A/tp$	Calibración
6.3 HIDROGRAMA UNITARIO UNIMORF	$U(t) = 612.9 (1/Ta)^{7.41} \times t^{6,41} \times e^{-(5.41/Ta)t}$	Calibración Y Morfometría De La Cuenca

Fuente: Autores

2.2 MARCO GEOGRÁFICO

El municipio de San Francisco hace parte del departamento de Cundinamarca y pertenece a la provincia del Gualivá, esta distanciado de Bogotá a 55 km. Su superficie terrestre es de 118 km²; San Francisco limita al Norte con los Municipios de La Vega y Supatá, al Oriente con Subachoque y El Rosal, al Sur con Facatativá y al occidente con La Vega.

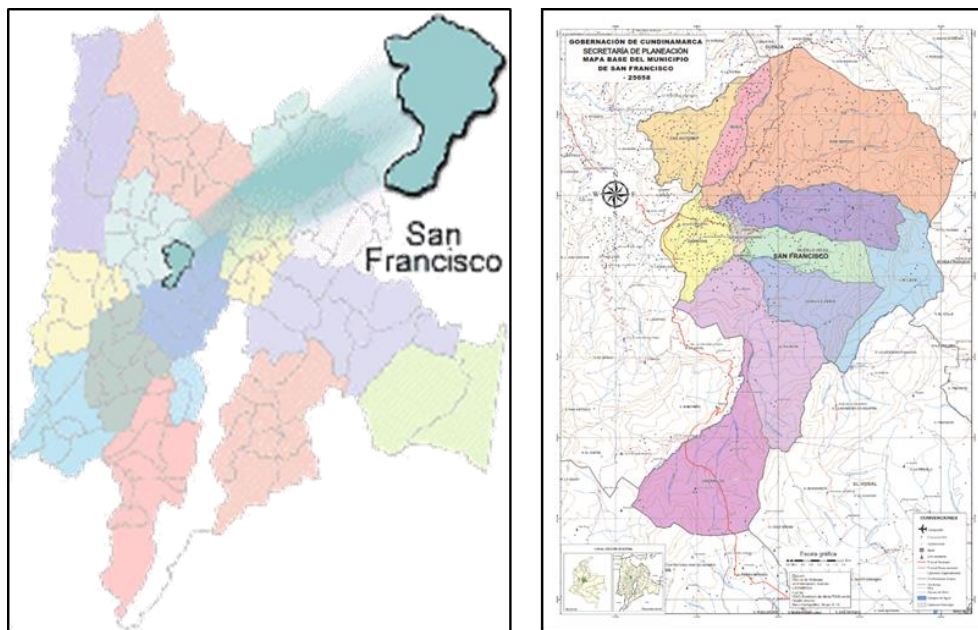


Imagen 1. Ubicación del municipio de San Francisco en el departamento Cundinamarca. Fuente: (Alcaldía de San Francisco de Sales - Cundinamarca, 2012). Mapa político del municipio de San Francisco, Cundinamarca. (Alcaldía de San Francisco de Sales - Cundinamarca, 2013)

2.3 MARCO DEMOGRÁFICO

La cabecera del municipio de San Francisco cuenta con 2851 habitantes, de acuerdo a los resultados consolidados en el Censo del 2005, realizado por el DANE (DANE, 2005, pág. 43), la población total en este municipio es 8187 habitantes de los cuales el 65% de la población vive en la zona rural y el 35% corresponde a la población de la cabecera municipal. Así como el 50.4% corresponde a hombres y el 49.6% a mujeres.

2.4 ESTADO DEL ARTE

Con el fin de conocer las investigaciones que han sido desarrolladas acerca de la estimación de caudales máximos y caracterización morfométrica de cuencas en un ámbito nacional e internacional, se realizó una búsqueda en diferentes bases de datos y en la web con el fin de recopilar la suficiente información teórica y metodológica planteada para abordar este tema.

A continuación, se sintetizan los aportes más importantes de algunas investigaciones que se encaminan al tema principal de este trabajo.

Boris Eduardo Carías Juárez, Egly Tatiana Chacón Novoa y Miguel Ángel Márquez, en su trabajo de grado: **Validación de metodologías para el cálculo de caudales máximos**

en El Salvador (CARÍAS JUÁREZ, CHACÓN NOVOA, & MARTÍNEZ MÁRQUEZ, 2004), calculan los tiempos de concentración validando la metodología de estos y calculan caudales máximos por las metodologías hidrometeorológicas de Formula Racional, Soil Conversation Service, Hidrogramas Unitarios Complejos e Hidrogramas sintéticos, realizando a su vez un estudio estadístico de los caudales máximos determinando la función de distribución que mayor se ajuste, comparan los datos con metodologías puntuales y regionales y validan las metodologías determinando los factores de ajuste correspondiente.

Luego de la obtención de resultados utilizadas las metodologías propuestas para determinar tiempos de concentración (como la Kirpich, Agencia Federal de Aviación, Bureau of Reclamation y California), concluyeron que es posible utilizar cualquiera de las metodologías utilizadas, pues los resultados obtenidos se encuentran dentro de rangos preestablecidos para las regiones hidrográficas estudiadas (1-3 m/s). Para la determinación de caudales máximos, el Método Racional subestima los valores de caudales máximos para las áreas analizadas en la investigación, la metodología del hidrograma Sintético de Snyder, determina muy bien los caudales máximos siempre se conozcan en primera instancia detalladamente las características físicas de la cuenca, las metodologías HS triangular y SCS arrojan valores similares entre sí, al igual que los caudales máximos, pero con volúmenes de escurrimiento diferentes. La ventaja de un método estadístico puntual es que los caudales máximos se calculan en base a eventos reales y la desventaja es que, a registros largos de caudales, la extrapolación de caudales para periodos de retorno mayores a las longitudes de registro debe tomarse con criterio y reversa para ser utilizados y por último la función de probabilidad que mejor se ajustó a los datos de las estaciones tomadas para el estudio fue la distribución Log-Normal de dos parámetros.

Manuel A. Benson en su estudio: **Uniform Flood-Frequency Estimating Methods For Federal Agencies** (BENSON , 1968). Un grupo interinstitucional federal ha estudiado los métodos más utilizados de análisis de frecuencia de inundación y ha comparado los resultados de aplicar estos métodos a un grupo seleccionado de sitios representativos de registros largos en diferentes partes del país. Con base en estas comparaciones y en otras consideraciones, se recomienda que todas las agencias del gobierno adopten un procedimiento uniforme para el análisis de frecuencia de inundación en los sitios donde los registros están disponibles. La distribución logarítmica tipo Pearson III se ha seleccionado como el método base.

José David Gamba Mejía, José Gabriel González Hernández en su trabajo de grado: **Curvas De Rendimiento De Caudales Máximos Instantáneos Asociados A Diferentes Periodos De Retorno En Colombia, Caso De Estudio Río Magdalena** (GAMBA MEJÍA & GONZÁLEZ HERNÁNDEZ, 2015). En este estudio se realizó la construcción de las curvas de rendimiento hídrico para caudales máximos instantáneos y la determinación de la distribución que mejor representa los mismos para facilitar la aplicación de estos estudios en actividades de ingeniería hidrológica e hidráulica en el río Magdalena, con este fin se proporcionó parámetros de diseño y prevención a la hora de realizar construcciones dentro de la cuenca, y a su vez, utilizarse como criterio hidrológico para estimar caudales en aquellos sitios donde no se posea información de los mismos. Se concluyó en base al análisis realizado, la distribución de probabilidad que

mejor se ajusta a la cuenca del Magdalena es la distribución hidrológica GEV (método de momentos ponderados) debido a que fue la que mejor asimilo el comportamiento de los datos con un valor promedio de 2.43 y una desviación estándar de 1.941, cabe resaltar que se pueden utilizar las distribuciones de probabilidad PEARSON TIPO III (Método de momentos) y LOG-PEARSON TIPO (Método Sam) cuyas desviaciones estándar fueron 2.187 y 2.152 respectivamente, bastante cercanas a la distribución probabilística que mejor se ajustó.

Sazali Osman, Ismail Abustan, en su investigación: **Estimating the Clark Instantaneous Unit Hydrograph Parameters for Selected Gauged Catchments in The West Coast of Peninsular Malaysia** (Osman & Abustan). En este estudio, los hidrogramas unitarios instantáneos de Clark se utilizan para predecir hidrogramas de inundación de diseño para las cuencas seleccionadas en Pulau Pinang, Perak y Selangor. Los eventos de lluvia e inundación registrados se utilizan para calibrar los parámetros del modelo hidrográfico de la unidad Clark, el tiempo de concentración, T_c y el coeficiente de almacenamiento, R . La eficacia del modelo para los eventos calibrados se midió mediante el método de Nash y Sutcliffe. La eficiencia para las diez cuencas es mayor que 0.91, lo que muestra un buen rendimiento del modelo para el calibrado.

Ubaldo Andrés Díaz Arias, Daniel Felipe Guacaneme Prieto, Francy Lorena Alonso Nore en su trabajo de grado: **Estimación De Caudales Máximos Para El Sector Hidrológico De La Quebrada El Diamante, Mediante Modelación Con HEC-HMS** (DÍAZ ARIAS, GUACANEME PRIETO, & ALONSO NORE). Se efectuó la modelación hidrológica de la quebrada el Diamante para efectos de estimar el caudal máximo mediante HEC-HMS, donde la metodología empleada para realizar el proyecto de grado consistió la obtención de un DEM de 10 metros, con el cual se obtuvo la delimitación y los parámetros de la cuenca utilizando el software ArcGIS, posteriormente se realizó la selección de las estaciones de influencia según los polígonos de Thiessen. Posteriormente, a los datos de cada estación se le realizó la búsqueda de datos atípicos y se encontró la precipitación máxima en 24 horas para los últimos 10 años disponibles. Luego, se identificó la cobertura vegetal y el tipo de suelo presente en la cuenca, para determinar el número de curva, además se crearon las curvas IDF sintéticas por el método regionalizado para Colombia, con las intensidades para un tiempo de retorno de 100 años, se elaboró el hidrograma de bloque alterno, el hietograma de precipitación neta e infiltración, los hidrogramas de caudales con HEC-HMS y de forma manual, además de hallar el caudal máximo por el método racional. Como resultado de este estudio se obtuvo que: El método del hidrograma unitario triangular (utilizado para realizar el proceso de forma manual) y el hidrograma unitario curvilíneo (utilizado por el software HEC-HMS) arrojan resultados similares. Con el análisis de método racional, se determina que el caudal máximo encontrado, es mayor que los otros caudales máximos encontrados con los otros medios evaluados (manual y HEC HMS). Lo anterior porque no se cumple con la restricción del área establecida para el método racional de que el área de la cuenca debe ser menor a 80Ha.

3. FUNDAMENTO METODOLÓGICO

3.1 METODOLOGÍA

A continuación, se plasma el proceso metodológico desarrollado en el proyecto de grado.

