



**Acompañamiento y promoción de la apropiación Social en microcuencas
priorizadas por el Sistema de Alerta y Monitoreo de Antioquia (SAMA).**

Diana Elizabeth Zapata Velásquez

Informe de prácticas social para optar al título de ingeniera sanitaria.

Asesor interno:

Mauricio Andrés Correa Ochoa

Asesor externo:

Alex Ricardo Estupiñán Castellanos

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Ingeniería Sanitaria

Medellín, Antioquia, Colombia 2024

Cita	(Zapata Velásquez, 2024)
Referencia	Zapata Velásquez, D.E (2024). <i>Acompañamiento y promoción de la apropiación Social en microcuencas priorizadas por el Sistema de Alerta y Monitoreo de Antioquia (SAMA)</i> .
Estilo APA 7 (2020)	[Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia



Centro de documentación de ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Lina Maria Berrouet Cadavid.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a todas las personas que hicieron parte de mi proceso de formación: mi madre, mi padre, mi hija, mis hermanos, amigos y compañeros de estudio, colegas y profesores que pusieron el empeño de sembrar sus conocimientos en mí. Sin el apoyo y paciencia de estas personas, el camino para llegar hasta este punto hubiese sido más difícil.

Agradecimientos

Quiero expresar mi total agradecimiento a mi asesor de prácticas el Hidrólogo Alex Ricardo Estupiñán Castellanos por el acompañamiento durante la practica como asesor externo, al profesor David Aguiar Gil y al profesor Mauricio Correa por darme la oportunidad de pertenecer al proyecto, y al resto de compañeros del proyecto por servirme de guías y orientadores para lograr el desarrollo de esta práctica.

INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	8
ABSTRACT.....	10
INTRODUCCION.....	11
1. Descripción general del área de estudio.....	13
2. Antecedentes.....	15
3. OBJETIVOS.....	20
3.1 Objetivo general.....	20
3.2 Objetivo específico.....	20
4. MARCO TEÓRICO.....	21
4.1 Procesos Educativos.....	22
4.2 Procesos Pedagógicos.....	23
4.3 Apropiación social del conocimiento.....	23
4.4 La gestión del riesgo de desastres (GRD).....	25
5. Metodología.....	28
5.1 Área de estudio.....	28
5.2 Delimitación de la cuenca mediante programa SIG.....	28
5.3 Parámetros morfológicos de la cuenca.....	29
5.3.1 Ancho de la cuenca.....	29
5.3.2 Factor de forma Horton (Kf).....	29
5.3.3 Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius (Kc).....	30
5.3.4 Parámetros del relieve.....	31
5.3.5 Pendiente del cauce principal Sc.....	32
6. Tiempo concentración (Tc).....	33
7. Distribución espacial de la precipitación.....	34
7.1 Datos Hidrometeorológicos.....	34
7.1.1. Mapa de precipitación media de la cuenca.....	35
7.1.2. Mapa de temperatura media multianual.....	35
7.1.3. Evapotranspiración.....	36
7.1.4. Evapotranspiración potencial.....	36
7.1.5. Evapotranspiración Real.....	37
8. Curvas de Duración Intensidad y Frecuencia (IDF).....	38

9. Modelación hidrológica en HEC-HMS.	40
9.1 Tratamiento de datos.	41
9.1.1 modelo de pérdida (Loss).	41
9.1.2 Determinación del tipo de suelo y cobertura Vegetal.	42
9.1.3 Curva número (CN).	43
9.1.4 transformar modelo (Transform).	46
9.1.5 Enrutamiento (Routing).	47
9.2 Hietograma de diseño de HUFF.	48
10. Resultados y análisis	49
10.1 Parámetros morfométricos generales.	49
10.1.1 Parámetros del relieve.	50
10.1.2 Pendiente del cauce principal Sc.	51
10.2 Tiempo de concentración.	51
10.3 Precipitación Anual.	52
Conclusiones.	71
Referencias.	73

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones meteorológicas del municipio de Caracolí-Antioquia	14
Tabla 2. Histórico de emergencia-Vendaval-tomado DAGRAN.	16
Tabla 3. Histórico de emergencia-Movimiento en masa-tomado DAGRAN	17
Tabla 4. Histórico de emergencia-Inundación-tomado DAGRAN	17
Tabla 5. Histórico de emergencia-Creciente súbita-tomado DAGRAN	17
Tabla 6. Histórico de emergencia-Avenida torrencial-tomado DAGRAN	18
Tabla 7. Histórico de emergencia-Inundación-tomado DESINVENTAR.	19
Tabla 8. Histórico de emergencia-Viento fuerte-tomado DESINVENTAR.	19
Tabla 9: Relación de forma de Horton.	30
Tabla 10: índice de compacidad de GRAVELIUS.	31
Tabla 11. Ecuaciones para el cálculo de los tiempos de concentración, Tc (horas).	33
Tabla 12. Estaciones pluviométricas de estudio	34
Tabla 13. Valores de los coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas intensidad-duración-frecuencia, IDF, para Colombia.	40
Tabla 14. Número de curva para condiciones medias de humedad	45
Tabla 15: Parámetros morfométricos cuenca La Reina.	49
Tabla 16. parámetros de forma de la cuenca La Reina.	50
Tabla 17. parámetros morfométricos de relieve cuenca La Reina.	50
Tabla 18. parámetros del cauce principal de la quebrada La Reina.	51
Tabla 19. Área de las Subcuencas de la quebrada LA reina.	59
Tabla 20. CN3 estimado para cada subcuenca a partir del CN2.	63

Tabla 21. Tiempo de concentración [TC] y Coeficiente de almacenamiento [R].	64
Tabla 22. Longitud y Tiempo de tránsito para cada tramo de la Quebrada La Reina.	65
Tabla 23. Periodo de retorno.	65
Tabla 24. Intervalo de precipitación con probabilidad del 50% para cada periodo de retorno.	66
Tabla 25. Caudales máximos para la cuenca La Reina.	67

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa cuenca La Reina del municipio de Caracolí Antioquia.	14
Figura 2. Mapa conceptual paso delimitación de Cuenca ArcGIS.	28
Figura 3. Tiempos de concentración por diferentes metodologías para la cuenca La Reina.	52
Figura 4. Precipitación media anual cuenca La Reina.	52
Figura 5. Mapa de precipitación media anual cuenca La Reina.	53
Figura 6. Temperatura promedio cuenca La Reina.	54
Figura 7. Mapa de evapotranspiración potencial (ETP) cuenca La Reina.	55
Figura 8. Mapa de evapotranspiración real por BUDYKO de la cuenca La Reina.	55
Figura 9. Mapa evapotranspiración real TURC cuenca La Reina.	56
Figura 10. Curvas IDF estación Virginias-Puerto Berrio.	57
Figura 11. Curvas IDF estación Granja Experimental San Roque	58
Figura 12. Mapa Subcuencas Quebrada La Reina.	59
Figura 13. Mapa clasificación de pendientes.	60
Figura 14. Mapa Tipo de suelo IGAC cuenca La Reina.	61
Figura 15. Mapa Tipo de cobertura vegetal IGAC cuenca La Reina.	62
Figura 16. Mapa curva número-CN La Reina	62

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	29
Ecuación 2	29
Ecuación 3	31
Ecuación 4	32
Ecuación 5	36
Ecuación 6	36
Ecuación 7	37
Ecuación 8	38
Ecuación 9	39
Ecuación 10	41
Ecuación 11	42
Ecuación 12	42
Ecuación 13	45
Ecuación 14	46
Ecuación 15	47
Ecuación 16	47
Ecuación 17	48

Siglas, acrónimos y abreviaturas.

DEM	Modelo de Elevación Digital
ETP	Evapotranspiración potencial
ETR	Evapotranspiración Real
GRD	Gestión del riesgo de desastres
HEC-HMS	Centro de Ingeniería Hidrológica-Sistema de Modelado Hidrológico
IDF	Intensidad Duración Frecuencia
IDW	Inverso de Distancia Ponderada
MI	Millas
R	Coefficiente de Acumulación
SAMA	Sistema de Alerta y Monitoreo de Antioquia
SAT	Sistemas de Alerta tempranas
SIG	Sistema de Información Geográfico
TC	Tiempo de Concentración
TR	Tiempo de Retorno

RESUMEN.

Este documento contiene el análisis de diferentes factores que contribuyen al aumento del cauce en quebradas y ríos, incluyendo aspectos climáticos, topográficos y de uso del suelo, y la modelación hidrológica en el programa HEC-HMS 4.11 en combinación con el software ArcGIS, para la microcuenca priorizada por el proyecto SAMA La Reina, ubicada en el municipio de Caracolí, departamento de Antioquia.

En primera instancia, se recopiló información base relacionada al sitio de estudio mediante medios electrónicos, como bases de datos institucionales y gubernamentales, tales como la NASA (National Aeronautics and Space Administration), el IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) y el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales).

En segunda instancia, se determinó la lámina acumulada de precipitación para los periodos de retorno (2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años) mediante las curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) y el hietograma de Huff para el primer cuartil.

Posteriormente, se realizó la delimitación de la cuenca utilizando la herramienta ArcGIS. Esta herramienta permitió obtener parámetros geomorfológicos esenciales, como la forma de la cuenca, las características del relieve y el cauce principal. Estos parámetros fueron fundamentales para comprender la magnitud y el comportamiento de la cuenca y poder caracterizar el potencial de escorrentía mediante la curva número (CN), la cual se determinó teniendo como información de base la pendiente del terreno, el tipo de suelo, la cobertura vegetal y la capacidad de infiltración del suelo.

Finalmente, se determinaron mediante modelación hidrológica los caudales máximos en la cuenca La Reina para los periodos de retorno mencionados anteriormente, concluyendo de este modo la importancia de la modelación hidrológica en la planificación efectiva de los recursos hídricos y en la mitigación de riesgos por inundación o avenidas torrenciales en áreas priorizadas.

Palabras clave: ArcGIS, Comunidades, Curva Número, HEC-HMS IDF, IDEAM, IGAC, Inundaciones, Modelación Hidrológica, Riesgo, SAMA, Sistemas de Alerta Temprana.

ABSTRACT

This document contains the analysis of different factors that contribute to the increase in the level of streams and rivers, including climatic, topographic and land use aspects, and hydrological modeling in the HEC-HMS 4.11 program in combination with the ArcGIS software, for the micro-basin prioritized by the SAMA La Reina project, located in the municipality of Caracolí, department of Antioquia.

In the first instance, base information related to the study site was collected through electronic means, such as institutional and governmental databases, such as NASA (National Aeronautics and Space Administration), IGAC (Agustín Codazzi Geographic Institute) and IDEAM (Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies).

Secondly, the accumulated precipitation layer was determined for the return periods (2.33, 5, 10, 25, 50 and 100 years) using the intensity, duration and frequency (IDF) curves and the Huff hyetograph for the first quartile.

Subsequently, the basin was delimited using the ArcGIS tool. This tool allowed obtaining essential geomorphological parameters, such as the shape of the basin, the relief characteristics and the main channel.

These parameters were essential to understand the magnitude and behavior of the basin and to be able to characterize the runoff potential using the curve number (CN), which was determined using as base information the slope of the terrain, the type of soil, the vegetation cover and the infiltration capacity of the soil.

Finally, the maximum flows in the La Reina basin were determined by hydrological modeling for the return periods mentioned above, thus concluding the importance of hydrological modeling in the effective planning of water resources and in mitigating risks due to flooding or torrential floods in priority areas.

INTRODUCCION.

El fenómeno del cambio climático y la creciente ocurrencia de eventos extremos han puesto en evidencia la necesidad de fortalecer las capacidades de monitoreo, alerta temprana y gestión del riesgo de desastres en las comunidades vulnerables. En este contexto, el proyecto "Acompañamiento en los procesos de modelación hidrológica en cuencas priorizadas por el sistema de alerta y monitoreo de Antioquia SAMA y desarrollo de procesos educativos y pedagógicos para la apropiación social del conocimiento y la gestión del riesgo de desastres" surge como una iniciativa clave para abordar estos desafíos en el departamento de Antioquia, específicamente en el municipio de Caracolí.

Este proyecto interdisciplinario busca aunar esfuerzos en dos frentes fundamentales: por un lado, el fortalecimiento de las capacidades técnicas y científicas para la modelación hidrológica en cuencas priorizadas por el Sistema de Alerta y Monitoreo de Antioquia (SAMA); y por otro lado, el desarrollo de procesos educativos y pedagógicos que promuevan la apropiación social del conocimiento y la gestión integral del riesgo de desastres en las comunidades locales.

En cuanto al componente técnico, el proyecto se enfoca en la aplicación de modelos hidrológicos avanzados y el análisis de escenarios climáticos para mejorar la comprensión de los procesos hidrológicos en las cuencas seleccionadas. Esto permitirá optimizar los sistemas de monitoreo y alerta temprana, así como informar la toma de decisiones en materia de gestión del riesgo y adaptación al cambio climático.

La ejecución del SAMA contempla los siguientes ejes: (i) Modelación hidrológica e hidráulica en cuencas hidrográficas; (ii) Instalación de estaciones hidrometeorológicas automáticas (pluviómetros, sensores de nivel, estaciones meteorológicas) y alarmas sonoras; (iii) Monitoreo y análisis de los datos tomados por la red automática y (iv) Capacitación a los concejos

municipales de gestión del riesgo y a las comunidades priorizadas por alto riesgo por la ocurrencia de avenidas torrenciales e inundaciones.

