



Análisis de la amenaza por inundación, por medio de la modelación hidráulica e hidrológica; Caso de estudio: Montelíbano, Córdoba

Natalia Arguello Coy

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental

Bogotá, 2023

Análisis del riesgo por inundación, por medio de la modelación hidráulica e hidrológica; Caso de estudio: Montelíbano, Córdoba

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Director (a):

Karel Aldrin Sánchez Hernández

Línea de Investigación:

1. Ingeniería para la sostenibilidad - grupo de investigación Agua, Salud y Ambiental
2. Gestión integral sustentable - Salud ambiental - grupo de investigación Choc Izone

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2023

Tabla de Contenido

1. Introducción	7
2. Problema	7
3. Pregunta de Investigación	8
4. Justificación	9
5. Objetivos	10
5.1. Objetivo General	10
5.2. Objetivos Específicos	10
6. Marcos de Referencia	10
6.1. Estado del arte	10
6.2. Marco Teórico y Conceptual	14
6.3. Marco Geográfico	15
6.4. Marco Institucional	16
6.5. Marco Legal Normativo	17
7. Metodología	18
7.1. Enfoque	18
7.2. Alcance	19
7.3. Método	19
7.4. Técnica	19
7.5. Instrumentos	19
7.6. Metodología Objetivo 1	20
7.7. Metodología Objetivo 2	20
Calibración de los modelos	20
Modelo hidrológico	21
Modelo Hidraulico	23
7.8. Metodología Objetivo 3	25
7.9. Metodología Objetivo 4	26
7.10. Matriz metodológica	27
8. Aspectos éticos	28
9. Resultados, Análisis y discusión de resultados	28
9.1. Objetivo específico 1	28

9.2. Objetivo específico 2	31
9.3. Objetivo específico 3	48
9.4. Objetivo específico 4	51
10. Conclusiones y recomendaciones	53
11. Referencias Bibliográficas	54

Listado de Figuras

Figura 1. Localización Montelíbano, Córdoba	15
Figura 2. Estaciones de precipitación aledañas al área de estudio	21
Figura 3. Categorías de amenaza en función de la combinación de variables de velocidad y profundidad	25
Figura 4. Climograma de Montelíbano y la cuenca Alta río San Jorge	29
Figura 5. Mapas de cambio del NDVI, Casco urbano, Montelíbano, Córdoba	30
Figura 6. Delimitación subcuencas del área de estudio	31
Figura 7. Series de precipitación máximas anuales 2000-2020	32
Figura 8. Curva IDF Estación Uré	33
Figura 9. Curva IDF Estación Puerto Libertador	34
Figura 10. Curva IDF Estación Pica Pica	34
Figura 11. Curva IDF Estación La Hacienda	35
Figura 12. Hietograma de diseño en (mm) para una duración de tormenta de 24 horas (Periodo de retorno 100 años), Estación Uré	36
Figura 13. Hietograma de diseño en (mm) para una duración de tormenta de 24 horas (Periodo de retorno 100 años), Estación Puerto Libertador	36
Figura 14. Hietograma de diseño en (mm) para una duración de tormenta de 24 horas (Periodo de retorno 100 años), Estación Pica Pica	37
Figura 15. Hietograma de diseño en (mm) para una duración de tormenta de 24 horas (Periodo de retorno 100 años), Estación La Hacienda	37
Figura 16. Modelo HEC-HMS	38
Figura 17. Hidrograma de crecida subcuencas de estudio 1, 100 años	39
Figura 18. Hidrograma de crecida subcuencas de estudio 2, 100 años	39
Figura 19. Hidrograma de crecida subcuencas de estudio 3, 100 años	40

Figura 20. Hidrograma de crecida subcuencas de estudio 4, 100 años	40
Figura 21. Hidrograma de crecida subcuencas de estudio 5, 100 años	41
Figura 22. Hidrograma de crecida subcuencas de estudio 6, 100 años	41
Figura 23. Hidrograma de crecida subcuencas de estudio 7, 100 años	42
Figura 24. Hidrograma de crecida subcuencas de estudio 8, 100 años	42
Figura 25. Hidrograma de crecida subcuencas de estudio 9, 100 años	43
Figura 26. Geometría asignada, modelo HEC-RAS, río San Jorge	44
Figura 27. Secciones transversales	45
Figura 28. Distribución de los resultados de velocidad para el RT 100 años	46
Figura 29. Distribución de los resultados de profundidad de la lámina de agua para el TR100	47
Figura 30. Crecimiento del área respecto al periodo de retorno	48
Figura 31. Distribución de las categorías de inundación asociada a la cuenca baja del río San Jorge	49
Figura 32. Distribución de las categorías de inundación asociada a el casco urbano de Montelíbano, Córdoba	50