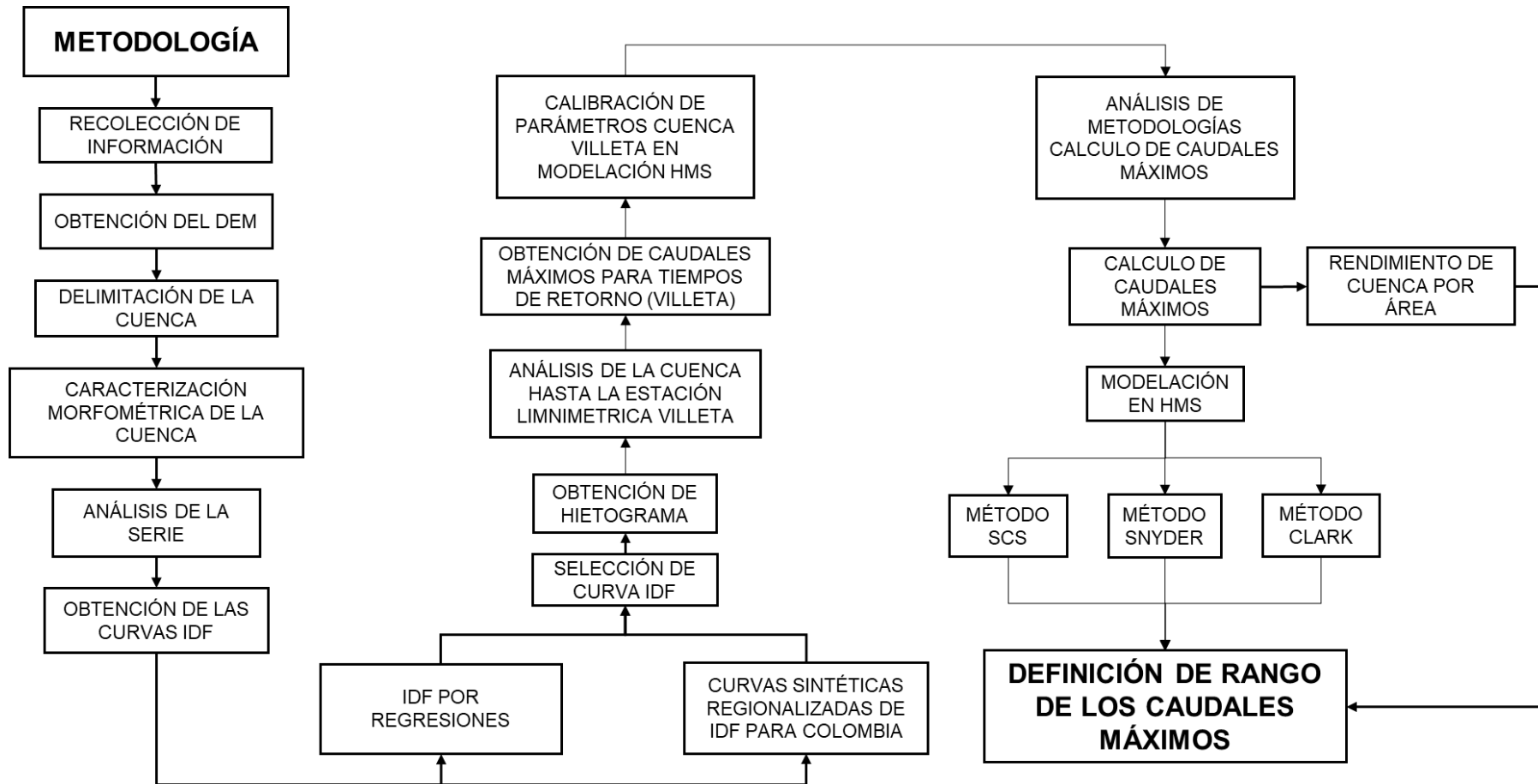


Imagen 2. Proceso metodológico del proyecto de grado. Fuente: Autores

3.1.1 Recolección de información

Como primer paso se efectuó la solicitud de la información de la estación meteorológica del IDEAM, registrada con nombre SABANETA ubicada en el municipio San Francisco Cundinamarca. Esta se recibió días después con registros históricos de los años 1986 hasta el 2016, siendo varios años con información vacía.

Por otra parte, se solicitó información en la Alcaldía del Municipio de San Francisco, dicha información objeto fue el Esquema de Ordenamiento Territorial EOT.

Sumado a lo anterior se realizó una revisión de información de estudios hidrológicos e hidráulicos de la cuenca, desafortunadamente no se cuenta con este tipo de información, sin embargo, se obtuvo una tesis de grado cuyo objeto fue la formulación del plan municipal de gestión del riesgo de desastres municipio de San Francisco Cundinamarca.

3.1.2 Obtención del DEM

El primer paso para la obtención del DEM en el satélite ALOS PALSAR en la página web del ALASKA SATELLITE FACILITY se debe crear una cuenta y por tanto iniciar sección, en el siguiente paso se debe seleccionar el área objeto de estudio con un clic derecho sobre el área y se selecciona el área de tal manera que el polígono cubra toda el área. Ver Imagen 3

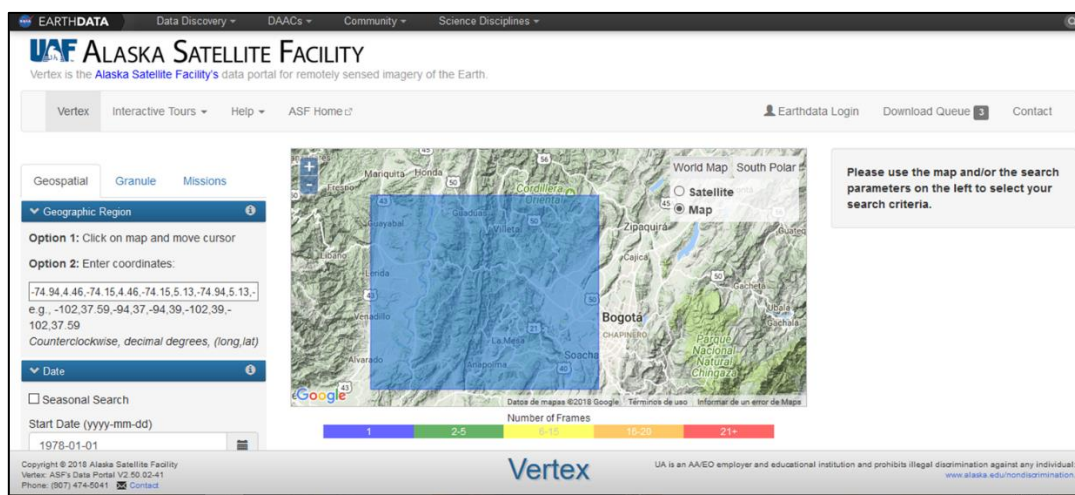


Imagen 3. Selección del área objeto de estudio.

Una vez seleccionada el área, se debe bajar con el cursor hasta que se visualice Dataset, en la cual se debe seleccionar el satélite ALOS PALSAR, para finalmente darle clic en el botón Search. La página web inicia la búsqueda de imágenes satelitales del área seleccionada.

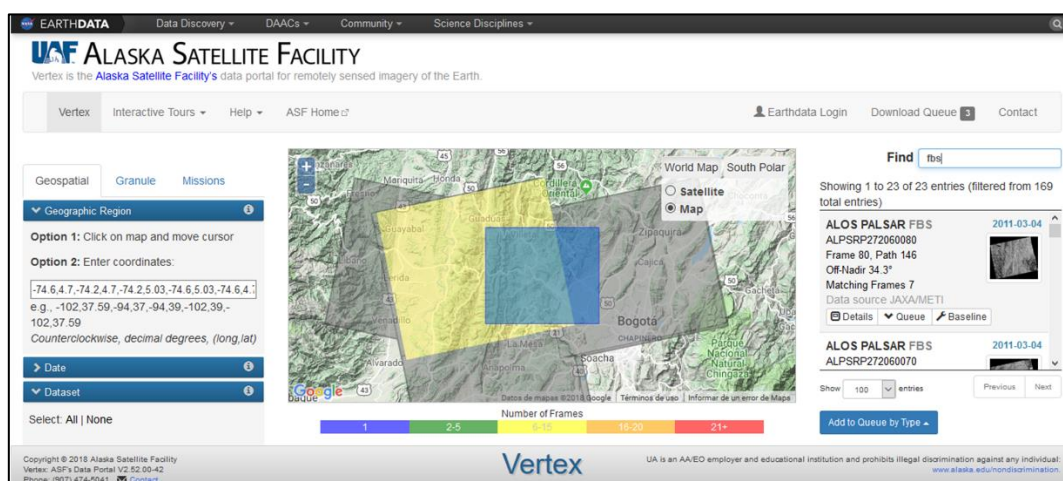


Imagen 4. Selección de DEM resultante de la búsqueda.

Una vez este encuentre imágenes es necesario redactar en el buscador FIND las letras FBS letras que pertenecen a los DEM (Imagen 5). A continuación se debe seleccionar el DEM, se da clic y se despliega una ventana nueva, en la cual salen diferentes opciones, finalmente se selecciona la opción Hi-Res Terrain Corrected e instantaneamente se inicia la descarga del DEM.

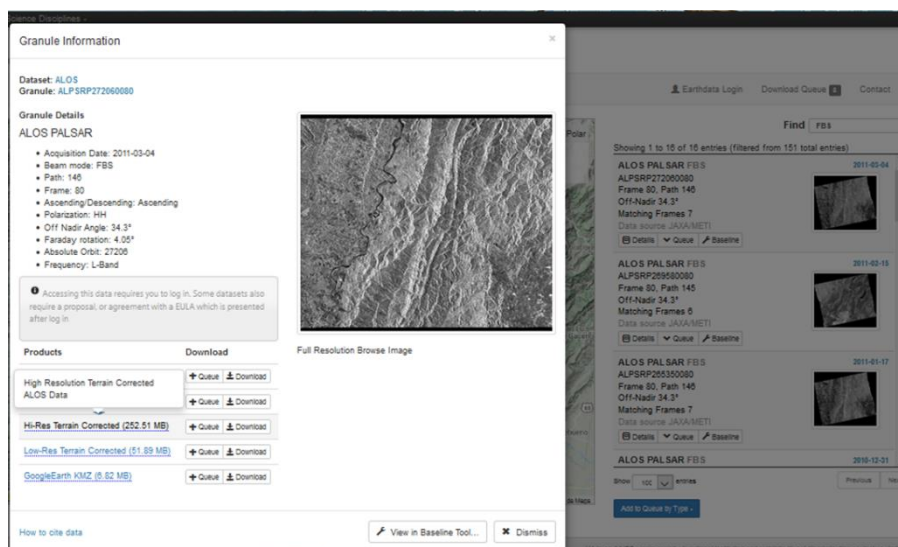


Imagen 5. Descarga del DEM, del satélite ALOS PALSAR

En la selección del DEM se evidencia si este cubre o no el área objeto de estudio, sino es necesario seleccionar los DEM que cubran esta área y finalmente en el programa ArcGIS se efectúa la unión de estos DEM.

3.1.3 Delimitación de la cuenca

Para la delimitación de la cuenca, se debe seguir el proceso en el programa ArcGIS y WMS presentando resultados similares, se efectuó todos los pasos necesarios para obtener la cuenca objeto de estudio. Con el punto de cierre seleccionado.

3.1.4 Caracterización morfométrica de la cuenca

Una vez obtenido la cuenca en ARCGIS se efectuó la obtención y el cálculo de los parámetros morfométricos de la cuenca, tales como área de la cuenca, perímetro de la cuenca, pendiente de la cuenca, longitud de la cuenca y longitud de corriente.

Sumado a lo anterior se obtuvo los parámetros relacionados con el drenaje de la cuenca, entre los cuales se obtuvo el orden de la cuenca, la densidad de corrientes, densidad de drenaje y la longitud del río principal.

Así mismo se calculó los parámetros de factor forma, coeficiente de compacidad e índice de asimetría los cuales corresponde a la forma de la cuenca. Igualmente se obtuvo la pendiente del cauce principal, la elevación de la cuenca y la orientación de la cuenca respecto al cauce principal.

3.1.5 Análisis de la serie

Los datos base para el cálculo de caudales máximos de la subcuenca se obtuvieron de la estación meteorológica con código del IDEAM 23065100, nombrada SABANETA, la cual se instaló el 15 de agosto de 1986, ubicada en el municipio de San Francisco a una altitud de 2475 msnm.

En las bases de datos de IDEAM se solicitaron datos históricos de precipitación máxima diaria desde el año de 1987 hasta el año 2017. Una vez recibido los datos por parte del IDEAM se efectuó el proceso de orden y análisis de veracidad de los datos por los métodos Chi Cuadrado, Kolmogorov y Water Resources Council.