Adicionalmente, se procederá con la realización de la modelación hidrológica para comprender y predecir el comportamiento de los sistemas hídricos en cuencas hidrográficas. En este contexto, el Modelo de Simulación Hidrológica (HEC-HMS) desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, ha ganado amplia aceptación y uso en proyectos de ingeniería hidrológica, gestión de recursos hídricos y análisis de riesgos. HEC-HMS es un modelo semi-distribuido que permite simular los procesos de precipitación-escorrentía en cuencas complejas, considerando diversos componentes hidrológicos como la infiltración, flujo superficial, flujo subterráneo y propagación en cauces. Mediante la aplicación de métodos numéricos y diferentes esquemas de cálculo, este modelo brinda la capacidad de analizar eventos de tormenta, caudales máximos, caudales medios y volúmenes de escorrentía, facilitando así la toma de decisiones informadas en aspectos cruciales como el diseño de estructuras hidráulicas, planes de manejo de cuencas y sistemas de alerta temprana.

Paralelamente, el proyecto contempla un eje educativo y de divulgación científica, reconociendo la importancia de involucrar a las comunidades locales en la construcción de resiliencia frente a los desastres. A través de talleres, capacitaciones y materiales didácticos, se busca empoderar a los actores locales con conocimientos y herramientas para comprender los riesgos asociados a fenómenos hidrometeorológicos, así como promover prácticas de prevención y respuesta efectiva ante situaciones de emergencia.

Finalmente, este proyecto representa un esfuerzo conjunto, con el objetivo de generar conocimiento científico sólido y al mismo tiempo promover su apropiación y aplicación práctica en las comunidades más vulnerables de Antioquia. De esta manera, se espera contribuir de manera

significativa a la construcción de territorios más resilientes y preparados para enfrentar los desafíos actuales y futuros en materia de riesgo de desastres.

1. Descripción general del área de estudio.

En Antioquia departamento de Colombia existe una gran variedad de problemas relacionados con las inundaciones, estas llegan a representar grandes amenazas en los diferentes municipios del departamento. El municipio de Caracolí ha sido uno de ellos, este se ha visto afectado repetitivamente por inundaciones fluviales y avenidas torrenciales (Alcaldía Municipal de Caracolí, 2022). Se encuentra categorizado como uno de los municipios con alto riesgo de inundación fluvial en Antioquia.

El área de estudio en la cual se centra este trabajo es la quebrada La Reina del municipio de Caracolí, localizada en la región de la Magdalena medio del departamento de Antioquia, aproximadamente a 146 km de Medellín tiene un área de 5.13 km², una altitud promedio de 764 m sobre el nivel del mar y un clima cálido de 26°.

La cuenca de la quebrada La Reina, tiene una dirección suroeste - noreste y desemboca al río Nus. Esta quebrada atraviesa la cabecera urbana y la divide en dos sectores claramente definidos al municipio; el parque y la calle. Este cauce pasa a pocos metros del barrio Los Arenales convirtiéndola en sitio de monitoreo constantes por parte de las entidades departamentales SAMA (Sistema de alerta y monitoreo de Antioquia), Piragua (programa integral red de agua) y el IDEAM.

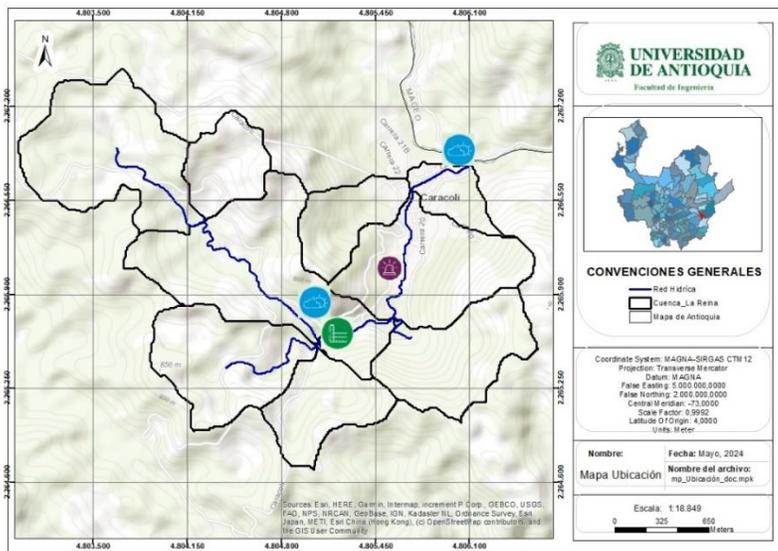
El municipio de Caracolí Antioquia cuenta con dos estaciones pluviométricas, tres sensores de nivel y un sistema de alarma que de forma conjunta se encargan del monitoreo y análisis de los

datos en tiempo real tomados por la red automática y en base a esta información brindan capacitación a los concejos municipales de gestión del riesgo y a las comunidades priorizadas por alto riesgo de ocurrencia de avenidas torrenciales, inundaciones o desabastecimiento.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas del municipio de Caracolí-Antioquia

Nombre-sector	Categoría	Longitud	Latitud	Pertenece
Hacienda Casa Blanca	Pluviómetro	-74,7636800	6.4005300	SAMA
Barrio Clavelina	pluviómetro	-74,7552200	6,4122200	SAMA
Puente Árbol De Caracolí	Sensor de nivel	-74,7629100	6,4004300	SAMA
Barrio Arenales	Alarma	-74,7579560	6,4059870	SAMA
Barrio Clavelina	Sensor de nivel	74,7548960	6,4120680	Piragua
Comercio	Sensor de nivel	-74,7560278	6.4109070	Piragua

Figura 1. Mapa cuenca La Reina del municipio de Caracolí Antioquia.



2. Antecedentes

El municipio de Caracolí enfrenta constantemente la amenaza de inundaciones debido a las características morfológicas y climáticas de la quebrada La Reina. A través del tiempo, han desarrollado distintos planes y tácticas para reducir los riesgos que enfrenta este municipio.

Especialmente los barrios Arenales, Calle Nueva, Fondo Obrero y Clavellina, que son los que presentan mayor amenaza por inundación debido a su cercanía con el cauce principal, ejemplo de ello es El barrio Arenales que se encuentra localizado a pocos metros de la quebrada la Reina, lo cual intensifica el riesgo de que estos sucesos naturales afecten directamente a la población.

El municipio también ha sido golpeado por otros eventos hidrológicos a lo largo de los años. Para mitigar estas catástrofes la alcaldía activa el Departamento Administrativo del Sistema de Prevención, Atención y Recuperación de Desastres – DAPARD, por medio de la entidad (DAGRAN), esta entidad a través diferentes protocolos se activa según el nivel de riesgo, entre los cuales están; sistemas de alertas tempranas, búsqueda, albergue, alimentación, salud y saneamiento básico entre otras (UNAL, 2018).

Los eventos hidrológicos de emergencia que se han presentado en el departamento se pueden consultar a través (DAGRAN, Histórico de emergencia, 2024), quien suministra información sobre los histórico de emergencia de los municipios de Antioquia. Para el municipio de Caracolí se encuentra información detallada de los eventos hidrometeorológicos que se han presentado a lo largo de los años.

En el caso de las emergencias reportadas por inundaciones estas aparecen en tercer lugar de recurrencia con 8 emergencias reportadas a lo largo del tiempo, dejando gran afectación en el municipio. Este evento causo gran impacto y afectación en octubre del 2018 debido a la intensidad

y constancia de las lluvias que causaron el desbordamiento de la quebrada la Reina. Debido a esta situación varias familias fueron reubicadas en albergues temporales, mientras los organismos de rescate atendían la emergencia (COLOMBIANO, 2018). Pese a la difícil situación presentada en el municipio no hubo pérdidas humanas, ni heridos gracias a la pronta acción de la comunidad y de los organismos de rescate municipales y departamentales. En las siguientes tablas se puede observar los diferentes eventos hidrológicos presentado en el municipio a través de los años.

Tabla 2. Histórico de emergencia-Vendaval-tomado DAGRAN.

Histórico de emergencia Caracolí (Antioquia)-DAGRAN				
Evento	Fecha	Emergencia Reportada	Viviendas afectadas	Familias afectadas
	1/3/2005	1	16	0
	1/9/2005	1	21	0
	1/4/2008	1	0	0
	1/10/2009	1	53	0
	1/6/2012	1	0	0
Vendaval	1/10/2013	1	0	0
	1/8/2014	1	0	0
	1/9/2015	2	32	6
	1/8/2017	1	0	9
	1/6/2020	2	12	12
	1/8/2021	1	1	2
Total		13	135	29

Tabla 3. Histórico de emergencia-Movimiento en masa-tomado DAGRAN

Histórico de emergencia Caracolí (Antioquia)-DAGRAN				
Evento	Fecha	Emergencia Reportada	Viviendas afectadas	Familias afectadas
Movimiento en Masa	1/10/1924	1	0	0
	1/9/1984	1	0	0
	1/12/1996	1	0	0
	1/10/2001	1	20	0
	1/4/2009	2	14	0
	1/9/2014	1	0	0
	1/4/2017	1	1	1
	1/5/2019	1	0	0
	1/12/2020	1	0	0
Total		10	35	1

Tabla 4. Histórico de emergencia-Inundación-tomado DAGRAN

Histórico de emergencia Caracolí (Antioquia)-DAGRAN				
Evento	Fecha	Emergencia Reportada	Viviendas afectadas	Familias afectadas
Inundación	1/10/1998	1	23	0
	1/4/2009	1	7	0
	1/9/2016	1	0	0
	1/11/2016	1	0	0
	1/4/2018	1	1	0
	1/8/2018	1	1	0
	1/10/2018	2	0	37
	Total		8	32

Tabla 5. Histórico de emergencia-Creciente súbita-tomado DAGRAN

Histórico de emergencia Caracolí (Antioquia)-DAGRAN				
Evento	Fecha	Emergencia Reportada	Viviendas afectadas	Familias afectadas
Creciente súbita	1/4/2017	1	0	1
	1/10/2017	1	0	3
	1/3/2021	1	2	2
	1/5/2022	1	1	1
Total		4	3	7

Tabla 6. Histórico de emergencia-Avenida torrencial-tomado DAGRAN

Histórico de emergencia Caracolí (Antioquia)-DAGRAN				
Evento	Fecha	Emergencia Reportada	Viviendas afectadas	Familias afectadas
Avenida	1/10/1960	1	0	0
Torrencial	1/10/1962	1	0	0
Total		2	0	0

Los eventos hidrológicos que mayor recurrencia ha presenciado el municipio ha sido vendavales con un total de 13 eventos reportados, seguido, de movimientos en masa con reporte de 10 eventos y en tercer lugar se encuentra las inundaciones con 8 eventos reportados ante el Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Antioquia (DAGARN) para el municipio de Caracolí Antioquia. De estos eventos hidrológicos, las inundaciones es el que más afectación ha dejado en las familias del Municipio.

En el sistema de gestión de información sobre desastres (DesInventar-Colombia, 2024), se obtuvo información de otros eventos hidrológicos reportados en el municipio de Caracolí para diferentes periodos de tiempo. En la siguiente tabla se puede observar el evento reportado, la fecha y el número de afectados en cada uno de los eventos.

Tabla 7. Histórico de emergencia-Inundación-tomado DESINVENTAR.

Histórico de emergencia Caracolí (Antioquia)-DESINVENTAR				
Evento	Fecha	Emergencia Reportada	Viviendas afectadas	Afectados
Inundación	23/10/1998	1	23	98
	30/10/2001	1	-	91
	27/8/2012	1	50	250
	2/10/2017	1	8	40
Total		4	81	479

Tabla 8. Histórico de emergencia-Viento fuerte-tomado DESINVENTAR.

Histórico de emergencia Caracolí (Antioquia)-DESINVENTAR				
Evento	Fecha	Emergencia Reportada	Viviendas afectadas	Afectados
Viento fuerte	9/6/1999	1	15	75
	29/5/2008	1	40	200
	8/3/2014	1	42	76
Total		3	97	351

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Acompañar en los procesos de modelación hidrológica en cuencas priorizadas por el Sistema de Alerta y Monitoreo de Antioquia SAMA y desarrollo de procesos educativos y pedagógicos para la apropiación social del conocimiento y la gestión del riesgo de desastres.

3.2 Objetivo específico

- Analizar los riesgos y factores que contribuyen a las crecientes de quebradas y ríos, incluyendo aspectos climáticos, topográficos y de uso del suelo.
- Apoyar el diseño y desarrollo del proceso de apropiación social con comunidades vulnerables para la gestión del riesgo de desastres.
- Desarrollar habilidades para analizar e interpretar los resultados de los programas de modelación hidrológica y el comportamiento de los flujos de agua en microcuencas priorizadas.

4. MARCO TEÓRICO.

El Sistema de Alerta y Monitoreo de Antioquia (SAMA) es una herramienta esencial para la gestión del riesgo y la prevención de desastres en el departamento de Antioquia, Colombia. Este sistema integra diversas tecnologías y metodologías para monitorear y alertar sobre posibles amenazas naturales, como deslizamientos de tierra, inundaciones y movimientos sísmicos.

Sistemas de Alerta tempranas (SAT) se fundamenta en los siguientes aspectos:

1. Teoría de sistemas complejos: se basa en la teoría de sistemas complejos, que considera que los fenómenos naturales son el resultado de la interacción dinámica entre múltiples variables y componentes interconectados (Rivero et al., 2023) . Esta perspectiva permite abordar de manera integral los factores que influyen en la ocurrencia de eventos adversos y tomar decisiones informadas.

2. Monitoreo y análisis de datos: los SAT emplea técnicas de monitoreo y análisis de datos en tiempo real provenientes de diversas fuentes, como estaciones meteorológicas, sensores sísmicos y sistemas de teledetección (Rivero et al., 2023). Estos datos son procesados y analizados mediante modelos predictivos y algoritmos de inteligencia artificial para identificar patrones y tendencias que puedan indicar potenciales riesgos.