Listado de tablas

Tabla 1. Referentes bibliográfica internacionales, nacionales y regionales	11
Tabla 2. Leyes y normativas referentes a la investigación	17
Tabla 3. Parámetros básicos de las curvas IDF para la región Caribe	22
Tabla 4. Valores de coeficiente de rugosidad-Cowan	24
Tabla 5. Matriz metodológica del trabajo de investigación	26
Tabla 6. Valores de clasificación NDVI	30
Tabla 7. Cálculo de longitud, pendiente y Número de curva por subcuencas	32
Tabla 8. Caudal pico para la cuenca principal el periodo de retorno de 100 años	43
Tabla 9. Cálculo del coeficiente de rugosidad de Manning para la cuenca evaluada	45
Tabla 10. Área total por categoría de amenaza	51

Análisis de la amenaza por inundación, por medio de la modelación hidráulica e hidrológica; Caso de estudio: Montelíbano, Córdoba

Resumen

El municipio de Montelíbano presenta una alta exposición a la amenaza por inundaciones debido a las intensas lluvias y el aumento del caudal del río San Jorge, los cuales han resultado en graves daños a la comunidad, siendo este municipio uno de los más afectados en el departamento de Córdoba. Esta situación se debe en gran medida a la carencia de una planificación del uso del suelo y a la obstrucción del lecho del río tanto en áreas urbanas como rurales del municipio. Es por este motivo que este trabajo de investigación buscó analizar la amenaza ante las inundaciones por medio de la modelación hidrológica e hidráulica; este objetivo se articuló en tres fases: la primera fue la caracterización de la zona de estudio con base en registros históricos; la segunda fase fue la construcción de los modelos en los softwares HEC HMS y RAS, junto con la zonificación de esta amenaza; finalmente, se formularon soluciones estructurales y no estructurales para minimizar la exposición a la amenaza de la comunidad ante un evento de inundación. Los resultados obtenidos permitieron estimar que la amenaza en la zona es de categoría alta, abarcando cerca de 14.6 hectáreas, correspondiente al 92% del área total estudiada, estos datos presentan gran utilidad como insumo para la formulación y diseño de soluciones de tipo estructural y no estructural para la toma de decisiones y aporte a la gestión del riesgo y la planeación de territorio dentro del municipio de Montelíbano, Córdoba.

Palabras Clave

Soluciones estructurales, Soluciones no estructurales, Inundaciones, Cuenca del Río San Jorge, Municipio de Montelíbano, Modelo hidrológicos, Modelo hidráulicos, amenaza

Abstract

The municipality of Montelibano presents a considerable risk due to the intense rains and the increase in the flow of the San Jorge River, which have resulted in serious flooding, making this municipality one of the most affected in the department of Córdoba. This situation is due to the lack of adequate land use planning and the obstruction of the riverbed in both urban and rural areas of the municipality. It is for this reason that this research work seeks to analyze the risk of flooding through hydrological and hydraulic modeling; This objective was articulated in three phases; The first was the characterization of the study area based on historical records; The second phase was the construction of the models in the HEC HMS and RAS software, along with the zoning of this threat; Finally, structural and non-structural solutions were formulated to minimize the risk that this community faces in a flood event. The results obtained allowed us to estimate that the threat in the area is of high category, covering 14,605 hectares, corresponding to 92% of the total area studied. The approach of solutions of this type makes it possible to reduce the risk of the community and prevent great damage to the infrastructure and the community; This work is useful as input for decision making and contribution to risk management and territorial planning within the municipality of Montelibano, Córdoba.

Keywords

Structural solutions, Non-structural solutions, Floods, San Jorge River Basin, Municipality of Montelibano, Hydrological model, Hydraulic model, hazard.