3.1.6 Obtención de las curvas IDF

Para la obtención de las curvas IDF se desarrolló dos métodos, el primer método fundamentado en las curvas sintéticas regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia. Y el segundo método fundamentado en regresiones.

- **Curvas sintéticas regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia**

En el método de la obtención de las curvas sintéticas regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia, el autor dividió el país en cinco (5) zonas, lo que le permitió analizar estaciones independientemente de cada una de las zonas divididas, enfocándose en fenómenos meteorológicos similares en estas estaciones.

Tal división se realizó de la siguiente manera, Región Andina, Región del Caribe, Región del Pacífico, Región de la Orinoquia y Región Amazonia. (Diazgranados, 1998). Paso seguido, Diazgranados plantea para Colombia una ecuación general, basándose en las propuestas por Bernard (1932), Bell (1969), Chen (1983) y Kothyari y Garde (1992) ecuaciones similares resultantes de estudios en diferentes lugares. (Diazgranados, 1998)

La ecuación resultante del análisis estadístico y probabilísticos de las ecuaciones

mencionada, así como de la información, Diazgranados obtuvo la siguiente formula:

$$i \left(\frac{mm}{hr} \right) = \frac{a * Tr^b * M^d}{(t_c/60)}$$

Donde:

i: Intensidad de precipitación, milímetros por hora (mm/hr)

Tr: Periodo de retorno en años

M: Precipitación máxima promedio anual en 24 horas a nivel multianual

t_c: Duración de la lluvia, minutos (min)

a, b, c, d: Parámetros de ajusta de la regresión

Los valores resultantes de los parámetros se presentan en la siguiente tabla, para cada una de las regiones:

Tabla 5. Parámetros de cálculo

REGIÓN	a	b	c	d
Andina	0.94	0.18	0.66	0.83
Caribe	24.85	0.22	0.5	0.1
Pacifico	13.92	0.19	0.58	0.2
Orinoquia	5.53	0.17	0.63	0.42

Fuente: Diazgranados (Diazgranados, 1998)

Como se menciona anteriormente el Profesor Mario Díaz Granados obtiene los parámetros de acuerdo a una división regional del país, y analizando estaciones meteorológicas. A lo cual se concluye que los datos obtenidos presentan valores para regiones con áreas muy grandes con respecto al área de la subcuenca, por tal razón se obtiene la curva IDF para la subcuenca, sin embargo, los valores de esta no son tenidos en cuenta para la obtención del Hietograma

- **Curvas por regresiones matemáticas**

Una vez ordenados los datos, se obtuvo los máximos mensuales en 24 horas, paso seguido se calcula el máximo anual para cada uno de los años, de igual manera se obtuvo dato máximo de la serie de datos.

Luego se desarrolló el cálculo de las Precipitaciones Diarias Máximas Probables para distintas frecuencias, usando la distribución de probabilidades pluviométricas mediante Gumbel y el cálculo variable probabilísticas.

Adicionalmente, con los Coeficientes para las relaciones a la lluvia de duración 24 horas (D. F. Campos A., 1978), se encontró las precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración de retorno. Siguiendo el proceso del cálculo de las curvas IDF se efectuó Regresiones I-D-T para diferentes tiempos de retorno.

Paso siguiente se efectuó el cálculo del coeficiente de Regresión Cuenca y finalmente se calculó la intensidad de lluvia para cada uno de los tiempos de retorno y graficar los datos calculados.

3.1.7 Selección de la curva IDF

Una vez obtenido las dos curvas IDF por los métodos anteriormente descritos se efectuó la selección de la curva IDF más apta para la modelación y el cálculo de los caudales máximos de la cuenca.

Como se mencionó en el numeral de Curvas sintéticas regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia, los parámetros obtenidos corresponde a regiones con áreas significativamente muy grande a comparación de la subcuenca objeto de estudio, adicionalmente las Curvas por regresiones matemáticas analizan datos de la estación meteorológica ubicada en las subcuenca analizada razón por la cual se escoge este método.

3.1.8 Obtención de hietogramas

En la obtención de las Curvas IDF, se obtuvo datos de intensidades para diferentes tiempos; para la obtención de los hietogramas es necesario calcular datos de lluvia, los cuales se efectúa multiplicando el dato de la intensidad por el tiempo y este producto dividiendo en 60.

3.1.9 Análisis de la cuenca hasta la estación limnimetrica Villeta

En el análisis de la cuenca hasta la estación limnimetrica Villeta, como primer paso se efectuó la obtención del DEM, se siguió el procedimiento descrito en el numeral 3.1.2. Paso seguido se efectuó la delimitación de esta cuenca en el programa WMS. (Ver Imagen 9)

3.1.10 Obtención de caudales máximos para tiempos de retorno (Villeta)

En la obtención de los caudales máximos, se efectuó en el programa HidroEsta, para el cálculo de los caudales máximos de la cuenca hasta la estación Villeta, fue necesario usar los valores históricos de caudales máximos de esta estación; estos se obtuvieron de las bases de datos del IDEAM.

En el programa HidroEsta se efectuó el cálculo de los caudales máximos, usando la funciones estadísticas, finalmente se escogió los valores de la función Log Normal, debido a el índice de ajuste, tal cálculo se efectuó para diferentes tiempos de retorno.

3.1.11 Calibración de parámetros cuenca Villeta en modelación HMS

Una vez obtenidos los valores de los caudales máximos de la cuenca hasta la estación limnimetrica Villeta, para diferentes tiempos de retorno, se efectuó la modelación en el programa HMS.

En esta modelación en el programa HEC-HMS, se efectuó el cálculo de caudales máximos por tres métodos de este programa (SCS; Snyder y Clark), esta se finalizó en el instante en que los resultados de la modelación presentaron valores similares a los

obtenidos en el programa HidroEsta.

3.1.12 Análisis de metodologías cálculo de caudales máximos

Antes de iniciar la modelación de la Subcuenca hasta el municipio San Francisco, se efectuó el análisis y comparación de metodologías para el cálculo de los caudales máximos en una cuenca (Ver numeral 2.1.8).

Sumado a lo anterior en el numeral 2.1.8, se efectuó el análisis de la aplicabilidad o no de las metodologías para la modelación y cálculo de caudales máximos de la subcuenca hasta el municipio San Francisco.

3.1.13 Calibración del modelo

Como se mencionó anteriormente, la subcuenca hidrodépendiente del Municipio San Francisco, no cuenta con estudios previos, por lo cual se efectuó la calibración del modelo con datos de la cuenca de la estación limnométrica de Villeta.

Como primer paso se obtuvo el DEM del satélite ALOS PALSAR, se desarrolló la delimitación de esa cuenca en el programa WMS (Ver Imagen 9), en tal delimitación se realizó paralelamente la caracterización morfométrica de esta cuenca.

Una vez delimitada la cuenca de Villeta, se efectuó la obtención de los valores de caudales máximos mensuales, paso seguido se efectuó el cálculo del caudal máximo de estos valores para diferentes tiempos de retorno usando el proceso estadístico de Log Normal.

Una vez obtenido los valores de los caudales máximos para la cuenca Villeta, se efectuó la modelación en el programa HEC-HMS, con el fin de obtener valores de caudales máximos con diferentes métodos, esta modelación se efectuó hasta la obtención de valores de caudal máximo similares a los valores obtenidos en el proceso estadístico, para esto se calibraron los parámetros individuales de cada modelo. Una vez obtenido estos valores se enlistó los parámetros usados en la modelación de la cuenca Villeta.

3.1.14 Cálculo de caudales máximos

Una vez efectuada la modelación y obtención de valores de caudales máximos similares en la cuenca Villeta, se efectuó la modelación de la subcuenca de San Francisco usando los parámetros obtenidos en la modelación anterior de la cuenca. Desarrollando la modelación de los mismos métodos tales como SCS, SNYDER y CLARK.

Sumado a lo anterior se efectuó la obtención de caudales máximos usando el método de rendimiento, en el cual se tuvo en cuenta valores obtenidos en el programa HIDROESTA para diferentes tiempos de retorno y métodos. Una vez obtenidos estos datos, se dividieron por el valor del área de la cuenca, de este paso se obtuvo diferentes parámetros los cuales son multiplicados por valor de la cuenca, para finalmente obtener valores de caudales máximos, para diferentes tiempos de retorno.

3.1.15 Definición de rango de los caudales máximos

Una vez finalizada la modelación en el programa HEC-HMS por los tres métodos, para diferentes tiempos de retorno, y el desarrollo del método de rendimiento de área, se enlistaron los resultados obtenidos, por lo cual se efectuó la discriminación de los valores máximos y mínimos de los caudales, tales valores definieron el rango de los caudales máximos de la subcuenca hasta el municipio San Francisco.

4. RESULTADOS

4.1 DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

Como se mencionó anteriormente la delimitación se efectuó en el programa ARCGIS, en las siguientes imágenes se plasma tal proceso.

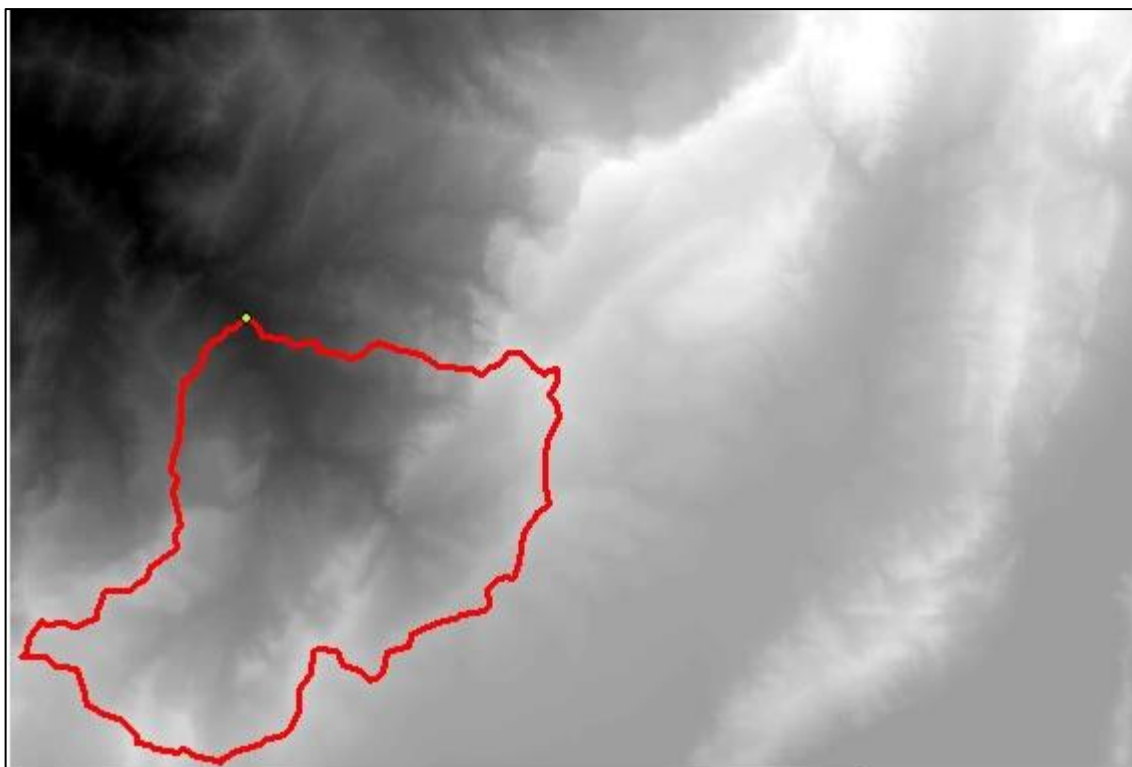


Imagen 6. Delimitación de la subcuenca hasta el municipio San Francisco, a partir del DEM obtenido del satélite ALOS PALSAR. Fuente: Autores.