3. Sistemas de información geográfica (SIG): Los SIG son herramientas fundamentales en SAT, ya que permiten desarrollar modelos, integrar y visualizar datos espaciales y temporales relacionados con las amenazas naturales (Alcántara-Ayala & Moreno, 2016). Esto facilita la identificación de zonas vulnerables, la planificación de acciones preventivas y la toma de decisiones informadas.

4. Comunicación y difusión de alertas: Los sistemas de alerta temprana cuenta con un sistema de comunicación y difusión de alertas que permite informar de manera oportuna a las autoridades y comunidades sobre posibles eventos adversos (Villagrán de León et al., 2006) Esto incluye el uso de canales de comunicación efectivos, como mensajes de texto, redes sociales y sistemas de alerta temprana.

5. Gestión del riesgo y resiliencia: SAT se enmarca en el enfoque de gestión del riesgo de desastres, que busca reducir la vulnerabilidad de las comunidades y aumentar su resiliencia ante eventos adversos (Mori et al., 2017) . Esto implica la implementación de medidas preventivas, planes de contingencia y estrategias de recuperación.

4.1 Procesos Educativos.

Los procesos educativos son aquellas experiencias de aprendizaje planificadas y organizadas, que tienen como objetivo facilitar la adquisición de conocimientos, habilidades y valores en los estudiantes. Estos procesos implican una serie de acciones sistemáticas que buscan potenciar el desarrollo integral de los individuos, a través de la interacción entre docentes, contenidos y entornos de aprendizaje (Gimeno-Sacristán, 1995)

(Gimeno-Sacristán, 1995) señala que los procesos educativos deben ser concebidos como una construcción cultural, en la que intervienen múltiples factores, tales como las políticas educativas, los currículos, los recursos didácticos y las metodologías de enseñanza. Además, destaca la importancia de considerar las características individuales de los estudiantes, sus contextos socioculturales y sus necesidades particulares.

4.2 Procesos Pedagógicos.

Los procesos pedagógicos se refieren a las estrategias y métodos utilizados por los docentes para facilitar el aprendizaje de los estudiantes. Estos procesos implican la planificación, ejecución y evaluación de las actividades de enseñanza, con el fin de promover el desarrollo de competencias y habilidades específicas (Chevallard, 1998).

Según (Chevallard, 1998) los procesos pedagógicos implican la transposición didáctica, es decir, la transformación del conocimiento científico en conocimiento enseñable, de manera que sea accesible y significativo para los estudiantes. Esto implica la selección y organización de contenidos, así como la utilización de recursos y técnicas didácticas adecuadas.

(Freire, 1970) destaca la importancia de la pedagogía crítica, en la cual se promueve el diálogo, la reflexión y la problematización de los contenidos, con el fin de fomentar el pensamiento crítico y la participación activa de los estudiantes en su propio proceso de aprendizaje.

4.3 Apropiación social del conocimiento.

La apropiación social del conocimiento se refiere al proceso mediante el cual los individuos y las comunidades se involucran activamente en la construcción, uso y aplicación del conocimiento en su vida cotidiana (Muñoz et al., 2023). Este concepto implica un enfoque participativo y democratizador del conocimiento, que trasciende los límites tradicionales de la generación de conocimiento en los espacios académicos y científicos.

Según (Lozano et al., 2021), la apropiación social del conocimiento se basa en tres pilares fundamentales:

Acceso al conocimiento: El conocimiento debe estar disponible y accesible para todos los miembros de la sociedad, sin discriminación alguna. Esto implica la eliminación de barreras físicas, económicas, sociales y culturales que impidan el acceso al conocimiento.

Comprensión del conocimiento: No basta con tener acceso al conocimiento, sino que es necesario comprender su significado y relevancia en el contexto de la vida cotidiana. Esto implica la capacidad de interpretar, analizar y aplicar el conocimiento de manera crítica y reflexiva.

Aplicación del conocimiento: El conocimiento adquirido debe ser utilizado de manera práctica y efectiva para resolver problemas, tomar decisiones informadas y mejorar la calidad de vida de las personas y las comunidades.

Uno de los enfoques teóricos más influyentes en la apropiación social del conocimiento es el "Modelo de la Triple Hélice" propuesto por (ETZKOWITZ & LEYDESDORFF, 1995). Este modelo sugiere que la interacción y colaboración entre la academia, la industria y el gobierno es fundamental para el desarrollo económico y social basado en el conocimiento.

Además, autores como (Baber et al., 1995) han destacado la importancia del "Modo 2" de producción de conocimiento, que enfatiza la transdisciplinariedad, la colaboración y la participación de diversos actores sociales en la generación y aplicación del conocimiento.

En este sentido, la apropiación social del conocimiento implica un cambio de paradigma, pasando de un modelo lineal y unidireccional de transferencia de conocimiento a un enfoque más colaborativo y bidireccional, donde los diferentes actores sociales (investigadores, comunidades, organizaciones, etc.) interactúan y co-construyen el conocimiento (Baber et al., 1995)

4.4 La gestión del riesgo de desastres (GRD).

La gestión del riesgo de desastres (GRD) es un enfoque integral y proactivo para reducir los riesgos y las consecuencias adversas de los peligros naturales y antrópicos (Naciones Unidas, 2015). Este concepto ha evolucionado desde una perspectiva centrada principalmente en la respuesta a emergencias hacia un enfoque más amplio que abarca la prevención, la mitigación, la preparación, la respuesta y la recuperación frente a los desastres.

Según la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (UNISDR, 2015) la gestión del riesgo de desastres se basa en tres pilares fundamentales:

Evaluación del riesgo: Implica el análisis y la comprensión de los peligros, las vulnerabilidades y las capacidades existentes en un territorio determinado. Esta evaluación permite identificar las amenazas potenciales y planificar acciones para reducir el riesgo.

Reducción del riesgo: Comprende medidas estructurales y no estructurales para prevenir o mitigar los efectos adversos de los desastres. Estas medidas pueden incluir obras de ingeniería, ordenamiento territorial, planificación urbana, educación y concienciación pública, entre otros.

Gestión de emergencias: Abarca la preparación, respuesta y recuperación ante situaciones de desastre. Implica la planificación y coordinación de recursos para responder de manera eficaz a las emergencias, así como la implementación de medidas de rehabilitación y reconstrucción posterior.

La gestión del riesgo de desastres se enmarca en un enfoque más amplio conocido como Reducción del Riesgo de Desastres (RRD), que busca integrar la gestión del riesgo en todas las políticas, planes y programas de desarrollo sostenible (UNISDR, 2015)

Autores como (St. Cyr, 2005) han destacado la importancia de considerar los factores sociales, económicos y políticos que influyen en la vulnerabilidad de las comunidades frente a los

desastres. Por su parte, (Mori et al., 2017) han desarrollado el concepto de "resiliencia" como la capacidad de un sistema para absorber, adaptarse y recuperarse de los impactos de un desastre.

Por tanto, la gestión del riesgo de desastres requiere un enfoque interdisciplinario y participativo, involucrando a diversos actores como gobiernos, comunidades locales, organizaciones no gubernamentales, sector privado y academia (UNISDR, 2015)

Modelación hidrológica HEC-HMS.

La modelación hidrológica es una herramienta fundamental para el análisis y la gestión de los recursos hídricos, que permite simular y predecir el comportamiento de los sistemas hidrológicos a partir de datos de entrada y parámetros (Singh & Woolhiser, 2003). Uno de los programas más utilizados para este fin es el HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System), desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE).

El HEC-HMS es un modelo hidrológico semi-distribuido que se basa en la representación de una cuenca hidrográfica como un sistema interconectado de componentes hidrológicos, como subcuencas, tramos de río, embalses y fuentes de escorrentía (US Army Corps of Engineers, 2018). Este modelo utiliza una serie de métodos y algoritmos para simular los procesos hidrológicos, incluyendo la precipitación, la infiltración, la evapotranspiración, el flujo superficial y el flujo subterráneo.

Uno de los aspectos clave del HEC-HMS es su capacidad para incorporar diferentes métodos de cálculo para cada componente hidrológico, lo que permite adaptar el modelo a las características específicas de la cuenca en estudio. Por ejemplo, para el cálculo de la escorrentía superficial, el modelo ofrece diferentes métodos como el Número de Curva del Servicio de

Conservación de Suelos (SCS), el Hidrograma Unitario del SCS, el método de Green-Ampt, entre otros (US Army Corps of Engineers, 2018).

Además, el HEC-HMS cuenta con herramientas de análisis y visualización de resultados, como la generación de hidrogramas, tablas y mapas, lo que facilita la interpretación y comunicación de los resultados obtenidos (US Army Corps of Engineers, 2018).

La aplicación del HEC-HMS en la modelación hidrológica ha sido ampliamente documentada en la literatura científica, con estudios que abarcan desde la simulación de eventos de inundación (Halwatura & Najim, 2013) hasta la estimación de caudales máximos para el diseño de estructuras hidráulicas (Ennouini et al., 2024)

Sin embargo, es importante destacar que la calidad de los resultados obtenidos con el HEC-HMS depende en gran medida de la disponibilidad y precisión de los datos de entrada, así como de la adecuada calibración y validación del modelo (Scharffenberg et al., 2018)

5. Metodología

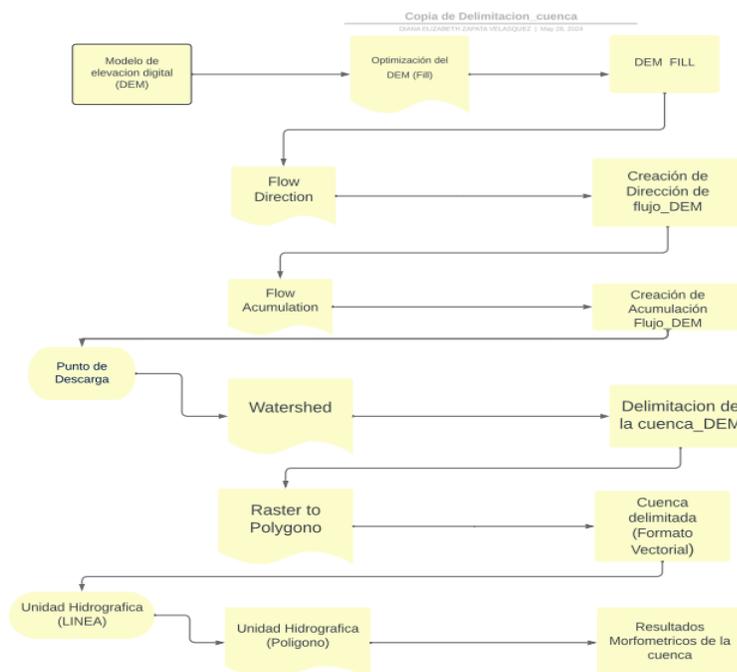
5.1 Área de estudio.

El área de estudio donde se realizó la modelación hidrológica y el estudio de aspectos climáticos, topográficos, uso del suelo e hidrológicos corresponde a la cuenca de la quebrada La Reina ubicada en el municipio de Caracolí Antioquia, esta quebrada nace en la vereda Cascaron, en las coordenadas N 06° 46' 48" y W 074° 46' 48" y desemboca en el Río Nus, al norte del casco urbano de Caracolí, en las coordenadas N 06° 24' 42.1" y W 074° 45' 13.7".

5.2 Delimitación de la cuenca mediante programa SIG.

Por medio de un Modelo de Elevación Digital DEM de 1 metros se llevó a cabo la delimitación de la cuenca mediante el software ArcGIS, el siguiente mapa describe los pasos que se llevaron a cabo en el programa para generar la delimitación de la cuenca y la red de drenajes.

Figura 2. Mapa conceptual paso delimitación de Cuenca ArcGIS.



5.3 Parámetros morfológicos de la cuenca.

Los parámetros de forma son aquellos aspectos básicos que representan la cuenca, constituyen la información mínima básica necesaria para conocer la naturaleza, características y comportamiento de la microcuenca de estudio.

Posterior a tener la delimitación de la cuenca se determinó los parámetros morfométricos generales mediante la calculadora de campos del software de ArcGis, por medio de esta herramienta se calculó el área total, perímetro, longitud máxima y parámetros de forma de la cuenca.

5.3.1 Ancho de la cuenca.

El ancho de la cuenca se calculó utilizando la relación del área total entre la longitud máxima de esta misma, por medio de la siguiente ecuación.

Ecuación 1

$$W = \frac{A}{L} \quad (1)$$

W: Ancho de la cuenca (km).

A: Área de la cuenca (km²).

L: Longitud de la cuenca (km).

5.3.2 Factor de forma Horton (Kf).

Posterior al cálculo del ancho de la cuenca se procede con el factor de forma de Horton, el cual se calcula con la siguiente ecuación.

Ecuación 2

$$Rf = \frac{A}{L^2} \quad (2)$$

Rf: factor de forma.

A: Área de la cuenca (km²).

L: Longitud de la cuenca (km).

Con el factor de forma de Horton se determinó cómo se regula la concentración de escorrentía superficial. Este factor manifiesta la tendencia de la cuenca a crecidas.

Cuando el factor forma (Rf) es similar a 1 representa una cuenca de forma redondeada mientras que cuando se acerca a cero representa una cuenca de forma alargada como lo describe la siguiente tabla.

Tabla 9: Relación de forma de Horton.