1. Introducción

La exposición a inundaciones es un desafío constante en muchas regiones del mundo, en el caso de Colombia, este es un país es propenso a sufrir inundaciones debido a su geografía montañosa, la cual favorece los deslizamientos de tierra e inundaciones en épocas de lluvias intensas. Además, su ubicación cercana al ecuador conlleva estaciones lluviosas que aumentan este riesgo (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2018). Los fenómenos climáticos como El Niño y La Niña también pueden perturbar los patrones de lluvia. Para el caso del municipio de Montelíbano, este está ubicado cerca a los ríos San Jorge y Sinú, los cuales tienden a presentar grandes aumentos de caudal en temporadas de lluvia, llegando a afectar significativamente al municipio (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2018).

Este trabajo de investigación se enfoca en el análisis del riesgo por inundación en Montelíbano, utilizando técnicas de modelación hidráulica e hidrológica. Las inundaciones representan una amenaza significativa para la población y la infraestructura de la región, y este estudio se propone examinar de manera detallada la distribución de la amenaza por inundación en el municipio, así como las posibles soluciones que podrían reducir los impactos de estos eventos naturales. A través de un riguroso análisis y la aplicación de herramientas de modelación, este trabajo busca proporcionar información valiosa que pueda ayudar a informar la toma de decisiones y mejorar la resiliencia de Montelíbano ante las inundaciones por medio del objetivo de analizar el riesgo por inundaciones en el municipio a partir de modelos hidrológicos e hidráulicos en la cuenca alta del Río San Jorge utilizando las herramientas HEC HMS, HEC RAS.

El presente documento está estructurado a partir del planteamiento del problema y la justificación de éste respecto a su aporte al ambiente en los aspectos sociales, económicos y ecológicos, junto con su aporte desde la aplicación de la ingeniería ambiental. Seguido de esto se planteó un objetivo general y los objetivos específicos necesarios para dar cumplimiento a este de forma efectiva. Dentro de los marcos de referencia, se realizó una revisión bibliográfica en cuanto a las teorías y conceptos relacionados con la gestión del riesgo de amenazas por inundación, las condiciones geográficas de la zona de estudios, los principales actores institucionales relacionados con el tema de investigación y, las leyes y normativas principalmente relacionadas con las inundaciones y el ordenamiento del territorio del municipio de Montelíbano. La metodología se planteó de acuerdo con cada objetivo, junto con el enfoque, el alcance, los instrumentos y técnicas necesarios para dar cumplimiento a estos. Los resultados, análisis y discusión se presentan también de acuerdo con cada objetivo. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones de acuerdo con la metodología y resultados obtenidos.

2. Problema

Colombia es un país que geográficamente cuenta con tres cordilleras y diversas planicies inundables (Sedano-Cruz et al., 2013). Al estar ubicado en una zona intertropical, el ciclo hidrológico del país ocasiona gran variación en la distribución temporal y espacial de las variables climatológicas como la precipitación y la lluvia (Sedano-Cruz et al., 2013). Según el IDEAM, en el año 2010, la superficie

inundable del país correspondía a 9,2% del territorio, lo cual indica que este tiende a sufrir catástrofes por inundaciones de forma frecuente (Sedano-Cruz et al., 2013); estas condiciones, junto con la variabilidad climática (VC) y el Cambio Climático (CC), han generado que los comportamientos de la precipitación se vean alterados, teniendo como consecuencia afectaciones económicas, ecológicas y sociales (Sedano-Cruz et al., 2013). A nivel nacional, bajo la Ley 1523 de 2012, donde adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, se han venido creando procesos sociales, enfocados en la creación, implementación, supervisión y revisión de políticas, estrategias y planes, entre otros aspectos, con el objetivo de adquirir conocimiento y disminuir el riesgo, así como gestionar situaciones de desastre en el país, a cargo esta misma entidad (Ley 1523, 2012).

Dentro de los principales riesgos que se contemplan en el Sistema Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres en Colombia, se registran las amenazas por inundación, las cuales según el Inventario histórico nacional de desastres, entre el año 1914 y 2019, tuvieron un equivalente al 30% de los desastres naturales, siendo el fenómeno con el mayor número de eventos registrados a nivel nacional, debido a la alteración en el comportamiento de las precipitaciones y con la intervención antrópica sobre las cuencas hidrográficas y la variabilidad climática, teniendo como resultado daños de infraestructura y la pérdida de vidas humanas (K. Cárdenas, 2018; Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2022).