4.2 PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA CUENCA

A continuación, se plasman los parámetros morfométricos de la cuenca objeto de estudio del presente trabajo de grado. En el Imagen 7 se observa el plano en donde se aprecia la delimitación de la cuenca y sus corrientes.

Tabla 6. Parámetros morfométricos de la cuenca.

NO	PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
1	Parámetros físicos de la forma de la cuenca		
1.1	Área de la cuenca.	Km ²	91.78
1.2	Perímetro de la cuenca	Km	46.79
1.3	Pendiente de la cuenca	%	2.21
1.4	Longitud de la cuenca	Km	15.569
1.5	Longitud de corrientes	km	44.5976
2	Parámetros relacionados con el drenaje de la cuenca		
2.1	Orden de drenaje.	Orden	7
2.2	Densidad de corrientes (Ds).	Ríos/Km ²	0.3
2.3	Densidad de drenajes (Dd).	Km/Km ²	0.49

NO	PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
2.4	Longitud del río principal	km	12.6214
3	Forma de la cuenca		
3.1	Factor de forma (Kf).	Adimensional	0.3786
3.2	Coefficiente de compacidad (Kc).	Adimensional	1.367
3.3	Índice de alargamiento (Ia).	Adimensional	2.63
3.4	Índice de asimetría (Ias)	Adimensional	1.624
4	Pendiente del cauce principal	%	33.47
5	Elevación de la cuenca		
5.1	Elevación mínima de la cuenca	msnm	1475
5.2	Elevación media de la cuenca	msnm	2458.76
5.3	Elevación máxima de la cuenca	msnm	3150
6	Orientación de la cuenca respecto al cauce principal.	Dirección	sur-oeste

Fuente: Autores

Los resultados del análisis morfométricos de la cuenca plasmados en la Tabla 6, siendo 91.78 km^2 área de la cuenca definiéndola como subcuenca de acuerdo a lo establecido en la guía básica de caracterización morfométricos de cuencas hidrográficas (Reyes Trujillo, Barroso, & Carvajal Escobar, 2010, pág. 31), 46.99 km en perímetro de la subcuenca, , así como presenta elevaciones que oscilan entre 1.475 msnm y 3.150 msnm, presentando en la parte alta un piso térmico frío y en la parte baja un piso térmico templado.

Siguiendo con este análisis es importante mencionar que esta cuenca tiene # corrientes, donde el río cañas (corriente principal) tiene una longitud de 12.62 km,

De igual manera la cuenca objeto del presente estudio se caracteriza por tener una densidad de corriente (Ds) 0.3 ríos/km y una densidad de drenajes (Dd) 0.49 siendo la cuenca pobremente drenada.

Sumado a lo anterior la forma de la cuenca tiende a ser alargada esto debido a que el factor forma de esta corresponde a 0.38, así mismo de acuerdo al índice de alargamiento corresponde a 2.63 lo que indica que es una cuenca alargada de este modo se deduce que los tiempos de viaje son largos. Lo que nos permite deducir que la cuenca tiene menor susceptibilidad a la formación de crecientes

De acuerdo a el índice de compacidad ($Kc=1.36$) la subcuenca es oval redonda-oval oblonga; así como el índice asimétrico ($Ias=1.626$) es interpretado que la subcuenca no es asimétrica dado lo anterior la cuenca se encuentra recargada hacia una de sus vertientes así mismo es imprescindible tener en cuenta que las planicies de inundación estén en la vertiente de mayor área. Por último, la orientación de esta cuenca respecto al río principal es Sur-Oeste, indicando que el sol se encuentra presente en la mayor parte del día.

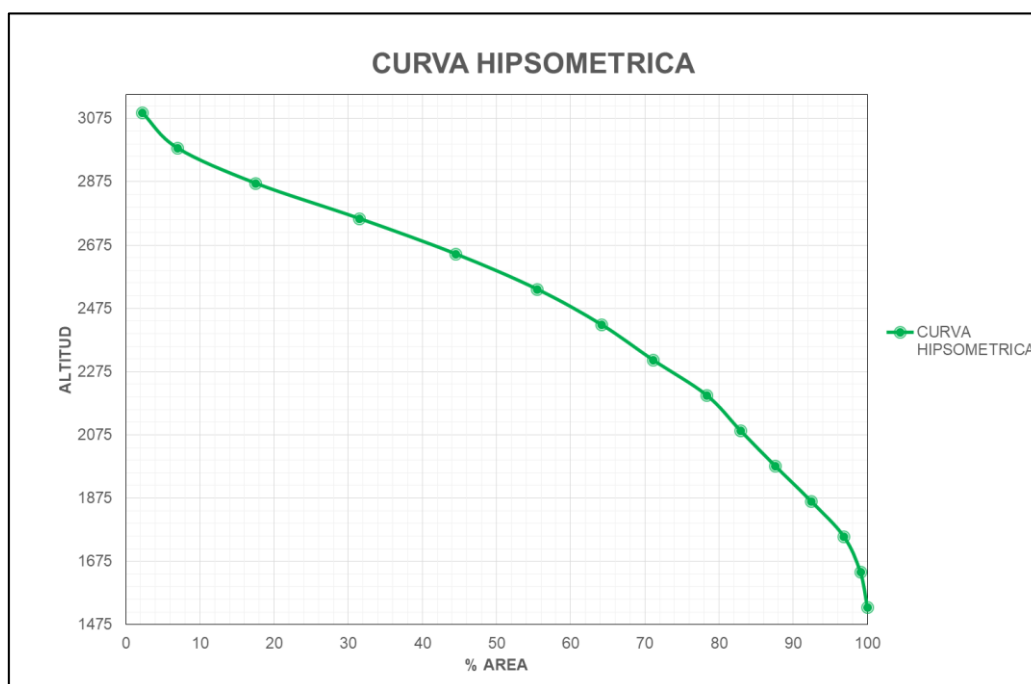
Por otro lado, de acuerdo a la Imagen 7 el tipo de red de drenaje tipo detrítico esto de acuerdo a la guía básica para la caracterización morfométricos de cuencas hidrográficas en la cual menciona “*los tributarios se unen a la corriente principal formando ángulos. Su presencia indica suelos homogéneos*” (Reyes Trujillo, Barroso, & Carvajal Escobar, 2010, pág. 62)

4.2.1 CURVA HIPSOMÉTRICA

Tabla 7. Valores de la Curva Hipsométrica.

PORCENTAJE DEL TOTAL (%)	PORCENTAJE SOBRE EL LIMITE INFERIOR (%)
0.965	100
2.229	99.035
4.415	96.806
4.849	92.391
4.680	87.542
4.540	82.862
7.264	78.322
6.943	71.058
8.655	64.116
10.994	55.460
12.952	44.466
14.010	31.515
10.564	17.505
4.742	6.941
2.199	2.199
100	

Fuente: Autores



Gráfica 1. Curva Hipsométrica. Fuente: Autores

De acuerdo a la Gráfica 1 se analiza que la cuenca se halla en una etapa joven tendiendo a presentar más procesos erosivos, confirmando esto los diferentes procesos erosivos presentados a lo largo del municipio de San Francisco.



Foto 1. Procesos erosivos en el municipio San Francisco, Cundinamarca. Fuente: ERIKA TATIANA ROCHA ALDANA (Rocha Aldana, 2017)

4.2.2 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

Para el cálculo del tiempo de concentración de la subcuenca de San Francisco se realizó una subdivisión de la cuenca en 4 subcuencas más con el fin de lograr un modelo más acertado a la realidad teniendo en cuenta los aportes de los tributarios al afluente principal. (Observar Imagen 7)

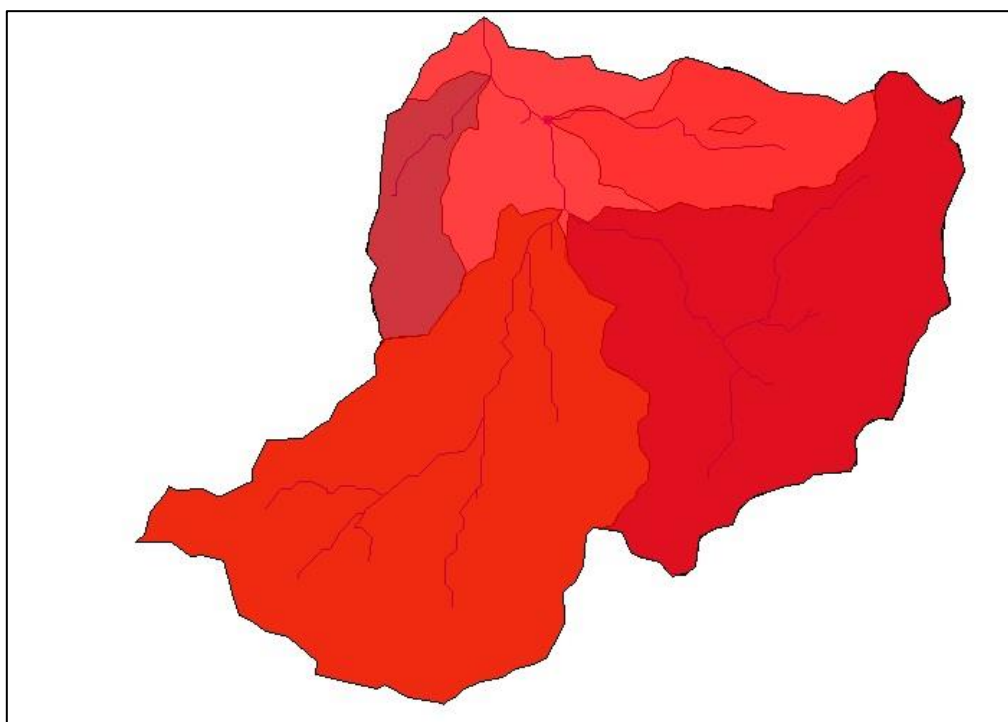


Imagen 7. Delimitación de la subcuenca hasta el municipio San Francisco. Fuente: Autores

Tabla 8. Datos de cada una de las subdivisiones de la subcuenca para la modelación del hidrograma unitario SCS.

	sub_1	sub_2	sub_3	sub_4
A(km2)	38.26636	30.4956	8.830399	5.51482
L(m)	8669	6530	5682	4803
L(KM)	8.669	6.53	5.682	4.803
S (%)	10.57	12.56	13.4	17.05
S(m/m)	0.1057	0.1256	0.134	0.1705
C	0.5064	0.5342	0.5248	0.519
CN	88.7692	89.4716	89.38723	91.75909
D	6.980132	6.231229	3.35309	2.649847
S(m/km)	105.7	125.6	134	170.5
H	0.916313	0.820168	0.761388	0.818912

Fuente: Autores

Para el cálculo de los tiempos de concentración de cada subcuenca se hallaron los parámetros morfométricos necesarios para aplicar todas las ecuaciones como se observa en la tabla 18.

En la siguiente tabla se plasma el cálculo del tiempo de concentración para la subcuenca de San Francisco, Cundinamarca, para la cual se aplicaron diferentes metodologías como se muestra en la tabla no.

Tabla 9. Cálculos obtenidos para la subcuenca.