Rango valor	Forma de la cuenca
<0,22	Muy alargada
0,22-0,30	Alargada
0,30-0,37	Ligeramente alargada
0,37-0,45	Ni alargada ni ensanchada
0,45-0,60	Ligeramente ensanchada
0,60-0,80	Ensanchada
0,80-1,12	Muy ensanchada
>1,12	Rodeando el desagüe

5.3.3 Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius (Kc).

El coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc) describe la geometría de la cuenca y está estrechamente relacionado con el tiempo de concentración, este parámetro adimensional es la relación entre perímetro (km) y la superficie (km²) como lo describe la ecuación 3.

Ecuación 3

$$K = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (3)$$

K: Coeficiente de compacidad.

P: Perímetro de la cuenca (km).

A: Área de la cuenca (km²).

El Kc está relacionado con el tiempo de concentración, tiempo que tarda una gota de lluvia en moverse desde la parte más lejana de la cuenca hasta la salida. En este momento ocurre la máxima concentración de agua, puesto que están llegando gotas de lluvia de todos los puntos de la cuenca. Según el valor que tome este coeficiente la cuenca tendrá diferente forma como lo indica la siguiente tabla.

Tabla 10: índice de compacidad de GRAVELIUS.

Índice Kc	Descripción
1-1,25	Redonda - ovalo redonda
1,25-1,5	Ovalo redonda - ovalo oblonga
1,5-1,75	ovalo oblonga – rectangular oblonga
>1,75	Rectangular oblonga - Muy lobulosa

5.3.4 Parámetros del relieve.

Los parámetros de relieve son de gran importancia presentando más influencia sobre el comportamiento hidrológico que los parámetros de forma, de tal manera; a mayor relieve o pendiente, los procesos de escorrentía se producen en menor tiempo.

Estos parámetros son; cota máxima, cota mínima, altitud media y desnivel altitudinal y se determinaron mediante el software de ArcGIS.

5.3.5 Pendiente del cauce principal S_c .

La velocidad de escorrentía de las corrientes de agua en una cuenca hidrográfica depende de la pendiente de los canales fluviales. Cuanto mayor pendiente, mayor velocidad de flujo tendrá esta.

Teniendo los datos de la cota máxima- cota mínima y la longitud del cauce, se determinó el valor de la pendiente del cauce por medio de la siguiente ecuación.

Ecuación 4

$$S_c = \frac{Cota\ Maxima - Cota\ Minima}{LC} \quad (4)$$

Lc: Longitud del cauce principal (m)

Sc: Pendiente del cauce principal (m/m)

6. Tiempo concentración (Tc)

Se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida, punto de desagüe o punto de cierre. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado (Ramón et al., n.d.).

El tiempo de concentración final para cada cuenca se estimó como el promedio de los valores del tiempo de concentración de los diferentes métodos utilizados sin considerar los valores extremos, teniendo en cuenta, los valores por encima o por debajo del tiempo de concentración promedio de todos los métodos más o menos la desviación estándar.

Para estimar este tiempo de concentración se hizo uso de las siguientes ecuaciones.

Tabla 11. Ecuaciones para el cálculo de los tiempos de concentración, Tc (horas).

<p>A. Williams (1992)</p> $T_c = 0.683 \left(\frac{L \cdot A^{0.4}}{D \cdot S^{0.25}} \right)$ <p>L: Longitud del cauce principal en km A: Área de la cuenca en km² D: Diámetro de una cuenca circular en km S: Pendiente promedio del cauce principal en %</p>	<p>B. California Culverts Practice (1942)</p> $T_c = \left(0.87 \cdot \frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$ <p>L: Longitud del cauce principal en km H: Desnivel altitudinal del cauce principal en m (cota máxima menos cota mínima)</p>	<p>C. Johnstone y Cross (1949)</p> $T_c = 2.6 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.5}$ <p>L: Longitud del cauce principal en km S: Pendiente promedio del cauce principal en m/km</p>
<p>D. Témez (1978)</p> $T_c = 0.3 \left(\frac{L}{S_0^{0.25}} \right)^{0.76}$ <p>L: Longitud del cauce principal en km S: Pendiente promedio del cauce principal en %</p>	<p>E. Ventura-Heron (1949)</p> $T_c = 0.3 \left(\frac{L}{S_0^{0.25}} \right)^{0.75}$ <p>L: Longitud del cauce principal en km S: Pendiente promedio del cauce principal en %</p>	<p>F. Pérez – Monteagudo (1985)</p> $T_c = \frac{L}{72 \left(\frac{AE}{L} \right)^{0.6}}$ <p>L: Longitud del cauce principal en km A: Área de la cuenca en km² AE: Desnivel altitudinal del cauce principal en km (cota máxima menos cota mínima)</p>
<p>G. Giandiotti (1990)</p> $T_c = \left(\frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{25.3\sqrt{S} \cdot L} \right)$ <p>L: Longitud del cauce principal en km A: Área de la cuenca en km² S: Pendiente promedio del cauce principal en m/m</p>	<p>H. Kirpich (1990)</p> $T_c = 0.06628 \left(\frac{L}{S_0^{0.5}} \right)^{0.77}$ <p>L: Longitud del cauce principal en km S: Pendiente promedio del cauce principal en m/m</p>	<p>I. Bransby – Williams</p> $T_c = \frac{L}{1.5 \cdot D} \sqrt[5]{\frac{A^2}{S}}$ <p>L: Longitud de la cuenca en km A: Área de la cuenca en km² D: Diámetro de una cuenca circular en km</p>

		S: Pendiente promedio del cauce principal en %
J. Linsley $T_c = 0.06628 \left(\frac{L_c}{S_0^{0.5}} \right)^{0.77}$ Lc: Longitud de la cuenca en km S: Pendiente promedio del cauce principal en m/m	K. S.C.S – Ranser $T_c = 0.97 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$ L: Longitud del cauce principal en km H: Desnivel altitudinal del cauce principal en m (cota máxima menos cota mínima)	L. Snyder $T_c = 0.72(L \cdot \bar{L})^{0.3}$ L: Longitud del cauce principal en millas \bar{L} : Longitud por el cauce principal hasta el centroide de la cuenca en millas

7. Distribución espacial de la precipitación.

La precipitación incluye la lluvia, la nieve y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre. La formación de la precipitación requiere la elevación de una masa de agua en la atmosfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense (Ven Te Chow et al., 1993).

La precipitación al estar compuesta por tres mecanismos de elevación hace que sea una de las variables hidrológicas que encierra mayor complejidad en su análisis y en el estudio de su comportamiento espacial y temporal.

7.1 Datos Hidrometeorológicos.

Las estaciones pluviométricas de estudio se seleccionaron de acuerdo con la cercanía del lugar, dado que el municipio de Caracolí no cuenta con estas estaciones pluviométricas, se tomaron como referencia y por cercanía la estación; Virginias del municipio de Puerto Berrio y la estación Granja experimental del municipio de San Roque, con estas dos estaciones se descargaron la serie de datos de precipitación anual de más de 49 años de registro del (IDEAM-DHIME, 2024).

Tabla 12. Estaciones pluviométricas de estudio

Nombre-sector	Categoría	Longitud	Latitud	Pertenece
---------------	-----------	----------	---------	-----------

VIRGINIAS [23090020] GRANJA EXPERIMENTAL EL NUS - AUT [23085080]	Pluviométrica	6.3935555	74.6818056	IDEAM
	Pluviométrica	6.4835833	74.8366944	IDEAM

7.1.1. Mapa de precipitación media de la cuenca.

Con las estaciones meteorológicas seleccionadas para el lugar de estudio, los valores de precipitación multianuales y las coordenadas de estos puntos se estimó la distribución espacial de precipitación por los métodos de polígono de Thiessen e inverso a la distancia (IDW). Estos métodos generaron mapas que permitieron entender la distribución espacial de la precipitación a partir de un conjunto de puntos de muestreo.

Mediante el software ArcGIS se determinó los polígonos de Thiessen, con esta metodología se obtuvo una representación más simple y menos detallada del área de estudio, adecuada para datos discretos.

De la misma forma se determinó el IDW, contrario a los polígonos de Thiessen esta metodología ofrece una representación más detallada y continua de la precipitación, al considerar gradientes de cambio entre los puntos de muestreo.

7.1.2. Mapa de temperatura media multianual.

En Colombia la temperatura superficial del aire está fuertemente condicionada por la altura sobre el nivel del mar.

El mapa de temperatura se calculó a partir de la elevación de la cuenca sobre el nivel del mar, utilizando la ecuación de temperatura media para la región andina y el modelo de elevación digital (DEM) utilizado en la delimitación de la cuenca.

Región Andina:

Ecuación 5

$$T_{Media} = 29.42 - 0.0061H \quad (5)$$

7.1.3. Evapotranspiración.

La evapotranspiración es uno de los componentes más importantes del balance hídrico, representa la cantidad de agua saliente de la cuenca hacia la atmósfera en forma de vapor. Los métodos más confiables para estimar la evapotranspiración en Colombia se basan en las ecuaciones propuestas por Cenicafé y Turc. Estas ecuaciones se basan en función de la temperatura y la altura sobre el nivel del mar de la región de estudio (David et al., n.d.).

7.1.4. Evapotranspiración potencial.

Ecuación Cenicafé.

Esta metodología permite calcular la evapotranspiración potencial (ETP) dependiendo, solo de la elevación sobre el nivel del mar del área de estudio.

La elaboración de este mapa se realizó mediante el software de ArcGIS por medio de la calculadora de campos y con el ráster de altura sobre el nivel del mar se calculó la ETP de la cuenca La Reina.

Ecuación 6

$$ETP = 1700,17 \exp(-0,0002 h). \quad (6)$$

7.1.5. Evapotranspiración Real.

Budyko.

Posterior a tener el mapa de evapotranspiración potencial (ETP) se transforma a evapotranspiración real mediante la ecuación de Budyko.

Ecuación 7

$$ETR = (ETP * P * Tanh(\frac{p}{ETP}) * (1 - Cosh(\frac{ETP}{P}) + Senh(\frac{ETP}{P})))^{1/2} \quad (7)$$

Donde,

ETR: es la evapotranspiración real [mm/año],

ETP: es la evapotranspiración potencial (mm/año)

P: es la precipitación media en la cuenca (mm/año).

Mediante la calculadora de campos del software de ArcGIS, el mapa de precipitación media (p) y la evapotranspiración potencial (ETP) se determinó la evapotranspiración real (ETR) de la cuenca.

Turc.

La evapotranspiración real mediante la metodología propuesta por Turc está basada en un balance de masas, en función de elementos meteorológicos simples como la temperatura y la precipitación de la cuenca como lo presenta la siguiente ecuación.

Ecuación 8

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (8)$$

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

Donde,

ETR: es la evapotranspiración real (mm/año).

P: es la precipitación media en la cuenca (mm/año).

T: la temperatura promedio anual en °C.

L: función que depende de la temperatura.

8. Curvas de Duración Intensidad y Frecuencia (IDF)

Curvas IDF- Intensidad-duración-frecuencia ayuda predecir cuál puede ser la máxima precipitación en una determinada área. Son importante para poder averiguar los caudales de agua

que producen las cuencas en eventos extremos de manera que se pueda diseñar las obras de contención, drenaje de carreteras, alcantarillas y otras infraestructuras urbanas.

De la estación Granja experimental del municipio de San Roque se descargaron los datos de precipitación diaria para un periodo de 52 años (1973-2023) y de la estación Virginia del municipio de Puerto Berrio para un periodo de 47 años (1978-2023). Posteriormente se seleccionaron los valores máximos anuales de cada estación, con estos valores se procedió hacer el cálculo de los datos faltantes para determinar qué porcentaje de datos estaban disponibles para la construcción de las curvas IDF.

Las curvas IDF se calcularon por método simplificado. En este estudio se dedujeron curvas intensidad-duración-frecuencia por correlación con la precipitación máxima promedio anual en 24 horas, la precipitación total media anual y la elevación de la estación (Instituto Nacional de Vías, 2009).

Ecuación 9

$$I = \frac{a * T^b * M^d}{\left(\frac{t}{60}\right)^c} \quad (9)$$

Donde:

i: Intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h).

T: Periodo de retorno, en años.

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

t: Duración de la lluvia, en minutos (min).

a, b, c, d: Parámetros de ajuste de la regresión. Estos parámetros se presentan en la Tabla13

Tabla 13. Valores de los coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas intensidad-duración-frecuencia, IDF, para Colombia

REGION	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

9. Modelación hidrológica en HEC-HMS.

La modelación hidrológica de la cuenca de estudio se realizó mediante el software HEC-HMS 4.1.1, esta herramienta está diseñada para simular los procesos de precipitación y escurrimiento en cuencas y puede ser aplicado a un amplio rango de regiones geográficas, como, grandes cuencas sin intervención. Además, los resultados pueden ser aplicados para estudios de

disponibilidad de agua, drenaje urbano, observación de flujo, impacto de intervención en cuencas, reducción de daños por inundaciones, entre otros.

9.1 Tratamiento de datos.

Para realizar la modelación se recopiló información relacionada al sitio de estudio. Por medios electrónicos como bases de datos institucionales y gubernamentales como la NASA (National Aeronautics and Space Administration), el IGAC (Instituto Geográfica Agustín Codazzi), el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales).

Este modelo hidrológico funciona mediante diferentes métodos de estimación que se acoplan a las necesidades de cada estudio, se debe tener claridad en cuanto al objetivo que se desea estimar ya que el HEC-HMS puede modelar eventos de horas, días, meses y años.

Los métodos seleccionados para el presente trabajo fueron los siguientes:

9.1.1 modelo de pérdida (Loss).