En el departamento de Córdoba, según estudios del IDEAM, el 28% de territorio está en riesgo por inundaciones, cuyo principal agravante es el fenómeno de La Niña, con un aproximado de 295.731 hectáreas inundadas, en sus cuencas principales del río San Jorge y Sinú (J. Cárdenas, 2022). El valor vulnerabilidad del departamento ante este fenómeno es del 58,3%, siendo una la categoría de media/alta, por lo cual es necesario avanzar y fortalecer los estudios donde se detallen las amenazas y los riesgos dentro de este departamento y así apoyar a la gestión del riesgo y la organización del espacio geográfico (J. Cárdenas, 2022).

Uno de los principales municipios afectados por las inundaciones causadas por las altas precipitaciones y crecientes del río San Jorge es Montelíbano, debido a la falta de planeación territorial y las acumulaciones de cauce del río dentro de la zona urbana y rural del municipio. En los últimos años, este fenómeno ha tenido un alto porcentaje de damnificados y afectaciones estructurales; las cuales han despertado alertas por parte de la Oficina Municipal de Gestión del Riesgo, creando así la necesidad de crear e implementar enfoques que posibiliten disminuir el riesgo de la población ante futuras amenazas de este tipo (J. Cárdenas, 2022).

3. Pregunta de Investigación

A partir de la definición de la problemática planteada respecto a las amenazas por inundación que se presentan en el municipio de Montelíbano y el río San Jorge, este trabajo de investigación se plantea la pregunta sobre ¿Cómo se puede disminuir el riesgo del municipio de Montelíbano (Córdoba), ante la amenaza generada por las inundaciones del río San Jorge?

4. Justificación

La elaboración de un trabajo de investigación que proponga soluciones para reducir la exposición de inundaciones, a través de la modelación hidráulica e hidrológica en zonas propensas como Montelíbano, aporta significativamente a diversas áreas de la ingeniería ambiental, como la gestión de riesgos, la planificación urbana y la toma de decisiones por parte de la comunidad y las autoridades para asignar recursos y desarrollar políticas de manera adecuada. (IDEAM, 2018).

Respecto a la gestión del riesgo, la modelación ayuda a comprender los riesgos de la comunidad respecto a las inundaciones y del mismo modo, permite cuantificarlos, siendo un aspecto importante para la implementación de medidas preventivas y adecuadas dentro la zona de estudio. Con relación a la planificación urbana, los modelos proveen a las autoridades locales, información importante para la toma de decisiones en cuanto al expansión urbana, logrando prevenir daños, proteger vidas y propiedades, y garantizar un desarrollo sostenible en áreas propensas a inundaciones dentro del municipio (IDEAM, n.d.).

En cuanto a la calidad de vida, estos estudios tienen pertinencia respecto a la mejora de la seguridad y el bienestar de la comunidad que habita en el municipio, de manera que las acciones propuestas ayudan disminuir el riesgo de llegar a perder viviendas, pertenencias y, en casos extremos, vidas. Del mismo modo, la infraestructura de servicios básicos como el acueducto, alcantarillado, el saneamiento y la electricidad puede verse afectada por inundaciones; por lo que reducir los riesgos garantizan un acceso más constante y confiable a estos servicios, mejorando así la calidad de vida (*HIDROLOGÍA - IDEAM*, n.d.).

Desde el enfoque biopsicosocial, la investigación de soluciones ante el riesgo por inundación tiene implicaciones en aspectos que afectan la calidad de vida de la población. Este enfoque considera la interacción entre los aspectos biológicos como los efectos directos en la salud física de las personas; psicológicos como el estrés, ansiedad, depresión y otros problemas de salud mental debido a la pérdida de propiedades, la interrupción de la vida cotidiana y la incertidumbre; y sociales como poner a prueba la capacidad de la comunidad para proporcionar apoyo y resiliencia de esta (Guzmán & Maldonado, 2020).