METODOLOGÍA	TC (min)	PARÁMETROS
TC(KIRPICH)H	2.396	2
TC (TÉMEZ)H	5.016	2
TC (WILLIAMS)	4.952	4
TC (JOHNSTONE Y CROSS)	4.750	2
TC (GIANDOTTI)	4.166	3
TC (RANSER)	34.229	2
TC (VENTURA-HERAS)}	2.038	2
TC (V.T.CHOW)	5.385	2
TC (CUERPO USA)	4.682	2
TC (F.A.A.)	2.928	3
TC (SCS-RETARDO)	5.590	2

Fuente: Autores

Tabla 10. Cálculos obtenidos para cada una de las subdivisiones de la subcuenca.

subcuenca	TC (hr)	TR (Retardo)	TC (min)	TR (min)
SUB1	2.066499	0.723275	123.99	43.39649
SUB2	1.597608	0.559163	95.85648	33.54977
SUB3	1.405044	0.491766	84.30267	29.50593
SUB4	1.148427	0.40195	68.90564	24.11697
CUENCA	5.289245	1.851236	317.3547	111.0741

Fuente: Autores

4.3 ANÁLISIS DE LA SERIE

4.3.1 PRECIPITACIÓN

En el territorio del municipio de San Francisco Cundinamarca se puede evidenciar la presencia de una estación climatológica denominada Sabaneta, a continuación, se presenta la ubicación de esta estación y su información básica.

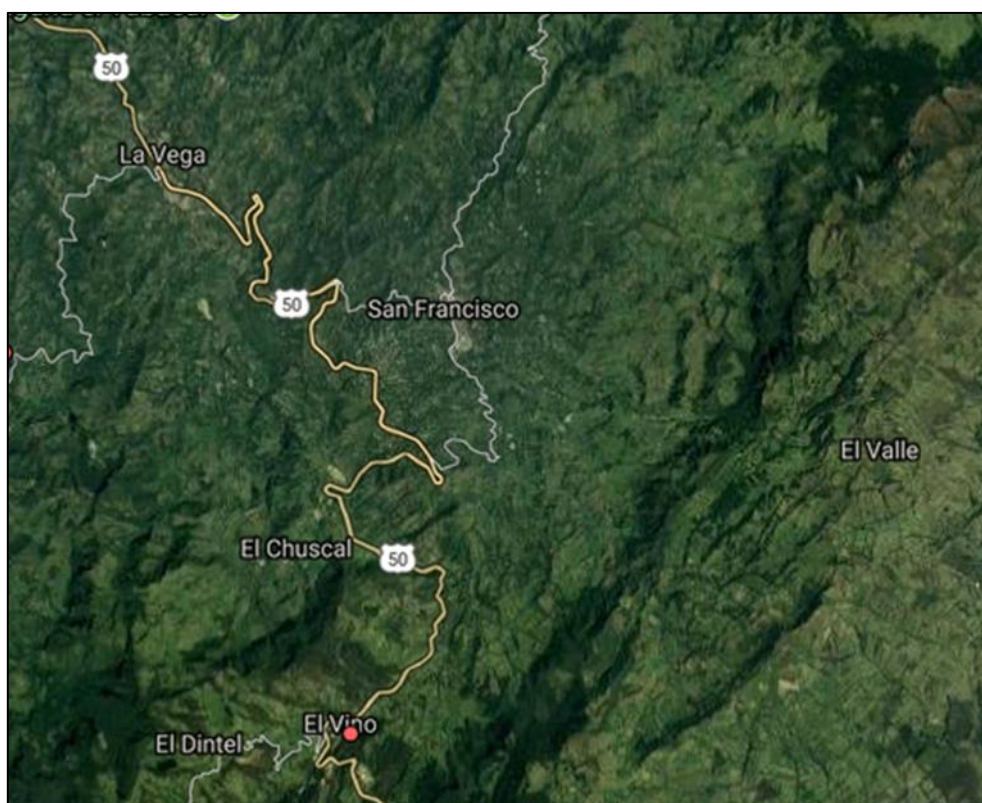


Imagen 8. Ubicación de estación climatológica Sabaneta, municipio San Francisco. Fuente: <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>

- Información básica estación IDEAM (IDEAM, 2018)

- **Código estación:** 23065100
- **Área operativa:** ÁREA OPERATIVA 11
- **Nombre:** SABANETA [23065100]
- **Tipo:** CONVENCIONAL
- **Clase:** METEOROLÓGICA
- **Categoría:** CLIMATOLÓGICA ORDINARIA
- **Estado:** ACTIVA
- **Departamento:** CUNDINAMARCA
- **Municipio:** SAN FRANCISCO
- **Latitud:** 4.90175
- **Longitud:** -74.307389
- **Altitud:** 2475
- **Corriente:** NEGRO
- **Fecha de instalación:** 15/08/1986

4.3.2 DATOS DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA MULTIANUAL

Para el análisis correcto de la cuenca, no se tomaron en cuenta datos provenientes de años incompletos o dudosos, en la siguiente tabla se presentan los datos de la precipitación máxima multianual de la estación Sabaneta.

Tabla 11. Datos de precipitación máxima en 24 horas

AÑO	PRECIPITACIÓN (mm)	AÑO	PRECIPITACIÓN (mm)
1987	44	2001	57
1988	100.1	2002	81.1
1989	68	2003	55
1990	92	2004	49.3
1991	52	2005	69.2
1992	75	2006	70
1993	68.2	2007	71.5
1994	105	2008	69.5
1995	83	2009	57.6
1996	36.8	2010	85.1
1997	51.7	2011	79.5
1998	54.8	2012	51.3
1999	67	2013	72.5
2000	69	2015	49.3

Fuente: Autores

Tabla 12. Análisis estadístico de los datos de precipitación de la estación Sabaneta.

Número de Registros	28
Media	67.3
Mediana	68.6
Máximo	105
Mínimo	36.8
Desviación Estándar	16.66

Fuente: Autores

La precipitación mediana máxima en 24 horas a nivel multianual es de 67.70 mm así como los datos presentan una desviación estándar de 16.66 mm.

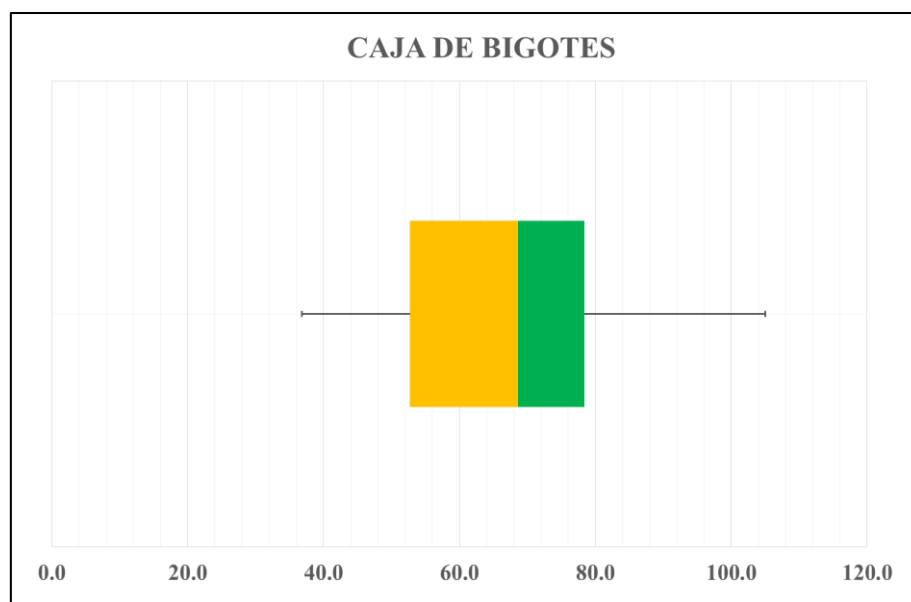
4.3.3 ANÁLISIS DE DATOS ATÍPICOS

Para el análisis de datos se realizó la caja de bigotes y el WRC para identificar datos atípicos como se muestra a continuación:

Tabla 13. Datos y cálculos estadísticos de la estación Sabaneta, Municipio San Francisco, Cundinamarca.

DATOS ESTADÍSTICOS SABANETA	
Min (mm)	36.8
Q1 (mm)	52.7000
Q2 (mm)	68.6000
Q3 (mm)	78.375
Max (mm)	105.0
Rango RI (mm)	25.6750
a	-24.325
b	14.1875
c	116.8875
d	155.4

Fuente: Autores



Gráfica 2. Caja de bigotes. Fuente: Autores

Mediante la caja de bigotes se analizaron los datos de precipitación de la estación sabaneta y se encontró que no existe ningún valor que deba considerarse para ser eliminado o descartado por ser atípico, puesto que todos los datos se encuentran dentro de la caja.

Sumado a lo anterior a continuación se plasma el gráfico de dispersión de los datos tomados de la estación Sabaneta.

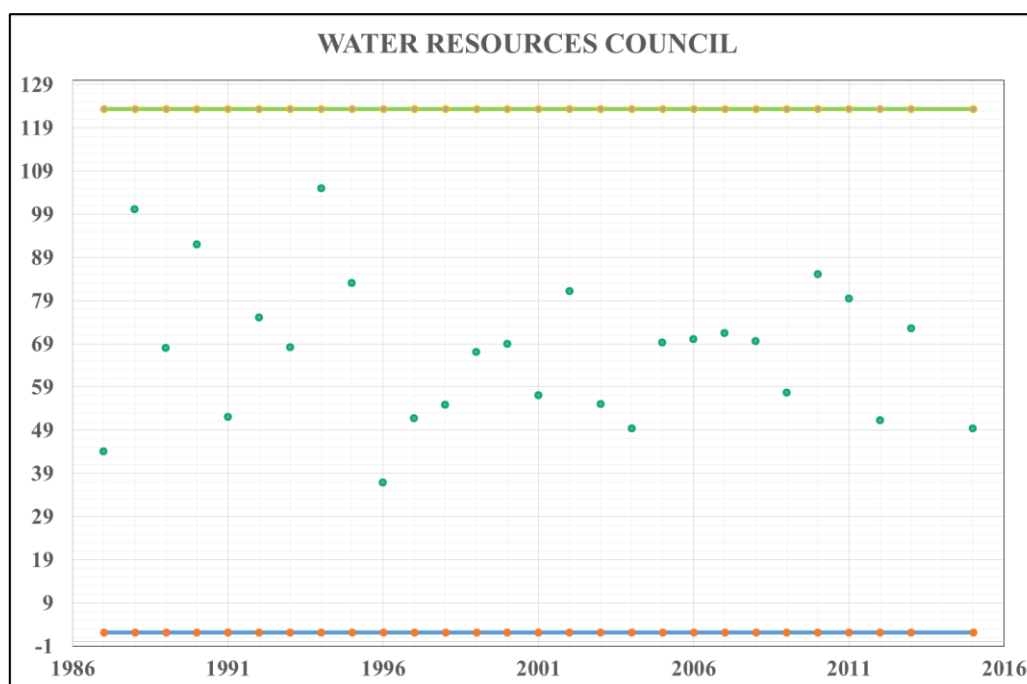
Como se evidencia en la Gráfica 3 la dispersión de esta estación es normal.

Tabla 14. Método Water Resources Council.