Los modelos de pérdidas proporcionan una estimación precisa de la escurrimiento generada a partir de un evento de precipitación, teniendo en cuenta las diversas formas en que el agua puede ser absorbida y retenida en la cuenca hidrográfica. Aunque el modelo HEC-HMS tiene varias opciones para el modelado de pérdidas, para este estudio se seleccionó el método de pérdida del número de curva del Servicio de Conservación del Suelo (SCS) debido a su versatilidad ampliamente aplicable en la estimación de escurrimiento, requiere pocos datos de entrada y proporciona resultados confiables (Guduru et al., 2023).

Ecuación 10

$$P_e = \frac{(P - 0.2s)^2}{(P - 0.8s)} \quad (10)$$

donde, P_e es el exceso de lluvia (mm), P es la precipitación, S es la retención máxima potencial. La retención máxima potencial (S) es función del número de curva (CN) y es inversamente proporcional a CN . La retención máxima potencial viene dada por la ecuación (2).

Ecuación 11

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (11)$$

CN por su parte representa el número de curva, el cual es estimado en función del tipo de suelo y uso del suelo. El anterior parámetro se define para cada subcuenca y esto se realiza mediante un promedio ponderado en razón al área representativa y total de cada una de estas subcuencas mediante la siguiente expresión:

Ecuación 12

$$CN_{SC} = \frac{\sum A_i * CN_i}{A_T} \quad (12)$$

Donde A_i es el área del número de curva CN_i , A_T es el área total de la subcuenca y CN es el número de curva ponderado de la subcuenca.

9.1.2 Determinación del tipo de suelo y cobertura Vegetal.

Para determinar qué tipo de suelo y cobertura o uso del suelo que tiene el municipio de Caracolí, se hizo uso de la autoridad geográfica y catastral del país (IGAC, 2024), apartado

Colombia en mapas-Agrología, de allí, se descargaron las planchas de cobertura de tierra y suelos del departamento de Antioquia.

Posteriormente se realizó una extracción por máscara del área de estudio para el tipo de suelo y para la cobertura vegetal por medio de ArcGIS, de esta forma se pudo identificar la textura, uso del suelo, la cobertura vegetal y características que corresponden al municipio.

9.1.3 Curva número (CN).

la curva número se determinó teniendo en cuenta el tipo de suelo y la cobertura vegetal de la cuenca, para determinar qué tipo de suelo se ajustaba a las características de la zona de estudio se utilizó la descripción de los grupos hidrológico que se menciona a continuación.

Los CN están fuertemente relacionados con los suelos. todos los suelos estudiados se colocan en uno de cuatro grupos, A, B, C o D, siendo A el más poroso, el más profundo y el menos propenso a la escorrentía, y el D, el más superficial, de textura más fina y el más propenso a la escorrentía(Hawkins, 2009).

Los suelos del grupo **A** tienen un bajo potencial de escorrentía y altas tasas de infiltración incluso cuando están completamente mojados. Consisten principalmente en arena o grava profunda, bien o excesivamente drenada y tienen una alta tasa de transmisión de agua.

Los suelos del grupo **B** tienen tasas de infiltración moderadas cuando están completamente mojados y consisten principalmente en suelos de moderadamente profundos a profundos, de moderadamente bien a bien drenados con texturas de moderadamente finas a moderadamente gruesas. Estos suelos tienen una tasa moderada de transmisión de agua.

Los suelos del grupo **C** tienen bajas tasas de infiltración cuando están completamente humedecidos y consisten principalmente en suelos con una capa que impide el movimiento

descendente del agua y suelos con una textura de moderadamente fina a fina. Estos suelos tienen una baja tasa de transmisión de agua.

Los suelos del grupo **D** tienen un alto potencial de escorrentía. Tienen tasas de infiltración muy bajas cuando están completamente humedecidos y consisten principalmente en suelos arcillosos con un alto potencial de hinchamiento, suelos con un nivel freático alto y permanente, suelos con una capa arcillosa o arcillosa en la superficie o cerca de ella, y suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen una tasa muy baja de transmisión de agua.

La curva número para la cobertura vegetal se determinó teniendo en cuenta el uso del suelo y las condiciones de humedad correspondiente de lugar de estudio, las coberturas que más se presentan en este lugar son Mosaico de pastos con espacios naturales, Vegetación secundaria o en transición y Pastos limpios, la cuenca también se encuentra influenciada por zona urbana y por ríos. Teniendo en cuenta estas características y el grupo hidrológico determinado mediante el tipo de suelo y con ayuda de la siguiente tabla se pudo determinar el valor de la curva número para cada una de las subcuencas.

Tabla 14. Número de curva para condiciones medias de humedad

USO DE LA TIERRA	PENDIENTE	A	B	C	D
Barbecho R	≥ 3	77	68	89	93
Barbecho N	≥ 3	74	82	86	89
Barbecho R/N	< 3	71	78	82	86
Cultivos en hilera R	≥ 3	69	79	86	89
Cultivos en hilera N	≥ 3	67	76	82	86
Cultivos en hilera R/N	< 3	64	73	78	82
Cereales de invierno R	≥ 3	63	75	83	86
Cereales de invierno N	≥ 3	61	73	81	83
Cereales de invierno R/N	< 3	59	70	78	81
Rotación de cultivos pobres R	≥ 3	66	77	85	89
Rotación de cultivos pobres N	≥ 3	64	75	82	86
Rotación de cultivos pobres R/N	< 3	63	73	79	83
Rotación de cultivos densos R	≥ 3	58	71	81	85
Rotación de cultivos densos N	≥ 3	54	69	78	82
Rotación de cultivos densos R/N	< 3	52	67	76	79
Pradera pobre	≥ 3	68	78	86	89
Pradera media	≥ 3	49	69	78	85
Pradera buena	≥ 3	42	60	74	79
Pradera muy buena	≥ 3	39	55	69	77
Pradera pobre	< 3	46	67	81	88
Pradera media	< 3	39	59	75	83
Pradera buena	< 3	29	48	69	78
Pradera muy buena	< 3	17	33	67	76
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	≥ 3	45	66	77	83
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media	≥ 3	39	60	73	78
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal buena	≥ 3	33	54	69	77
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal pobre	< 3	40	60	73	78
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal media	< 3	35	54	69	77
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal buena	< 3	25	50	67	76
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) muy clara		56	75	86	91
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) clara		46	68	78	83
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) media		40	60	69	76
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) espesa		36	52	62	69
Masa forestal (bosques, monte bajo, ...) muy espesa		29	44	54	60
Rocas permeables	≥ 3	94	94	94	94
Rocas permeables	< 3	91	91	91	91
Rocas impermeables	≥ 3	96	96	96	96
Rocas impermeables	< 3	93	93	93	93

Posteriormente de la clasificación del grupo hidrológico del tipo de suelo y del valor de la curva número para los tipos de cobertura según las condiciones medias de humedad y el grupo hidrológico, se determinó el valor de CN_3 para cada subcuenca por medio de la siguiente ecuación.

Ecuación 13

$$CN_3 = \frac{23 * CN_2}{10 + 0.13 * CN_2} \quad (13)$$

9.1.4 transformar modelo (Transform).

El método seleccionado fue el Clark Unit Hydrograph este método relaciona el tiempo de concentración (TC) y el coeficiente de almacenamiento (R), este método se desarrolla para pequeñas cuencas permitiendo un análisis hidrológico más detallado.

Las ecuaciones que trabaja este método son más precisas para estimar el TC y R para el uso en la simulación de hidrogramas de descarga en pequeñas cuencas rurales y otras estructuras hidráulicas, determinando la seguridad de las estructuras (Straub et al., 2000).

La determinación del Tc y R se realizó teniendo en cuenta la longitud del tramo principal de la quebrada y la pendiente de la canal principal determinada a partir de elevaciones en puntos que representan 10 y 85 por ciento de la distancia a lo largo del canal. Estos valores se obtuvieron a partir de la delimitación de las subcuencas y de la red hídrica de la quebrada en el modelo HEC-HMS.

Con los valores obtenidos de las características de las subcuencas de longitud y pendiente se procedió a realizar el cambio de unidades a la requeridas por Clark para pequeñas cuencas. La longitud de los tramos cambio de unidades de [Km] a [mi] y de [m/m] a [pies/mi] para la pendiente (s).

Ecuación 14

$$Tc = 1,54l^{0,875} * s^{-0,181} \quad (14)$$

Ecuación 15

$$R = 16,41^{0,342} * s^{-0,790} \quad (15)$$

Donde,

L: es la longitud del arroyo medido a lo largo de la línea principal en millas (mi).

S: es la pendiente de la canal principal determinada a partir de elevaciones en puntos que representan 10 y 85 por ciento del canal en pies/millas.

9.1.5 Enrutamiento (Routing).

El enrutamiento en HEC-HMS es una herramienta fundamental para modelar el transporte del flujo de agua a través de los sistemas de ríos y canales, simulando la duración del flujo de agua a través de los reach y proporcionando información crucial para la gestión de recursos hídricos y la mitigación de desastres.

Para la modelación del movimiento del agua a través del cauce de La Reina se escogió el método de enrutamiento de canales Lag, el cual relaciona las variables de velocidad, longitud y tiempo.

En el modelo HEC-HMS se obtuvo las características de la quebrada, como la longitud en km y la pendiente en m/m de cada tramo de la quebrada, con estos datos se obtuvo la velocidad del flujo en función de la pendiente con la siguiente ecuación.

Ecuación 16

$$V = \sqrt{1,414 * P \left(\frac{m}{m} \right)} \quad (16)$$

Donde,

V: velocidad (m/s)

P: pendiente en (m/m)

Posteriormente se determinó el tiempo en minutos para cada uno de los puntos de concentración con la siguiente relación.

Ecuación 17

$$T = \frac{d}{v} \quad (17)$$

9.2 Hietograma de diseño de HUFF.

Analizando los eventos de tormenta observados, puede determinarse la secuencia temporal de precipitación en tormentas típicas. Huff (1967) desarrollo relaciones de distribución temporal para tormentas fuertes en áreas de hasta 400 mi² en Illinois(Ven Te Chow et al., 1993).

Con el hietograma de Huff se busca representar la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta, para poder proporcionan una forma de describir la variabilidad temporal de la precipitación en intervalos de tiempo específicos.

Los hietogramas de Huff típicamente se presentan en percentiles de 10%, 50% y 90%) que son las probabilidades de ocurrencias acumuladas, estos valores permiten evaluar la variabilidad temporal de la precipitación en diferentes eventos de tormenta(Ven Te Chow et al., 1993).

Con las curvas intensidad -duración - frecuencia (IDF) obtenidas por el método simplificado, se calculó la lámina acumulada total para periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años, tomando como referencia el tiempo de concentración de la cuenca como duración de

la tormenta. para este caso de estudio se seleccionó el patrón de distribución temporal más severo que corresponde a los del primer cuartil.

10. Resultados y análisis

10.1 Parámetros morfométricos generales.

Tabla 15: Parámetros morfométricos cuenca La Reina.

parámetros morfométricos		
Descripción: Cuenca La Reina	Unidades	Valor
De La Superficie		

Área de la cuenca	Km ²	5,126
Perímetro de la cuenca	Km	13,421
Longitud de la cuenca	km	3,64
Longitud por el cauce principal hasta el centroide	km	2,60
Ancho medio de la cuenca	km	1,407

Tabla 16. parámetros de forma de la cuenca La Reina.

Para este caso de estudio el resultado del factor de forma de Horton da un valor de 0.4 indicando que la cuenca tiene forma intermedia, es decir, ni alargada ni ensanchada, esto puede

Parámetros de forma de la cuenca			
		Valor	Observación
Factor de forma de Horton	K_F	0,4	Ni alargada ni ensanchada
Coefficiente de compacidad	K_C	1,7	ovalado oblonga – rectangular oblonga
Coefficiente de circularidad		0,4	Valor medio: ni redonda ni alargada

influir en que el agua tiende a fluir hacia fuera de la cuenca de manera más equilibrada, en lugar de acumularse en una parte específica de esta y la velocidad de flujo del agua es más moderada debido que el agua no tiene que recorrer distancias tan largas para llegar al punto de salida de la cuenca.

El coeficiente de compacidad de Gravelius fue de 1,7 indicando que es una cuenca ovalado-oblonga o rectangular oblonga, el comportamiento del agua en este tipo de cuenca tiende a estar más influenciado por la concentración del flujo de agua a lo largo del eje principal que es donde generalmente se encuentran los puntos de salida de la quebrada La Reina.

10.1.1 Parámetros del relieve.

Tabla 17. parámetros morfométricos de relieve cuenca La Reina.

parámetros morfométricos

Descripción: Cuenca La Reina Del Relieve	Unidades	Valor
Cotas		
Máxima	m.s.n.m	925
Mínima	m.s.n.m	597
Altitud		
Altitud media	m.s.n.m	767
Pendiente		
Pendiente promedio de la cuenca	%	9,00

10.1.2 Pendiente del cauce principal Sc.

Tabla 18. parámetros del cauce principal de la quebrada La Reina.