Este estudio beneficia a la sociedad del municipio de Montelíbano, debido a que reducir el riesgo de inundaciones protege la vida y la seguridad de los residentes locales, ayuda a minimizar daños a las viviendas y propiedades, mejorando la calidad de vida de la comunidad y, reduce la exposición a aguas contaminadas, lo que evita la propagación de enfermedades transmitidas por esta (IDEAM, n.d.). En cuanto a el aporte económico, la reducción de las afectaciones por inundaciones se traduce en menos pérdidas económicas debido a daños a la propiedad y la infraestructura, contribuyendo a la estabilidad económica de la región, evitando interrupciones en la producción y el comercio de la zona.

La gestión adecuada del agua y la reducción del riesgo de inundaciones puede preservar los ecosistemas locales y la biodiversidad, permitiendo la conservación del entorno natural; aportando también a la mejora de la calidad del agua al reducir la erosión y la escorrentía de contaminantes (IDEAM, n.d.). En términos académicos, la investigación y la modelación hidráulica e hidrológica

permiten generar y comprender datos que contribuyen al conocimiento científico y académico en el campo de la hidrología y la gestión del agua a nivel local. Finalmente, este tipo de trabajos de investigación posee gran contribución en la toma de decisiones políticas basadas en datos objetivos, mejorando la creación e implementación de políticas públicas, fomentando también la cooperación entre gobiernos locales, regionales y nacionales (Cárdenas, 2018).

5. Objetivos

5.1. Objetivo General

Analizar la amenaza por inundaciones en el municipio de Montelíbano a partir de modelos hidrológicos e hidráulicos en la cuenca baja del Río San Jorge utilizando las herramientas HEC HMS, HEC RAS.

5.2. Objetivos Específicos

1. Caracterizar la información geográfica e hidrometeorológica de la zona del municipio de Montelíbano y la cuenca del Río San Jorge, con base en registros históricos.
2. Proponer modelo hidrológico e hidráulico de la cuenca del río San Jorge a la altura del municipio de Montelíbano, a partir de la herramienta HEC RAS y HMS.
3. Identificar las zonas de amenaza ante inundación en municipio de Montelíbano
4. Formular soluciones de acuerdo con las problemáticas encontradas en la evaluación de la amenaza.

6. Marcos de Referencia

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se construyeron marcos de referencia, los cuales ayudan a proporcionar una visión integral de los diversos campos de estudio relacionados con el análisis de la amenaza por inundaciones. Estos marcos de referencia son útiles para comprender y facilitar el análisis de la información, orientar la investigación y facilitar la toma de decisiones. Dentro de este capítulo se encuentra el estado del arte de la investigación, junto con los marcos teórico/conceptual, geográfico, institucional y legal/normativo.

6.1. Estado del arte

Para la elaboración de este trabajo de investigación se realizó una revisión bibliográfica dónde se tomaron en cuenta referentes internacionales, nacionales y locales; estos documentos de investigación permitieron el desarrollo de la exploración para la obtención de parámetros y lineamientos necesarios para la elaboración de un modelo de inundaciones en la zona de estudio. En la selección de estos referentes se utilizaron bases de datos como Google Scholar, Science Direct y el repositorio institucional de La Universidad El Bosque. Se filtró la búsqueda de documentos publicados desde el año 2010, dónde el tema de investigación estuviera relacionado con la gestión del riesgo, inundaciones, disminución del riesgo por inundaciones y modelación hidráulica e hidrológica, principalmente; los cuales se muestran en la Tabla 1. De igual forma, se revisó la información correspondiente al Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Montelíbano y el Plan de Ordenamiento y Manejo de la cuenca del Río San Jorge.