WATER RESOURCES COUNCIL	
Media (mm)	1.8
DesvEst (mm)	0.109
Coef Asi (mm)	-0.174
Kn (mm)	2.534

WATER RESOURCES COUNCIL	
Yh (Umbral) (mm)	2.091
Xh (mm)	123.334
Xh sin desface (mm)	122.334

Fuente: Autores

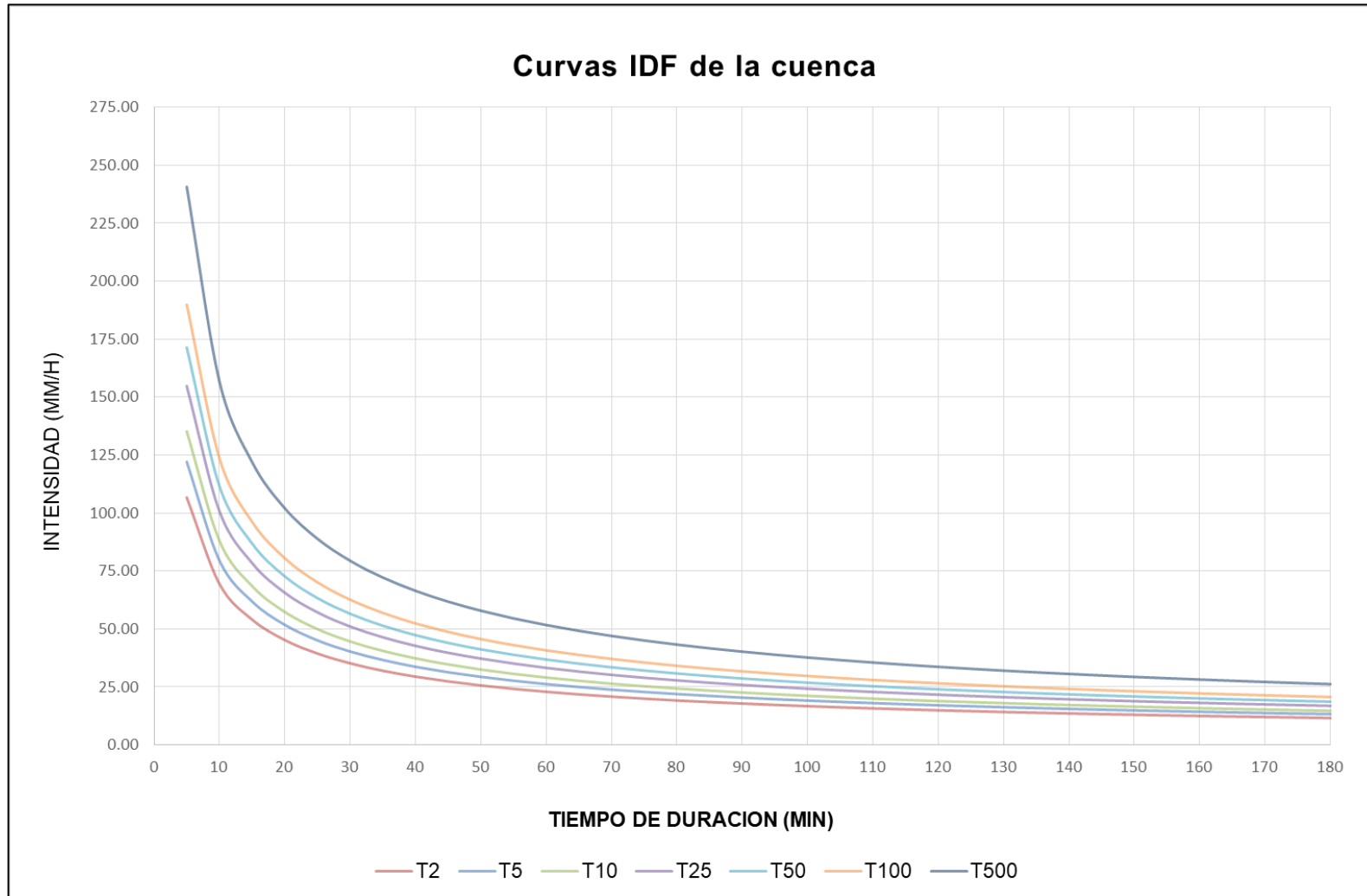


Gráfica 3. Dispersión de datos de precipitación máxima en 24 horas de la estación Sabaneta Municipio San Francisco Cundinamarca. Fuente: Autores

Como se observa en la Gráfica 3 Tampoco se encontraron valores atípicos usando el método WRC.

4.4 OBTENCIÓN DE LAS CURVAS IDF

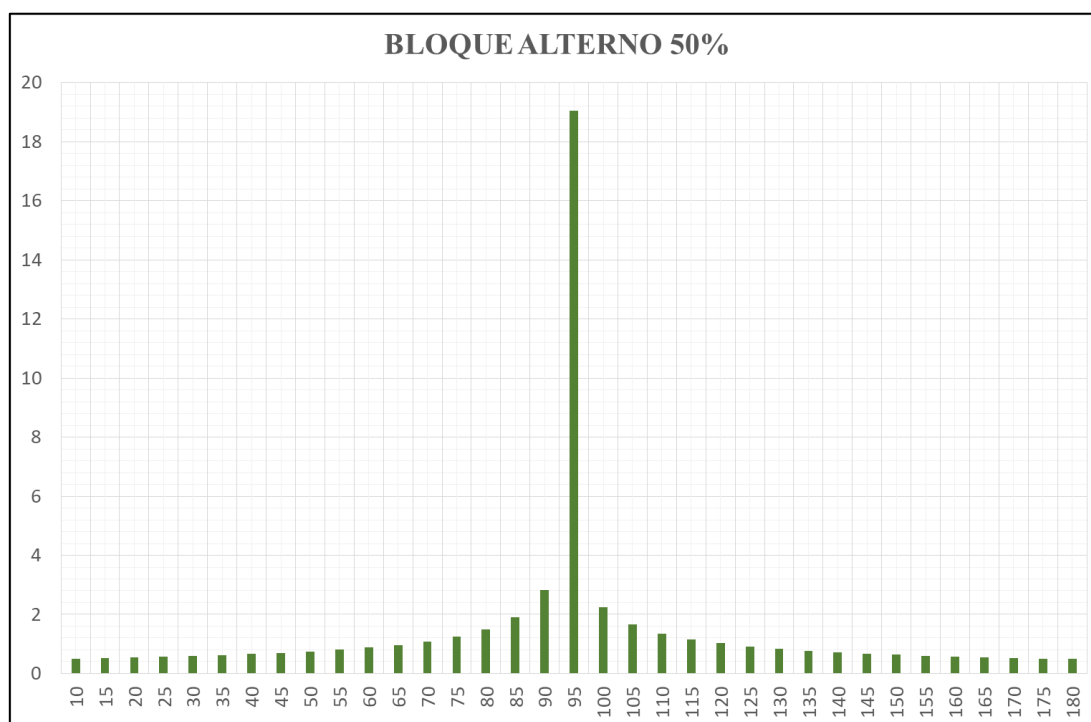
Con los datos mensuales de precipitación máxima en 24 hrs (mm), se obtuvo la Curvas por regresiones matemáticas para la subcuenca San Francisco, para diferentes tiempos de retorno 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años.



Gráfica 4. Curvas por regresiones matemáticas para la subcuenca San Francisco, Cundinamarca. Fuente: Autores

4.5 OBTENCIÓN DE HIETOGRAMA

Una vez obtenidos los datos de intensidad para diferentes periodos de retornos, se procedió a realizar el cálculo de la lluvia de diseño por bloque alterno. Este se obtuvo de los datos de intensidades de las curvas y se multiplica con el tiempo de duración, el producto de esta multiplicación es dividido en 60 minutos, se grafica de tal manera que el dato mayor quede en el centro, los siguientes datos se grafican a la derecha e izquierda, hasta finalizar con los datos más bajos en los extremos de este gráfico.



Gráfica 5. Bloque alterno 50%. Fuente: Autores.

4.6 ANÁLISIS DE LA CUENCA HASTA LA ESTACIÓN LIMNIMETRICA VILLETA

En el análisis de la cuenca hasta la estación limnimétrica Villeta se realizó el mismo procedimiento de subdivisión de la cuenca en varias subcuencas para mejorar la respuesta, teniendo en cuenta los tributarios aportantes al afluente principal y se determinó la caracterización morfométrica de la cuenca para finalmente obtener los tc de cada subcuenca y así poder realizar la calibración.

Tabla 15. Propiedades morfométricas cuenca Villeta

	sub_1	sub_2	sub_3	sub_4	sub_5	sub_6
A (km²)	54.03	93.2	43	82.85	42.42	16.25
L (m)	15030	12120	14440	16710	9590	7050
L (KM)	15.03	12.12	14.44	16.71	9.59	7.05
S (%)	27.81	29.33	30.29	34.25	35.08	35.82
S (m/m)	0.2781	0.2933	0.3029	0.3425	0.3508	0.3582
C	0.5364	0.559	0.486	0.519	0.503	0.473

	sub_1	sub_2	sub_3	sub_4	sub_5	sub_6
CN	91.10932	90.44407	90.05769	91.03892	90.66332	89.27448
D	8.294163	10.89339	7.399277	10.27073	7.349206	4.548642
S	278.1	293.3	302.9	342.5	350.8	358.2
(m/km)						
H	4.179843	3.554796	4.373876	5.723175	3.364172	2.52531

Fuente: Autores.

A continuación se presenta delimitación de la cuenca hasta la estación limnimétrica Villeta, así como su caracterización morfométrica.

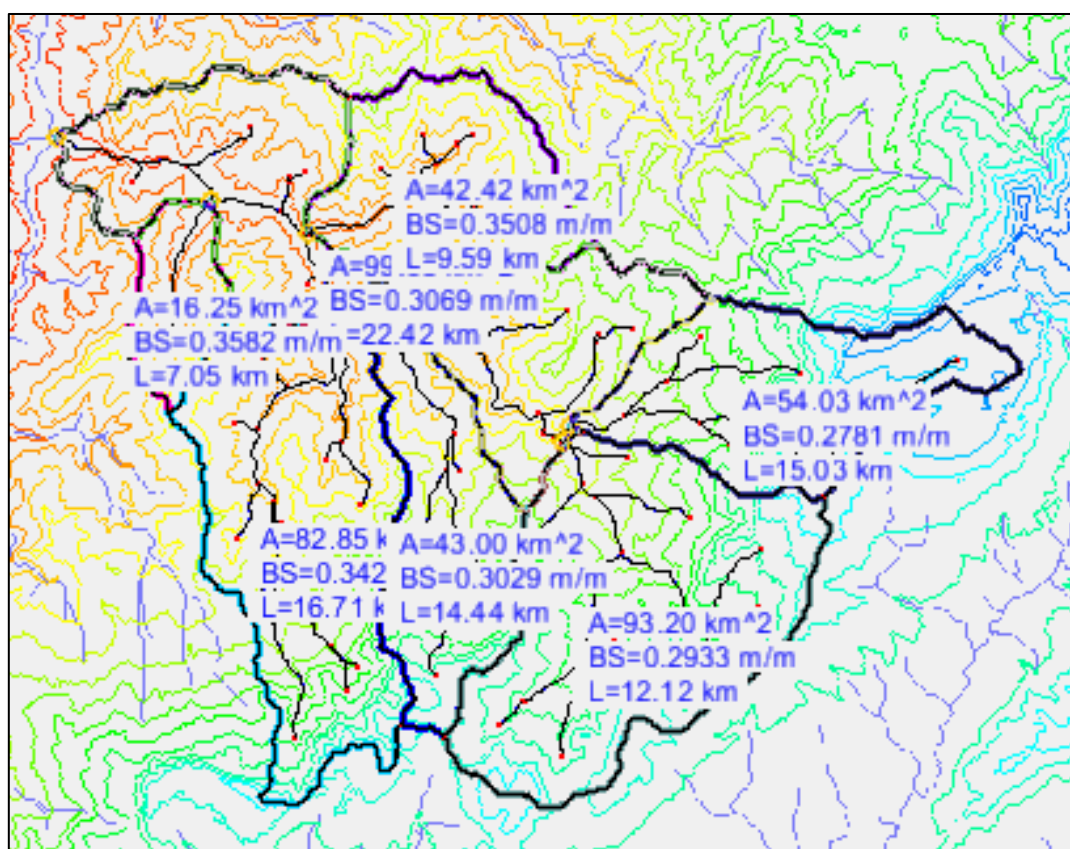


Imagen 9. Delimitación y caracterización morfométrica de la cuenca hasta la estación limnimétrica Villeta, programa WMS. Fuente: Autores.

En la siguiente imagen se presenta la delimitación de la cuenca hasta la estación limnimétrica Villeta, y la subcuenca hasta el municipio San Francisco, demostrando que esta se ubica dentro de la delimitación de la cuenca hasta la estación limnimétrica.