De La Red Hídrica		
Longitud del cauce principal	Km	4,24
Cotas		
Máxima	m.s.n.m	849
Mínima	m.s.n.m	635
Pendiente		
Pendiente del cauce principal	%	5
Pendiente del cauce principal	m/m	0,0505
Pendiente del cauce principal	m/km	50,472

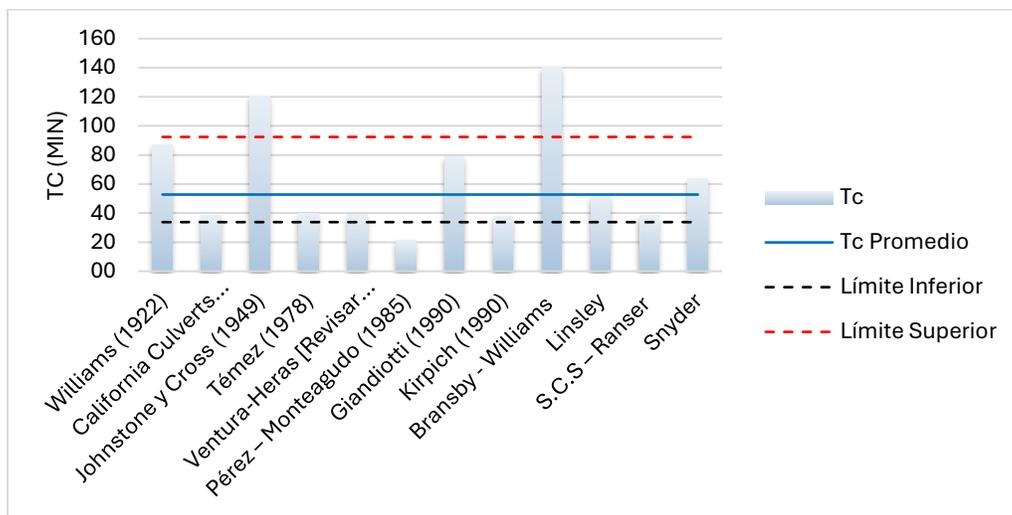
El cauce principal de la quebrada La Reina tiene una pendiente del 5% indicando una inclinación moderada, que puede afectar varios aspectos del comportamiento del agua, incluida la velocidad del flujo, la erosión, el transporte y acumulación de sedimentos.

10.2 Tiempo de concentración.

El tiempo de concentración final de la cuenca se determinó como el promedio de los valores del tiempo de concentración de los diferentes métodos utilizados sin considerar los valores extremos, es decir, valores por encima o por debajo del tiempo de concentración promedio de todos los métodos más o menos la desviación estándar.

Dando como resultado un tiempo de concentración final 0,879 horas, este tiempo se pasó a minutos con un resultado de 52,74 Minutos, para fines prácticos se redondeó a un tiempo de concentración de 55 minutos. El siguiente grafico representa las diferentes metodologías para determinar el tiempo de concentración.

Figura 3. Tiempos de concentración por diferentes metodologías para la cuenca La Reina.



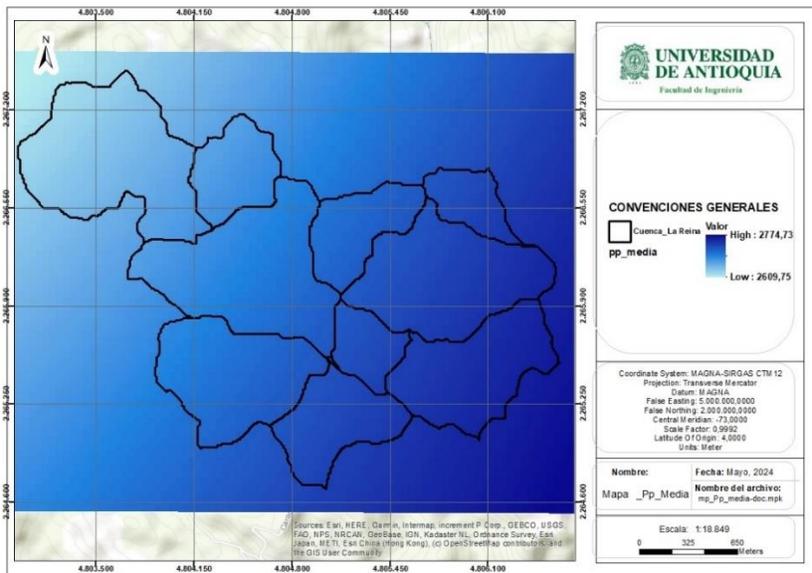
10.3 Precipitación Anual.

Figura 4. Precipitación media anual cuenca La Reina.



Mapa de precipitación media anual de la cuenca.

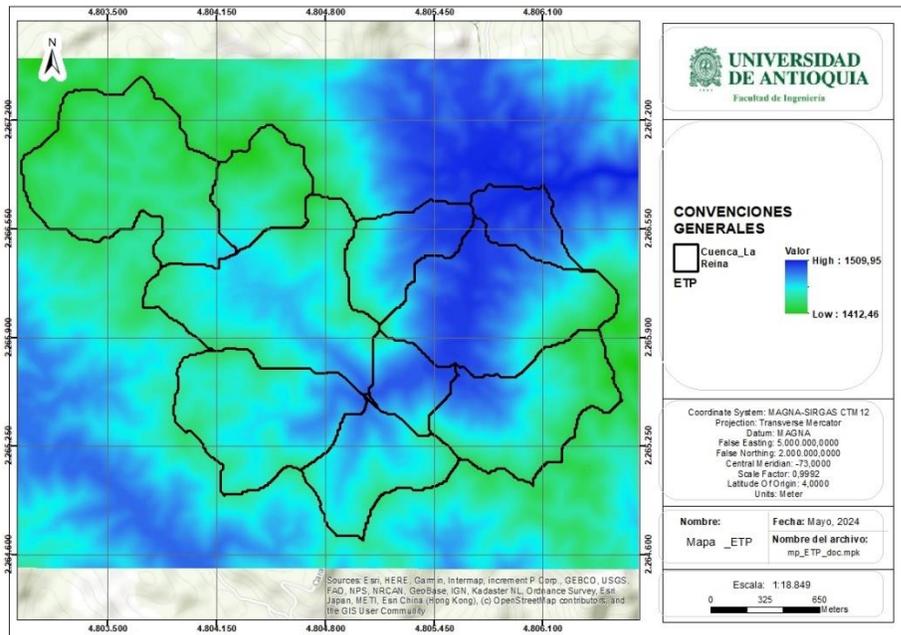
Figura 5. Mapa de precipitación media anual cuenca La Reina.



La precipitación media para la cuenca La Reina dio en un rango de 2609,75 (mm/año) valor mínimo y 2774,23 (mm/año) valor más alto, Este valor sitúa a Caracolí entre los municipios con

condiciones limitadas de agua. teniendo en cuenta factores climáticos como la temperatura, la radiación solar y la humedad relativa.

Figura 7. Mapa de evapotranspiración potencial (ETP) cuenca La Reina.

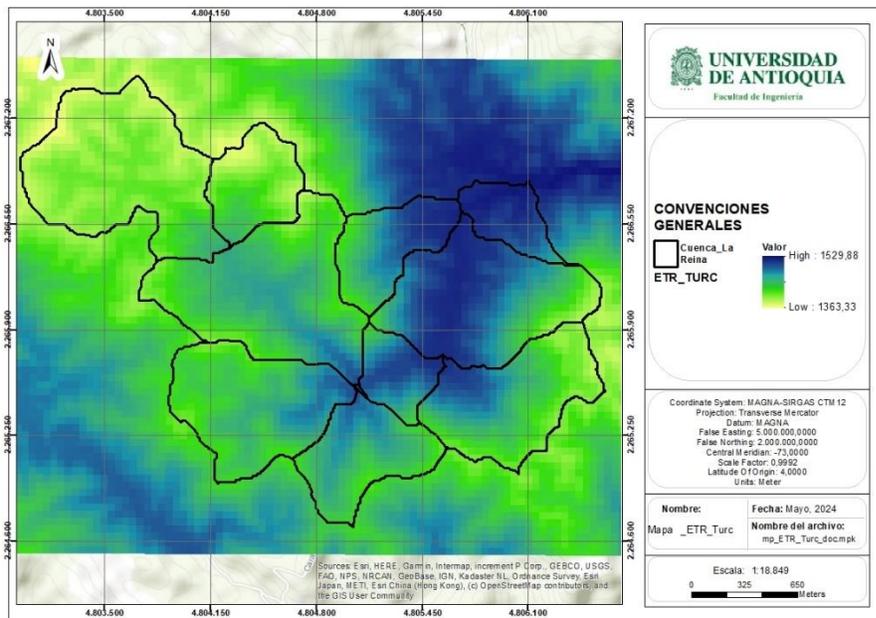


Mapa de evapotranspiración Real ETR.

Mapa ETR Budyko.

La ETR de la cuenca dio los valores de 1212,27 y 1289,61 (mm/año), siendo esta la limitación de agua real que las plantas y el suelo experimentan en la región. Estos valores de ETR sugieren que la región tiene una demanda significativa de agua, lo cual es común en climas con temperaturas moderadas a altas.

Figura 8. Mapa de evapotranspiración real por BUDYKO de la cuenca La Reina.



Curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF).

Resultados de la precipitación en la cuenca La Reina para un tiempo de 24 horas, en intervalos de 5 minutos por medio de las curvas IDF para diferentes periodos de retorno. Los resultados que se obtuvieron mediante estas curvas fueron con los que se determinó la precipitación total y luego la distribución de esa precipitación a lo largo del tiempo, usando las curvas de distribución de Huff. Este método proporciona una representación más realista de cómo se distribuye la precipitación durante un evento de lluvia, lo cual es crucial para la gestión de recursos hídricos.

Figura 10. Curvas IDF estación Virginias-Puerto Berrio.

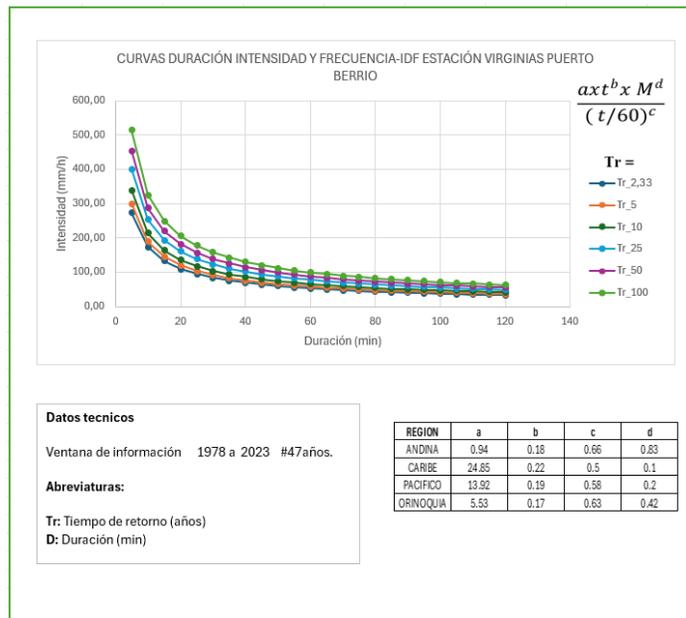
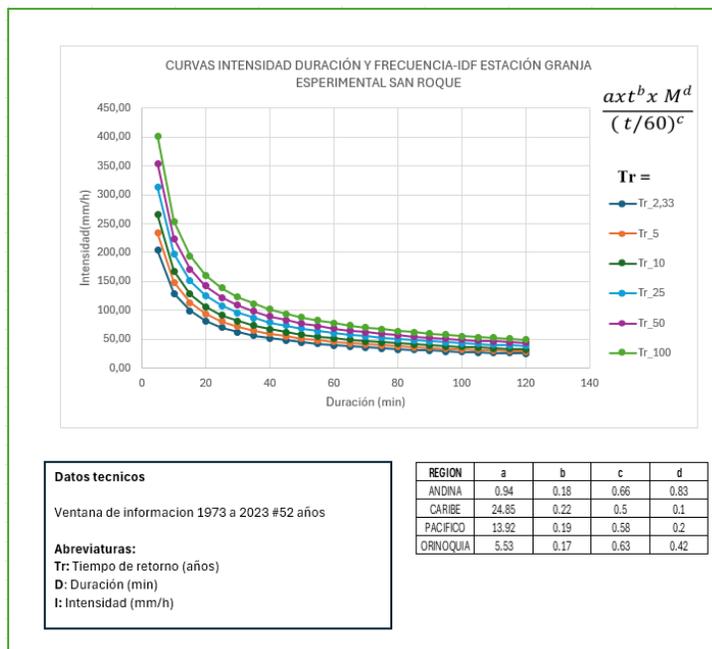


Figura 11. Curvas IDF estación Granja Experimental San Roque



Modelación

hidrológica HEC-HMS.

Quebrada La Reina.

La cuenca de la quebrada la Reina se discretizo en 11 subcuencas y en 5 tramos del cauce principal, la siguiente tabla muestra el área y longitud del cauce de cada una de estas subcuencas.

Figura 12. Mapa Subcuencas Quebrada La Reina.