Tabla 1. Referentes bibliográfica internacionales, nacionales y regionales

Año de publicación	Autores	Título	Resumen	Contribución al trabajo de investigación
2012	Estrada Sifontes, Valentina, & Pacheco Moya, Rafael Miguel	Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba	Esta investigación habla sobre cómo la aplicación del HEC-HMS en la obtención de hidrogramas de inundaciones en algunas áreas de Cuba se ha llevado a cabo, pero hasta ahora, su implementación ha sido muy baja. Esta investigación proporciona recomendaciones específicas para la utilización del HEC-HMS en cuencas montañosas ubicadas en la región oriental de Cuba. Esto se logra a través de la aplicación del modelo en la cuenca Las Coloradas, lo que permite adquirir conocimientos sobre los métodos de cálculo más adecuados y los valores que deben asignarse a sus parámetros (Estrada & Pacheco, 2012)	Este documento muestra una metodología clara para la construcción de modelos con ayuda de HMS, dónde se nutren y complementan las fases de obtención de datos, calibración y construcción de los comportamientos hidrológicos e hidráulicos de una cuenca hidrográfica.
2018	Chagua Cierto, James Zosimo	Estudio de inundación de la zona correspondiente al distrito de Calango, provincia de Cañete, departamento de Lima, Mediante el uso de los modelos matemáticos HEC-HMS Y HEC-RAS	En esta investigación se realizó un análisis hidrológico e hidráulico en la cuenca del río Mala, donde se obtuvo un mapa de inundación del área de estudio. La metodología de este estudio fue por medio de la selección de datos de caudales y precipitaciones de la cuenca del río, para la posterior elaboración de los	Este documento permite entender la relación entre la simulación asistida por HEC RAS y HMS, para así explicar la forma en que se tratan los datos de precipitación, para lograr hacer una caracterización del riesgo de tal forma que sea cuantificable.

Año de publicación	Autores	Título	Resumen	Contribución al trabajo de investigación
			modelos con ayuda de los programas HEC RAS Y HMS, con los cuales se tuvo como resultado la caracterización de la zona con mayor vulnerabilidad (Chagua, 2018)	
2022	Triana Pulido, María Liseth Leal Cárdenas, Juan Sebastián	Propuesta sostenible para la mitigación del riesgo de inundación en la cuenca alta del río Combeima municipio Ibagué, Tolima	Este trabajo de investigación tuvo como objetivo el planteamiento de una propuesta para el control del riesgo en el río Combeima, por medio de soluciones basadas en la naturaleza; con una metodología basada en el uso de sistemas de información geográfica. Como resultado se obtuvo un análisis de comportamiento histórico de la zona y permitió sugerir medidas como la reforestación, entre otras (Triana & Leal, 2022).	Este trabajo de investigación proporciona información valiosa sobre las metodologías y técnicas utilizadas en la modelación hidráulica e hidrológica para mitigar el riesgo de inundación.
2018	Tavera Paredes, Andrea Carolina	Evaluación del impacto de la resolución de modelado en la simulación del evento de inundación de Mocoa en abril de 2017	En esta investigación, se analizó y detalló cómo la configuración de la resolución en términos de espacio y tiempo afecta la capacidad del sistema de modelación hidrológica EF5 y las estimaciones de precipitación satelital proporcionadas por los productos 3B42 y IMERG de la NASA para replicar de manera precisa la aparición, alcance y gravedad del suceso ocurrido en Mocoa,	Este trabajo de investigación proporciona información sobre la elección de datos y parámetros clave para la modelación hidráulica e hidrológica. Esto puede ayudar en la selección de datos relevantes y parámetros adecuados para el análisis de riesgo en la zona de estudio

Año de publicación	Autores	Título	Resumen	Contribución al trabajo de investigación
			ubicado en el suroeste de Colombia, en abril de 2017 (Tavera, 2018).	
2020	Oquendo Durango, Yarlidys	Dinámica de las inundaciones en el municipio de San Pelayo (Córdoba) desde su configuración espacial hasta la actualidad: una mirada desde la geografía histórica	En esta investigación, se examina el desarrollo y cambio a lo largo del tiempo de las inundaciones en el municipio de San Pelayo. Se puso un enfoque especial en las características físicas del área, como la topografía, la inclinación del terreno y el tipo de suelo, con el propósito de comprender las razones detrás de la ocurrencia de este fenómeno natural en el municipio. Además, se consideraron las estrategias de mitigación implementadas por las autoridades municipales y gubernamentales con el fin de contrarrestar los efectos de las inundaciones (Oquendo, 2020).	Esta investigación permite comparar cómo han evolucionado las inundaciones en San Pelayo a lo largo del tiempo junto con la identificación de las causas principales de estos eventos. Este análisis ayuda a determinar las similitudes en las causas entre San Pelayo y Montelíbano, lo que podría guiar la modelación hidráulica e hidrológica en esta zona de estudio.
2016	Arrieta Segura Esleider Jesús, Galván López Enrique Mario	Comportamiento espacio temporal de las inundaciones en el departamento de Córdoba y su relación con la precipitación. Periodo 1938 – 2015	Esta investigación realiza un análisis del comportamiento espacio temporal de las inundaciones en el departamento de Córdoba y su relación con la precipitación; proporcionado una base sólida de datos históricos y conocimiento para promover iniciativas dentro de la gestión de riesgos a nivel departamental(Arrieta & Galván López, 2017).	Este estudio permite analizar las inundaciones en largos periodos de tiempo, identificando patrones históricos de ocurrencia, frecuencia y magnitud de inundaciones en el departamento de Córdoba. Esto ayuda a comprender el riesgo en Montelíbano en función de la historia de inundaciones en la región.