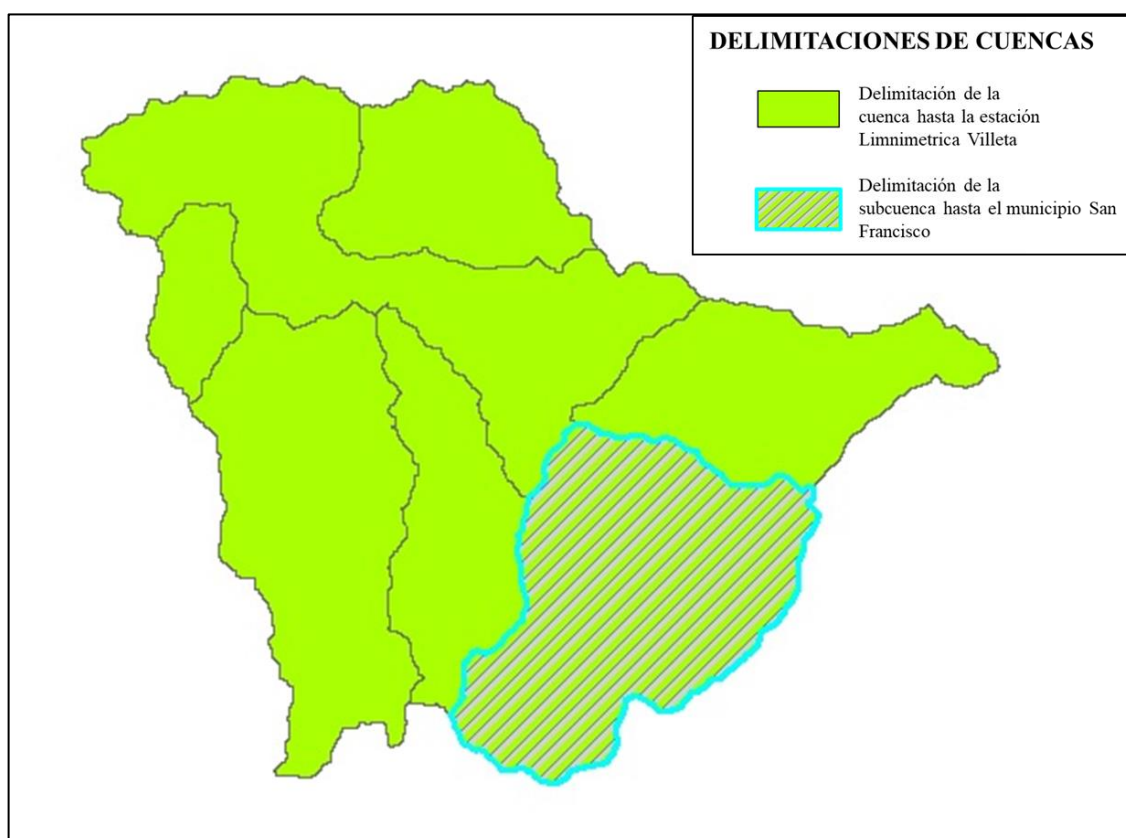


Imagen 10. Delimitación de la cuenca Villeta y de la subcuenca San Francisco, programa WMS. Fuente: Autores.

Una vez caracterizada la cuenca Villeta se calcularon los Tc para sus correspondientes subcuencas las cuales se observan en la tabla no.

Tabla 16. Calculo del Tc de cada subcuenca de la cuenca de Villeta.

subcuenca	TC (hr)	TR (retardo)	TC (min)	TR (min)
SUB1	2.212378	0.774332	132.7427	46.45994
SUB2	1.864969	0.652739	111.8981	39.16434
SUB3	2.106716	0.73735	126.4029	44.24103
SUB4	2.237062	0.782972	134.2237	46.9783
SUB5	1.495135	0.523297	89.7081	31.39784
SUB6	1.198825	0.419589	71.92951	25.17533

Fuente: Autores.

4.7 OBTENCIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS PARA TIEMPOS DE RETORNO (VILLETA)

Una vez definidos los Tc de cada subcuenca y sus propiedades morfométricas se tomaron los datos de la estación limnimetrica Villeta (ver Tabla 17), para encontrar una función de distribución que se ajustara a los datos para estimar los caudales máximos para esta cuenca.

Tabla 17. Caudales máximos anuales estación limnométrica Villeta.

AÑO	MAX ANUAL	AÑO	MAX ANUAL	AÑO	MAX ANUAL
1988	195.9	1997	21.4	2006	71.72
1989	232	1998	20	2007	159
1990	534.3	1999	190.4	2008	88.1
1991	90.9	2000	73.35	2009	123.3
1992	232.5	2001	89.65	2010	38.03
1993	72.6	2002	98.55	2011	46.14
1994	401.8	2003	91.9	2012	38.2
1995	107	2004	68.87	2013	48.82
1996	87	2005	57.2	2014	33.48

Fuente: Autores.

En la siguiente tabla se plasma los resultados obtenidos en el cálculo de los caudales máximos en el programa HidroEsta.

Tabla 18. Caudales máximos estimados por HidroEsta.

VILLETA	NORMAL	LOGNORMAL 2 P	GAMMA 2 P	LOG PEARSON III	GUMBEL
TR 2	119.1	84.27	95.3	120.17	99.94
TR 10	268.61	244.19	244.59	249.05	271.28
TR 25	323.36	360.51	322.96	386.4	357.51
TR 50	358.72	463.65	380.82	517.56	421.49
TR 100	390.52	581.38	437.77	677.06	484.99

Fuente: Autores.

La función de distribución seleccionada fue Log Normal de dos parámetros debido a que el delta teórico de **0,0804** es menor al tabulado de **0.257** por lo que la función se ajusta a los datos con un nivel de significancia del **5%**.

En la siguiente tabla se presentan los datos obtenidos en el proceso estadístico de Log Normal.

Tabla 19. Valores de caudales máximos para tiempos de retorno con el proceso estadístico Log Normal.

Tr	LOG NORMAL
2	84.27
10	244.19
25	360.51
50	463.65
100	581.38

Fuente: Autores

4.8 CALIBRACIÓN DEL MODELO

Es necesario mencionar que en la Tabla 4 se presentan las ecuaciones usadas por el programa HEC-HMS, para los usados para el cálculo de los caudales máximos para las cuencas modeladas.

Se efectuó la modelación en el programa HEC-HMS usando los métodos de SCS, SNYDER y CLARK, hasta obtener datos de caudales máximos similares a los obtenidos en el proceso estadístico calibrando así los parámetros de cada modelo. (Ver Tabla 21).

En la siguiente tabla se presentan los parámetros usados en la modelación de los métodos del programa HEC-HMS de la cuenca Villeta.

Tabla 20. Parámetros usados en la modelación de la cuenca Villeta en el programa HEC-HMS

PARÁMETROS	MODELOS		
	SCS	SNYDER	CLARK
X	0.1	0.1	0.1
K	0.2	0.2	0.2
PEAKING COEFFICIENT	0	0.5	0
STORAGE COEFFICIENT	0	0	1.1

Fuente: Autores

Los parámetros de Muskingum para tránsito de caudales usados para todo el modelo, los coeficientes de descarga y almacenamiento, se encuentran en la Tabla 21. Los cuales fueron usados como datos de entrada en la modelación de la cuenca de San Francisco.

Tabla 21. Valores de caudales máximos para tiempos de retorno en la modelación HEC-HMS

Tr	LOG NORMAL	SCS	SNYDER	CLARK
2	84.27	83.6	89.3	90.2
10	244.19	213.8	235.3	223.6
25	360.51	325	356	338.9
50	463.65	429.5	468.8	455.8
100	581.38	553.9	602	596.4

Fuente: Autores

Los datos salida de la modelación efectuada en el programa HEC-HMS, mostrados en la Tabla 21 reflejan un acercamiento de los datos observados con los simulados con unas diferencias considerables en el ámbito de la hidrología. (Ver Tabla 22)

Tabla 22. Diferencia entre los resultados obtenidos en HidroEsta y los Modelados en HEC-HMS.

Tr	LOG NORMAL	DIFERENCIA SCS	DIFERENCIA SNYDER	DIFERENCIA CLARK
2	84.27	0.67	5.03	5.93
10	244.19	30.39	8.89	20.59
25	360.51	35.51	4.51	21.61
50	463.65	34.15	5.15	7.85
100	581.38	27.48	20.62	15.02

Fuente: Autores

4.9 ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS CALCULO DE CAUDALES MÁXIMOS

De acuerdo a la Tabla 4, existen diferentes métodos para la estimación de caudales máximos en cuencas hidrográficas, los cuales están limitados por distintas condiciones que permiten establecer su aplicabilidad para un caso de estudio específico.

Para el caso de estudio de la sub cuenca correspondiente al sector hidrodependiente de San Francisco se determinó que los métodos 1, 2, y 3 (véase Tabla 4) fueron inaplicables

debido a la inexistencia de una estación hidrométrica con mediciones de caudales para dicho punto, además la evaluación del método 4 no se llevó a cabo debido a las malas condiciones climáticas de la zona que impidieron la obtención de los respectivos parámetros de la ecuación de Mannig; finalmente, el método 5 se descartó por su sensibilidad ante cuecas muy grandes.

Las metodologías del ítem 2.1.8 se lograron evaluar sin ningún inconveniente ya que se contaba con todos los datos de morfometría y las herramientas necesarias para su calibración.

4.10 CALCULO DEL CAUDAL MÁXIMO

Es necesario mencionar que para el desarrollo de la modelación en el programa HEC-HMS, fue necesario desarrollar una subdivisión de la subcuenca debido a que presenta un área muy grande por tanto para facilitar la modelación de los diferentes métodos esta se dividió en cuatro subdivisiones, a continuación, se presenta la figura en donde se puede evidenciar esta subdivisión.

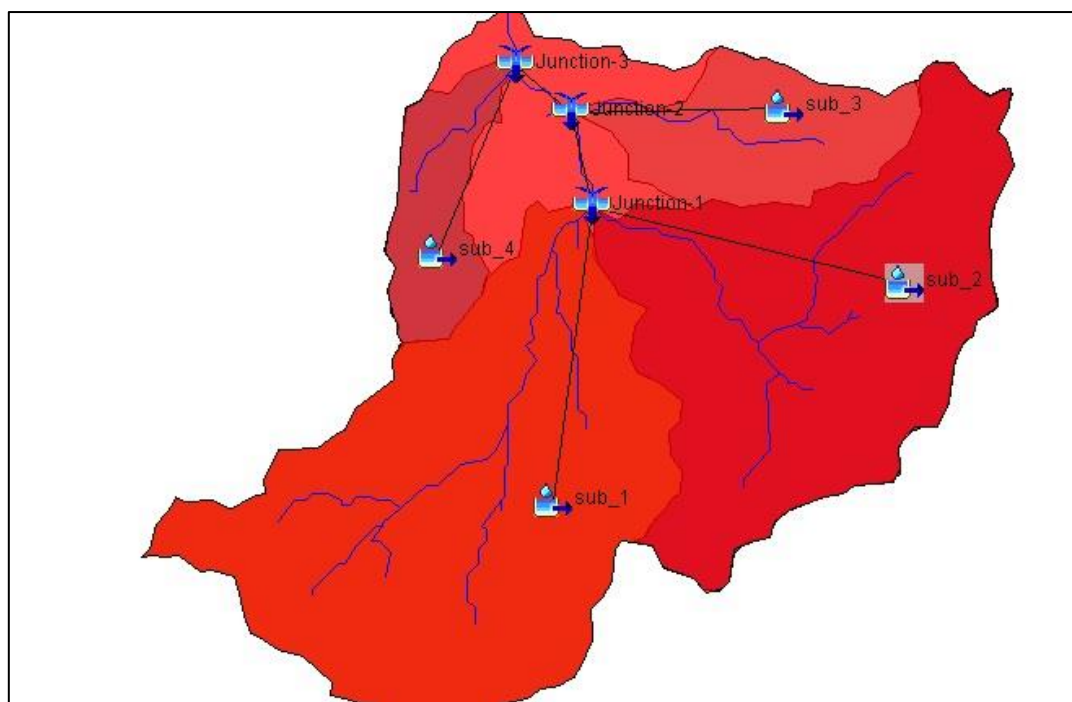


Imagen 11. Subdivisión de la subcuenca hasta el municipio San Francisco, Cundinamarca. Fuente: Autores

En la siguiente tabla se plasma las áreas de cada una de las subdivisiones de la subcuenca modelada

Tabla 23. Área de las subdivisiones de la subcuenca modelada.