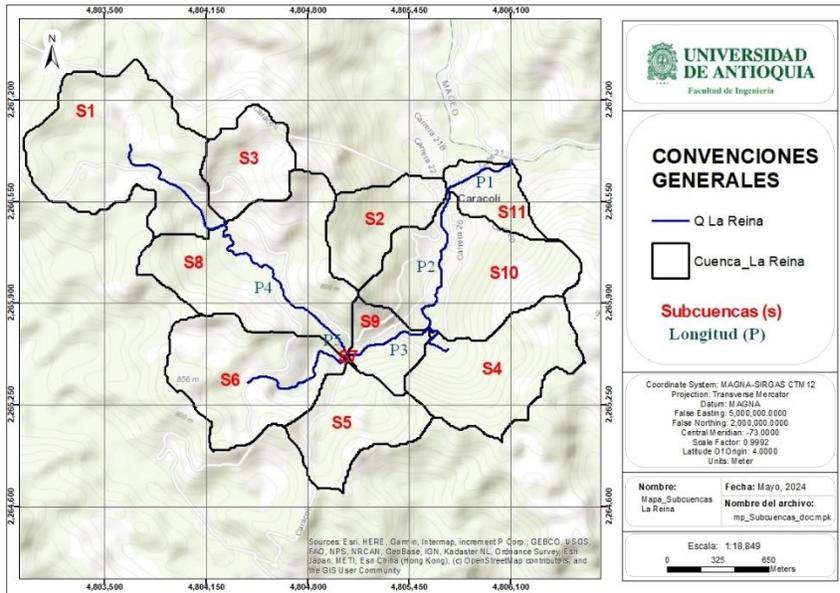
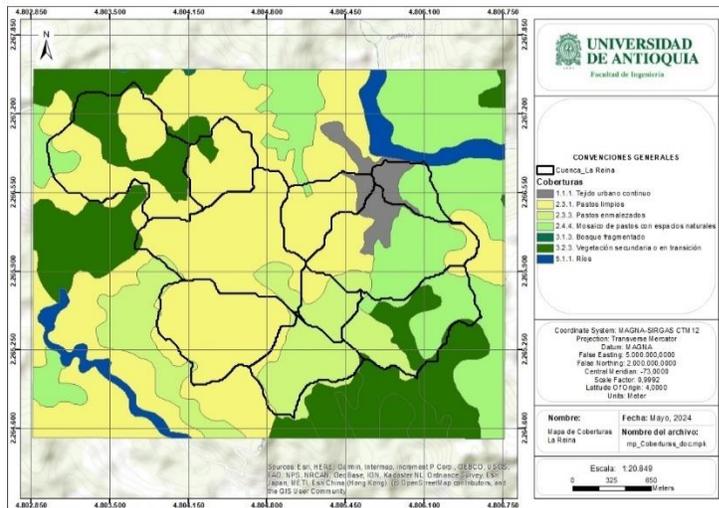


Tabla 19. Área de las Subcuencas de la quebrada LA reina.

Subcuenca	Área [km ²]
S_1	0,8755
S_2	0,3205
S_3	0,3013
S_4	0,5800
S_5	0,3917
S_6	0,6366
S_7	0,0021
S_8	0,876
S_9	0,1956
S_10	0,7589
S_11	0,1878

Mapa de pendiente.

Figura 15. Mapa Tipo de cobertura vegetal IGAC cuenca La Reina



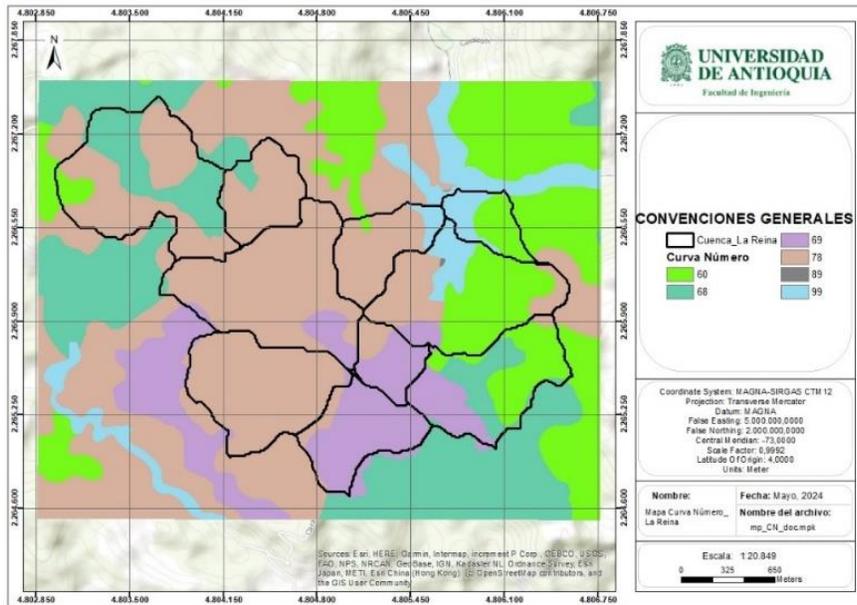
Mapa Curva número (CN).

Curva número para cada subcuenca determinados a partir del grupo hidrológica y de la tabla 12 de curva número para condiciones medias de humedad.

Se puede observar que los valores de CN de la cuenca varían en un rango de 60 a 99, siendo este último valor correspondientes a zonas urbanas.

Los valores de CN para cada subcuenca según el área y el número de curva se pueden observar en la tabla 23, CN2.

Figura 16. Mapa curva número-CN La Reina



Modelo de pérdida (Loss).

El CN3 estimado para cada subcuenca a partir del CN2 según condiciones medias de humedad fueron los siguientes.

Tabla 20. CN3 estimado para cada subcuenca a partir del CN2.

CN2		CN3		
Subcuenca	CN	CN	Initial abstraction	S
S_1	73,5	86,4	8,0	39,8
S_2	77,1	90,3	5,5	32,8
S_3	77,8	88,6	6,6	31,5
S_4	70	81,2	11,8	47,3
S_5	77	84,3	9,5	33,0
S_6	69	89	6,3	49,6
S_7	65,2	83,7	9,9	58,9
S_8	71,3	88,5	6,6	44,5
S_9	71,7	85,1	8,9	43,6
S_10	80,1	85,4	8,7	27,4
S_11	76,2	88,0	6,9	34,5

Transformar modelo (Transform).

Después de haber calculado los valores para el parámetro Loss se procedió a calcular las entradas del parámetro transform por el método de Clark Unit Hydrograph cuyos resultados son los siguientes.

Tabla 21. Tiempo de concentración [TC] y Coeficiente de almacenamiento [R].

Subcuenca	Tc [HR]	R [HR]
S_1	0,62	0,16
S_2	0,33	0,07
S_3	0,36	0,08
S_4	0,45	0,07
S_5	0,33	0,08
S_6	0,56	0,13
S_7	0,05	0,02
S_8	0,65	0,15
S_9	0,26	0,09
S_10	0,54	0,13
S_11	0,23	0,04

Los tiempos de mayor concentración del flujo los presentan la subcuenca S8 y S1, como se puede apreciar en la Tabla 19 estas dos subcuencas son las que mayor área representan, lo que está relacionado con tiempos mayores de concentración del flujo.

De igual manera los coeficientes de almacenamientos de estas dos subcuencas son los más altos, estos coeficientes nos indican un tiempo aproximado en horas en que se almacena y se libera el agua dentro de cada subcuenca.

Las subcuencas S7 y S11 son las que menor área representan, por lo tanto, los tiempos de concentración y de almacenamiento también son los de menor valor.

Enrutamiento (Routing).

Tabla 22. Longitud y Tiempo de tránsito para cada tramo de la Quebrada La Reina.

Reach	Longitud [km]	Longitud [m]	Tiempo [s]	Lag [minutos]
P_4	1,50265	1502,65	4380,99	73,02
P_5	0,03728	37,28	100,25	1,67
P_3	0,61929	619,29	2157,72	35,96
P_2	1,10109	1101,09	6385,84	106,43
P_1	0,5184	518,4	3326,04	55,43

Estos tiempos son los que tarda el agua en desplazarse por cada tramo, desde un punto aguas arriba hasta un punto aguas abajo en el curso de la Quebrada La Reina.

Los tiempos de tránsito más largos corresponden al tramo P4 y P2, siendo estos las distancias más largas en las que el modelo discretizo los tramos del cauce principal, por ende, los tiempos de recorrido del agua son más largos.

Tormenta de diseño a partir del hietograma de HUFF.

Para el componente de serie de datos de la precipitación se definió un tiempo de duración de tormenta de 55 minutos, el cual, corresponde al tiempo de concentración de la cuenca y se determinó las lamina acumuladas para cada periodo de retorno como lo representa la tabla 25.

Tabla 23. Periodo de retorno.

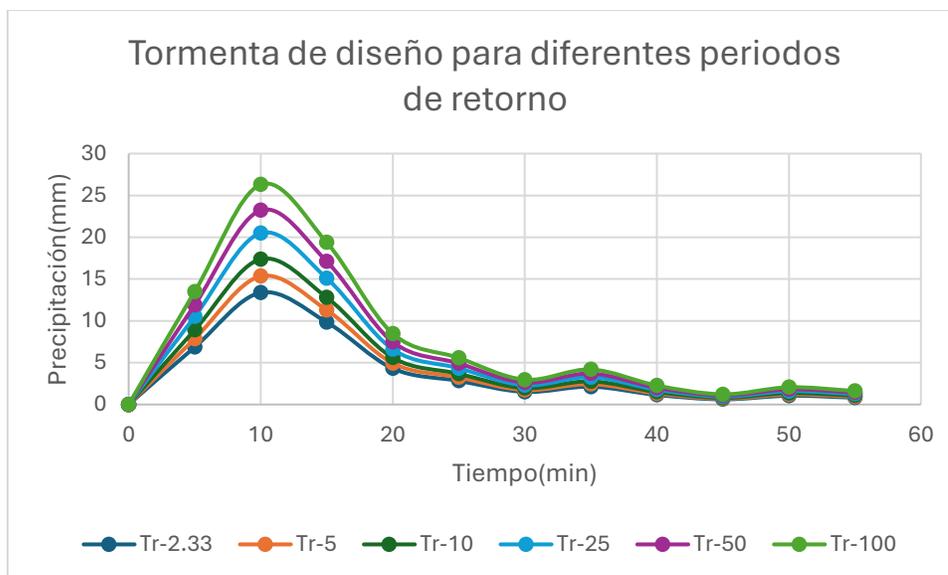
Periodo de retorno	Lamina [mm]
TR_2,33	44,50
TR_5	51,05
TR_10	57,84
TR_25	68,21
TR_50	77,27
TR_100	87,54

Posterior de tener la lámina de agua para cada periodo de retorno se determinó el intervalo de precipitación con una probabilidad de ocurrencia del 50% y se ingresaron estos datos de precipitación en el modelo para cada periodo de retorno.

Tabla 24. Intervalo de precipitación con probabilidad del 50% para cada periodo de retorno.

PROBABILIDAD DEL 50% DE PRECIPITACIÓN						
Tiempo [min]	2.33	5	10	25	50	100
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	6,86	7,87	8,91	10,51	11,91	13,49
10	13,37	15,34	17,38	20,49	23,22	26,30
15	9,85	11,30	12,80	15,10	17,11	19,38
20	4,31	4,94	5,60	6,60	7,48	8,48
25	2,83	3,25	3,68	4,34	4,92	5,57
30	1,51	1,73	1,96	2,31	2,62	2,97
35	2,13	2,44	2,77	3,27	3,70	4,19
40	1,15	1,32	1,50	1,77	2,00	2,27
45	0,62	0,71	0,81	0,95	1,08	1,22
50	1,05	1,20	1,36	1,60	1,81	2,06
55	0,82	0,94	1,07	1,26	1,43	1,62

Ilustración 17. Tormenta de diseño para diferentes periodos de retorno mediante hietograma de HUFF.



Resultados de Caudales [m³/s].

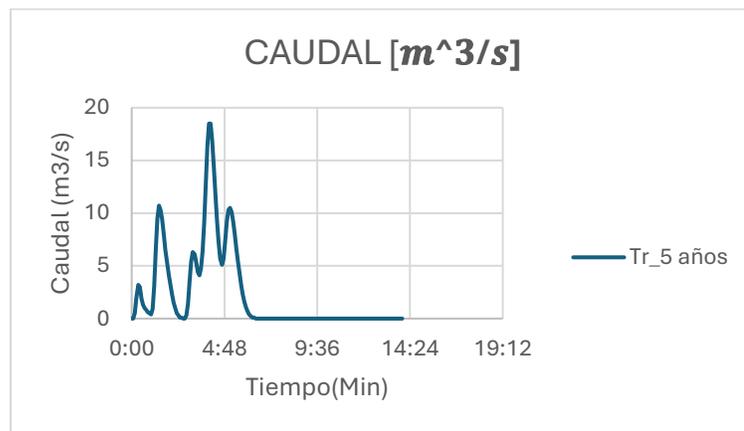
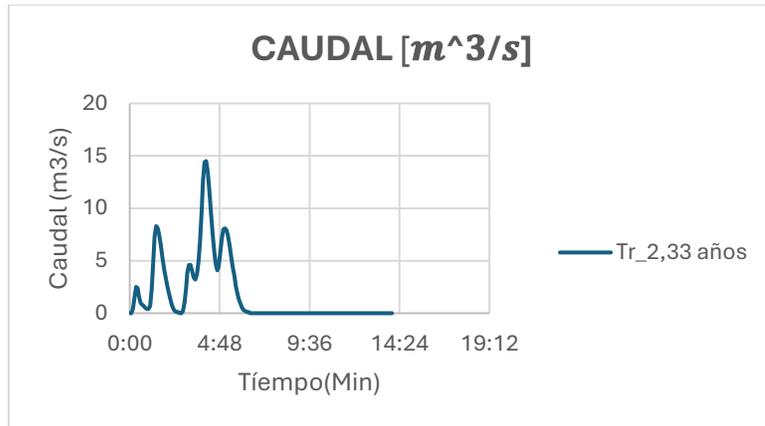
Una vez calculado todos los parámetros requeridos por el modelo, se realizó las simulaciones, obteniendo los siguientes resultados de caudales para los diferentes periodos de retorno de (2,33. 5. 10. 25. 50. 100) años mediante el modelo HEC-HMS como se muestra a continuación.

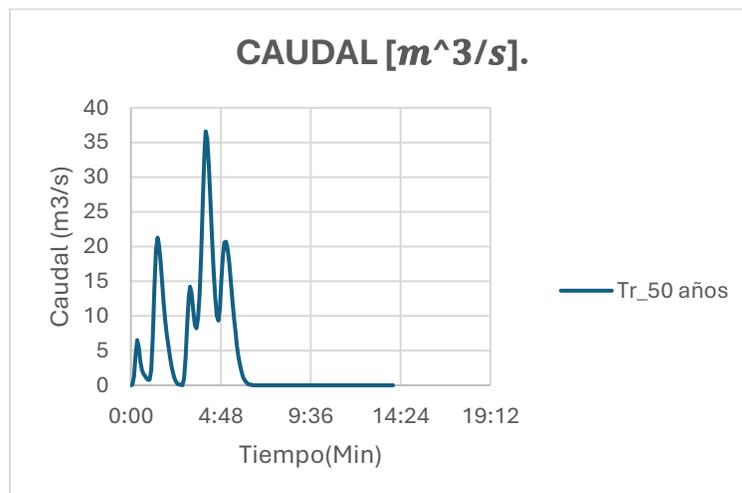
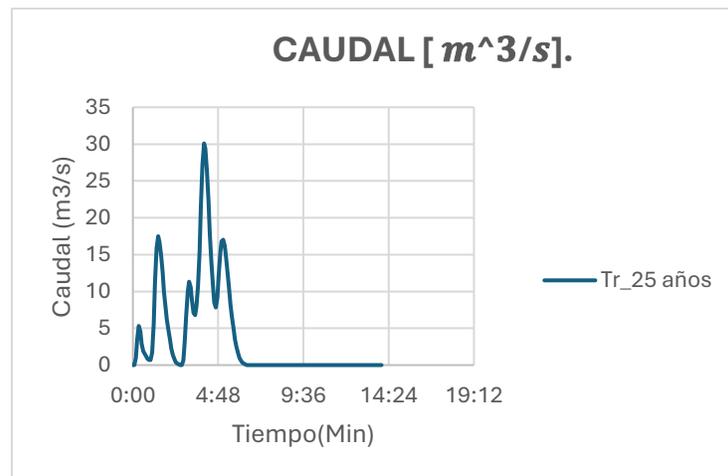
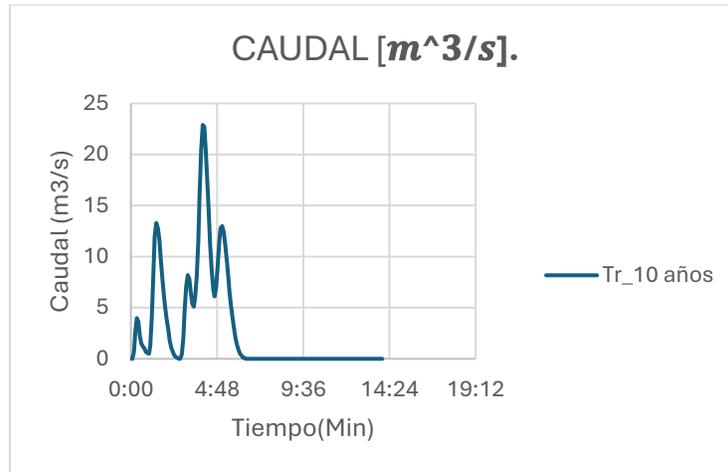
Los siguientes gráficos de hidrograma representa el comportamiento temporal del caudal en cada punto específico de la quebrada La Reina, durante un evento de lluvia o escorrentía,

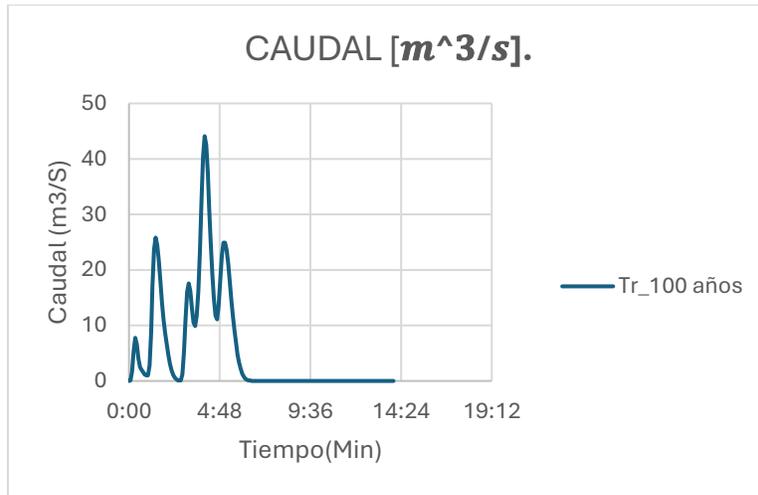
al comienzo (0:00 minutos) los hidrogramas representan caudales muy bajo o casi cero, indicando el estado inicial antes de que comience la lluvia significativa y a medida que pasa el tiempo, el caudal comienza a aumentar, lo cual corresponde al inicio de la lluvia y el incremento de la escorrentía superficial que llega a los puntos de medición.

Tabla 25. Caudales máximos para la cuenca La Reina.

TR (años)	CAUDAL MAXIMO (m³/s)
2,33	14,3
5	18,85
10	23,23
25	30,46
50	35,8
100	44,4







Este gráfico de tiempo de retorno de 100 representa los caudales máximos y como aumenta y disminuye el caudal en el punto de salida en el transcurso del tiempo.

La modelación que se realizó fue de tipo semi distribuida y en ella se puede ver los aportes de caudal en función de las velocidades de tránsito, a estas velocidades ser muy cortas en cada tránsito, se observó que rápidamente el agua que va precipitando empieza a salir de la cuenca, en el gráfico estos corresponden a los primeros picos que se observan, estos primeros picos no tienen aporte significativo en el caudal.

Las que si hacen aporte en el caudal máximo son las subcuencas s1, s3, s8 y s6, s5 que son las encargadas de generar el aporte del caudal pico de 44,4 (m^3/s) en aproximadamente 4 horas.

Conclusiones.

Los resultados en cuanto al tipo suelo indican suelos bien drenados, lo que corresponde a un grupo hidrológico tipo B, lo cual puede clasificarse como un suelo que presenta moderada infiltración contribuyendo a atenuar las crecientes.

El análisis de cobertura realizado en la cuenca permitió identificar cobertura de pastos limpios y pastos enmalezados, estas coberturas contribuyen a la generación de escorrentía, es decir, incrementan las crecientes.

El análisis conjunto del tipo de cobertura y tipo de suelo permitió determinar el número de curva promedio de la cuenca, el cual fue de 82 lo que representa una generación alta de escorrentía, incrementando la probabilidad de generación de inundaciones en el casco urbano de Caracolí.

Se determinó que los tiempos de tránsito en los canales del modelo hidrológico es inferior a 106 minutos y velocidades promedio de tránsito de 0,27 m/s.

Mediante las curvas IDF se determinaron las láminas de precipitación de diseño, las cuales se distribuyeron mediante las curvas de Huff y con ello se construyeron hietogramas para los periodos de retorno de 2,33-5-10-25-50-100 años.

Los resultados de los caudales máximos indican que las cuencas que se encuentran cercanas al punto de salida drenan muy rápido debido a las altas velocidades de tránsito, lo que genera que el caudal pico se atenué, sin embargo, se logró determinar que los mayores aportes provienen de las subcuencas de la parte alta los cuales se enfatizan en el tiempo y dan lugar al caudal máximo, que para el caso del periodo de retorno de 100 corresponde a 44,4 (m^3/s).

A partir del análisis realizado y la simulación hidrológica se determinó que la cuenca tiene un alto potencial de generación de escorrentía, principalmente, por el tipo de cobertura presente lo que aumenta el riesgo de inundación. Una estrategia que se podría implementar en la cuenca para

disminuir las crecientes, sería mediante la reforestación ya que dicha cobertura incrementaría la infiltración y con ello la disminución del caudal pico.

Los resultados de caudales máximos son esenciales para la prevención y alerta ante desastres como; inundaciones o avenidas torrenciales, también son importantes en el diseño de infraestructuras hidráulicas, puentes y sistemas de alcantarillado, ya que proporcionan una base para dimensionar estas estructuras de manera que puedan manejar de forma segura y eficiente los flujos de agua durante eventos extremos.

Referencias

- Alcántara-Ayala, I., & Moreno, A. R. (2016). Landslide risk perception and communication for disaster risk management in mountain areas of developing countries: a Mexican foretaste. *Journal of Mountain Science*, 13(12). <https://doi.org/10.1007/s11629-015-3823-0>
- Ana campos G., N. H.-N. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia*. Bogotá.
- Baber, Z., Gibbons, M., Limoges, C., Nowotny, H., Schwartzman, S., Scott, P., & Trow, M. (1995). The New Production of Knowledge: The Dynamics of Science and Research in Contemporary Societies. *Contemporary Sociology*, 24(6). <https://doi.org/10.2307/2076669>
- COLOMBIANO, e. (2018). 100 familias damnificadas por desbordamiento de quebrada en Caracolí, Antioquia. <https://www.elcolombiano.com/antioquia/afectaciones-por-temporada-invernal>.
- Chevallard, Y. (1998). La transposición didáctica. *La Transposición Didáctica - Del Saber Sabio al Saber Enseñado*.
- DAGRAN. (s.f.). Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Antioquia.
- David, J., Hernández, R. I. C., & Recursos, H. (n.d.). ALGUNAS METODOLOGÍAS PARA CUANTIFICAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIA MULTIANUAL EN COLOMBIA.
- DesInventar-Colombia. (2024). Sistema de Gestión de Información sobre Desastres.
- Ennouini, W., Fenocchi, A., Petaccia, G., Persi, E., & Sibilla, S. (2024). A complete methodology to assess hydraulic risk in small ungauged catchments based on HEC-RAS 2D Rain-On-Grid simulations. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06515-2>
- ETZKOWITZ, H. ;, & LEYDESDORFF, L. (1995). The Triple Helix: University-industry-government relations: A laboratory for knowledge based economic development. *EASST Review*, 14(1).
- Freire, P. (1970). *Pedagogia del Oprimido*. In Siglo xxi editores, s.a. de c.v.
- Gimeno-Sacristán, J. (1995). *El Currículum: Una Reflexión Sobre La Práctica*. In *El Currículum: una reflexión sobre la práctica* (Vol. 1).
- Guduru, J. U., Jilo, N. B., Rabba, Z. A., & Namara, W. G. (2023). Rainfall-runoff modeling using HEC-HMS model for Meki river watershed, rift valley basin, Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104743>
- Halwatura, D., & Najim, M. M. M. (2013). Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environmental Modelling and Software*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.03.006>
- Hawkins, R. (2009). *Curve number hydrology : state of the practice* (R. H. Hawkins, Ed.). Instituto Nacional de Vías. (2009). *Manual de drenaje urbano para carreteras*.

IDEAM-DHIME. (2024). Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos.

IGAC. (2024). Colombia en mapas-Agrología.

Lozano, M., Mendoza, M., Montaña, D., & Parra Sandoval, R. (2021). Apropiación Social del Conocimiento, Investigación Participativa y Construcción. *Revista Boletín Redipe*, 10(3). <https://doi.org/10.36260/rbr.v10i3.1219>

Mori, A. S., Lertzman, K. P., & Gustafsson, L. (2017). Biodiversity and ecosystem services in forest ecosystems: a research agenda for applied forest ecology. *Journal of Applied Ecology*, 54(1). <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12669>

Muñoz, G. A. A., Palacios, L. M., Guarín, H. P., & Castillo, H. S. V. (2023). Apropiación social del conocimiento. In *Apropiación social del conocimiento*. <https://doi.org/10.2307/ji.6047871>

Ramón, M., Blanquer, G., & Manuel, J. (n.d.). Métodos para la determinación del tiempo de concentración (tc) de una cuenca hidrográfica.

Rivero, I. Y., Vera Mogollón, D. E., & Ramón V, J. A. (2023). DIAGNÓSTICO TÉCNICO PRELIMINAR PARA EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ALERTAS TEMPRANAS ANTE EVENTOS HIDROGEOMORFOLÓGICOS CON ENFOQUE DE GOBERNANZA EN EL CORREGIMIENTO SAN BERNARDO DE BATA, TOLEDO NORTE DE SANTANDER. *REVISTA AMBIENTAL AGUA, AIRE Y SUELO*, 10(2). <https://doi.org/10.24054/aaas.v10i2.389>

Rubén Villodas. (2008). *Hidrología Manual de Cuencas*.

Scharffenberg, B., Bartles, M., Brauer, T., Fleming, M., & Karlovits, G. (2018). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual*. In *Hydrologic Engineering Centre*.

Singh, V. P., & Woolhiser, D. A. (2003). *Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. Perspectives in Civil Engineering: Commemorating the 150th Anniversary of the American Society of Civil Engineers*. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(2002\)7:4\(270\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(2002)7:4(270))

St. Cyr, J. F. (2005). At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability, and Disasters. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 2(2). <https://doi.org/10.2202/1547-7355.1131>

Straub, T. D., Melching, C. S., Kocher, K. E., & Groat, C. G. (2000). *Equations for Estimating Clark Unit-Hydrograph Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois In cooperation with the Illinois Department of Natural Resources, Office of Water Resources Water-Resources Investigations Report 00-4184*.

UNISDR. (2015). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030. Resolución Aprobada Por La Asamblea General El 3 de Junio de 2015*.

US Army Corps of Engineers. (2018). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual. Version 4.11. Hydrologic Engineering Centre. Hydrologic Engineering Centre, (Version 4.11)*.

Ven Te Chow, David R. Maidment, & Larry W. Mays. (1993). hidrología-aplicada.

Villagrán de León, J. C., Bogardi, J., Dannemann, S., & Basher, R. (2006). Early Warning Systems in the context of Disaster Risk Management. *Entwicklung and Ländlicher Raum*, 2.