SUBDIVISIÓN	A(Km ²)
sub_1	38.266
sub_2	30.496
sub_3	8.830
sub_4	5.515

Fuente: Autores

Una vez calibrado los parámetros para la cuenca de Villeta que contiene a la de San Francisco, se realizó la simulación de la cuenca pequeña usando los parámetros calibrados anteriormente y arrojando los resultados depositados en la tabla 16.

Adicional a la modelación en HEC-HMS se utilizó un método de rendimiento por área el cual se ajusta con los resultados arrojados por el software. Por lo cual se dispone los datos salida de la modelación en HEC-HMS de los métodos SCS, Snyder y Clark, así como los resultados obtenidos en el desarrollo del método rendimiento.

Tabla 24. Caudales máximos resultantes de la modelación de la subcuenca hasta el municipio de San Francisco Cundinamarca.

TR	SCS	SNYDER	CLARK	RENDIMIENTO
TR 2 AÑOS	22.8	21.1	16.7	17.58627724
TR 10 AÑOS	53.4	59.3	45.9	50.9599269
TR 25 AÑOS	79.1	92.6	71.5	75.23470759
TR 50 AÑOS	103	124	97.9	96.75895862
TR 100 AÑOS	131.4	161.3	130.1	121.3279917

Fuente: Autores

4.11 DEFINICIÓN DE RANGO DE LOS CAUDALES MÁXIMOS

En la siguiente tabla se presentan los resultados de los caudales máximos resultantes en cada uno de los métodos para los respectivos tiempos de retorno.

Tabla 25. Calculo de caudales máximos con diferentes métodos para cada uno de los tiempos de retorno Para la Subcuenca de San Francisco Cundinamarca.

TR	SCS (m ³ /s)	SNYDER (m ³ /s)	CLARK	RENDIMIENTO
TR 2 AÑOS	22.8	21.1	16.7	17.586
TR 10 AÑOS	53.4	59.3	45.9	50.960
TR 25 AÑOS	79.1	92.6	71.5	75.235
TR 50 AÑOS	103	124	97.9	96.759
TR 100 AÑOS	131.4	161.3	130.1	121.328

Fuente: Autores

Como se evidencia los resultados de los caudales máximos de los métodos usados para diferentes tiempos de retorno, el método de SCS, Snyder y Rendimiento presentan valores muy parecidos, lo cual nos concluye que son los más aptos para el cálculo de caudales máximos para la Subcuenca hasta el municipio San Francisco, Cundinamarca.

A continuación se presentan los rangos de valores de los caudales máximos para diferentes tiempos de retorno de la subcuenca hasta el municipio San Francisco.

Tabla 26. Rango de valores de caudales máximos de la subcuenca hasta el municipio San Francisco, Cundinamarca.

TR	MÍNIMOS	MÁXIMOS
TR 2 AÑOS	16.7	22.8
TR 10 AÑOS	45.9	59.3
TR 25 AÑOS	71.5	92.6

TR	MÍNIMOS	MÁXIMOS
TR 50 AÑOS	96.759	124
TR 100 AÑOS	121.328	161.3

Fuente: Autores

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Existe relación directa entre las características morfométricas de la cuenca y fenómenos de deslizamiento; esto debido a que la cuenca presenta una etapa joven tendiendo a presentar más procesos erosivos.
- De acuerdo a densidad de drenajes la cuenca se encuentra pobremente drenada, por tanto, se sugiere a las autoridades desarrollar proyectos de distribución del recurso hídrico teniendo en cuenta esta densidad, así como enfocarse en la reforestación de esta con el fin de proteger la subcuenca hidrográfica hasta el municipio San Francisco, Cundinamarca.
- Se encontró que las curvas IDF por métodos de regresión son mucho más ajustadas que las curvas del método del profesor Mario Díaz Granados, ya que estas usan unos coeficientes regionales que no describen correctamente cuencas específicas del país mientras que las regresiones consideran los datos locales de cada zona.
- Los caudales máximos obtenidos para cada uno de los tiempos de retorno, así como para cada uno de los métodos se denota que no presentan desviaciones significativas en los resultados de un método a otro, y no existiendo una estación limnimétrica en la subcuenca hasta el municipio de San Francisco con la cual se pudiera calibrar directamente el modelo, se concluye que quedará a disposición de cada persona seleccionar un modelo específico para estimar un caudal máximo para cualquier fin necesario.
- El rango de los valores de los caudales máximos para un periodo de retorno de dos años está en 6.1, para un periodo de retorno de 10 años este rango es de 13.4, 21.1 es el rango de los valores de caudales máximos para un periodo de retorno de 25 años. Para un periodo de retorno de 50 años el rango es estos valores es 27.2 y finalmente para un periodo de retorno de 100 años este valor corresponde a 39.9.
- Los caudales máximos de la subcuenca hasta el municipio San Francisco, para un periodo de retorno de 2 años está comprendido entre 16.7 y 22.8. Así como para un periodo de retorno de 5 años los valores se comprenden entre 45.9 y 59.3.
- Entre 71.5 y 92.6 se plasman los valores de los caudales máximos para un periodo de retorno de 25 años; sumado a lo anterior en un periodo de retorno de 50 años los valores de caudales máximos se encuentran en un rango de 96.759 y 124. En último lugar los valores para un periodo de retorno de 100 años el rango de valores de caudal máximo es 121.328 y 161.3.
- Se recomienda a las autoridades municipales y departamentales desarrollar estudios más detallados de la cuenca hasta el municipio San Francisco, Cundinamarca, con el objetivo de conocer más detalladamente las características propias de esta subcuenca, así como de proveer información para el planteamiento de estudios de gestión del recurso hídrico y la adecuada gestión del riesgo.



BIBLIOGRAFÍA

Alaska Satellite Facility. (2018). *<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>*. Obtenido de *<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>*

Alcaldía de San Francisco de Sales - Cundinamarca. (2012). *San Francisco Político*.

Alcaldía de San Francisco de Sales - Cundinamarca. (2013). *San Francisco Territorial*.

BENSON , M. A. (1968). Uniform Flood-Frequency Estimating Methods for Federal Agencies. *WATER RESOURCES RESEARCH*.

Bentacourt Reyes, Y. P., & Torres Vidal, C. A. (s.f.). CARACTERIZACIÓN PARCIAL DE ESCENARIOS DE RESGO DEL ÁREA URBANA MUNICIPIO DE SAN FRANCISCO DE SALES- CUNDINAMARCA. (*Trabajo de Grado*). UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA, Bogotá D.C.

Boughton, W., & Droop, O. (2003). *Continuous simulation for design flood estimation—a review*. Brisbane, Australia: Environmental Modelling & Software.

CARÍAS JUÁREZ, B. E., CHACÓN NOVOA, E. T., & MARTÍNEZ MÁRQUEZ, M. Á. (2004). Validación de metodologías para el cálculo de caudales máximos en El Salvador. (*Trabajo de Grado*). UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA “JOSÉ SIMEÓN CAÑAS”, SAN SALVADOR, EL SALVADOR.

CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA -CAR-. (2002). *Delimitación y Localización de la Subcuenca Río Alto Sumapaz*. BOGOTÁ D.C.

DANE. (2005). *CENSO GENERAL 2005*.

DÍAZ ARIAS, U. A., GUACANEME PRIETO, D. F., & ALONSO NORE, F. L. (s.f).
Estimación De Caudales Máximos Para El Sector Hidrológico De La Quebrada El
Diamante, Mediante Modelación Con Hec-Hms. (*Proyecto de grado*).
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA, Bogotá D.C.

Diazgranados, M. (1998). Curvas sintéticas regionalizadas de Intensidad –Duración -
Frecuencia para Colombia. *Revista de Ingeniería Uniandes*, 1-13.

GAMBA MEJÍA, J. D., & GONZÁLEZ HERNÁNDEZ, J. G. (2015). Curvas De
Rendimiento De Caudales Máximos Instantáneos Asociados A Diferentes Periodos
De Retorno En Colombia, Caso De Estudio Río Magdalena. (*Proyecto de Grado*).
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR, CARTAGENA DE INDIAS .

Gaspari a, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Denegri, G., Delgado, M. I., &
Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce
Grande, Buenos Aires, Argentina. *REVISTA AUGMDOMUS. ISSN: 1852-2181*.

Gregersen, H. M., Brooks, K. N., Dixon, J. A., & Hamilton, L. S. (1985). *Guidelines for
economic appraisal of watershed management projects*. Minnesota, USA.

Griffis, V., & Stedinger, J. (2007). *Evolution of Flood Frequency Analysis with Bulletin 17*.
JOURNAL OF HYDROLOGIC ENGINEERING.

Holmes, B. (1972). *A history of federal water resources programs, 1800-1960*.
Miscellaneous Publication No. 1233. Washington, D.C.: Dept. of Agriculture.

iAgua. (12 de Diciembre de 2016). *Software libre, un instrumento en la ingeniería de los
recursos hídricos*. Obtenido de <https://www.iagua.es/blogs/yoel-esleiter-cordova-lera/software-libre-instrumento-ingenieria-recursos-hidricos>: <https://www.iagua.es>



IDEAM. (2014). *Estudio nacional del agua*. Bogotá D.C.

IDEAM. (26 de FEBRERO de 2015). *IDEAM*. Obtenido de SISTEMA DE INFORMACION DE RECURSO HIDRICO:
<http://capacitacion.sirh.ideam.gov.co/homeSIRH/HOME/demanda-n3.html>

IDEAM. (2018). <http://www.ideam.gov.co>. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>: <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>

IDEAM. (s.f.). <http://www.ideam.gov.co>. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica>:
<http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica>

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, INVIAS. (2009). *Manual de drenaje para carreteras*. BOGOTÁ D.C.

INVIAS, INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. (2009). *Manual de drenaje para carreteras*. Bogotá D.C.

Maidment, D. (2002). *Arc Hydro: GIS for Water Resource*. Redlands. California: Ca.: ESRI Press.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2014). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS*. BOGOTÁ D.C.

Osman, S., & Abustan, I. (s.f.). Estimating the Clark Instantaneous Unit Hydrograph Parameters for Selected Gauged Catchments in The West Coast of Peninsular Malaysia. *ASEAN Engineering Journal Part C*.

Reyes Trujillo, A., Barroso, F. U., & Carvajal Escobar, Y. (2010). *Guía básica para la*

caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas. Cali, Colombia.

Rocha Aldana, E. T. (2017). FORMULACIÓN DEL PLAN MUNICIPAL DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPIO DE SAN FRANCISCO CUNDINAMARCA. (*Trabajo de Grado*). UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA, BOGOTÁ.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. (s.f.). <http://www.hec.usace.army.mil>. Obtenido de <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>:
<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>

VÁSQUEZ RANGEL, C., HERRERA LÓPEZ, D., & GUTIÉRREZ REY, Y. (2014). *Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada Tatamaco, del municipio Villavieja del departamento del Huila, mediante el uso de la herramienta HEC-GEOHMS*. Bogotá D.C.