6.2.Marco Teórico y Conceptual

Mediante la recolección y consulta de distintas investigaciones, se realizó la consideración de teorías y conceptos relacionados con el tema de análisis de amenazas por inundaciones, los cuales muestran distintos criterios y puntos de vista para el correcto desarrollo de este trabajo de investigación. Este apartado se construyó a partir del tema general de Gestión del Riesgo, pasando al tema central de Inundaciones y Modelos, llegando finalmente al tema específico de soluciones para la disminución de la exposición ante la amenaza.

El *riesgo* se refiere a las posibles consecuencias negativas que pueden surgir como resultado de eventos peligrosos de diversas naturalezas, ya sean de origen natural, socio-natural, biosanitario o humano no intencional. Estos eventos se consideran en un período de tiempo particular y están influenciados por la susceptibilidad de los elementos que se encuentran expuestos a dichos eventos (Ley 1523, 2012). La *gestión del riesgo* de desastres surge como una iniciativa gubernamental que tiene como objetivo asegurar el desarrollo efectivo del territorio del país en momentos de emergencias, la cual, según Lavell (2001), relaciona acciones, estrategias y procesos diseñados para identificar, evaluar, mitigar y controlar los riesgos potenciales, para la posterior creación de políticas, instrumentos y medidas en contra de las consecuencias peligrosas sobre aspectos como la población, el ambiente, juntos con sus bienes y servicios (Rojas & Martínez, 2011)

Dentro de los principales fenómenos naturales que se encuentran en el estudio de la gestión del riesgo, se contemplan las *inundaciones*, las cuales se definen como aquellos eventos hidrológicos recurrentes que tienen el potencial de causar daños significativos y forman parte del proceso natural de un río. Estas inundaciones se originan debido a lluvias persistentes y extensas, las cuales provocan un aumento gradual del nivel del agua dentro de un cauce, alcanzando la altura de sus márgenes naturales o construidos, lo que resulta en un desbordamiento y expansión del agua sobre las áreas llanas y regiones cercanas a los cursos de agua, que normalmente no se encuentran sumergidas (IDEAM, n.d.).

Existen distintos tipos de inundaciones. Por un lado, las *inundaciones lentas*, que suelen ocurrir en las regiones llanas de los ríos y en valles aluviales extensos. En estas inundaciones, los aumentos diarios en el nivel del agua son bajos, del orden de centímetros. Aunque afectan grandes extensiones de tierra, generalmente causan pocas pérdidas de vidas humanas. La duración de su impacto puede durar meses (IDEAM, n.d.).

Por otro lado, están las *inundaciones repentinas*, conocidas como crecientes súbitas. Aunque afectan áreas más pequeñas, tienen un potencial destructivo mayor y causan la mayoría de las pérdidas de vidas cuando se producen. Estas inundaciones responden rápidamente a intensas precipitaciones en las partes altas de las cuencas. Los aumentos en el nivel del agua pueden ser del orden de metros en cuestión de horas, y su impacto en las zonas afectadas suele durar sólo unas pocas horas o días; este tipo de inundaciones se presenta en todas las cuencas de alta pendiente (IDEAM, n.d.).

Para analizar el comportamiento de estos sistemas hídricos, se requiere de la comprensión de distintas variables de los hidrosistemas, los cuales llegan a ser representado y simulados por medio de la

modelación hidrológica, las cual permite dar soporte a la toma de decisiones sobre la correcta gestión del recurso hídrico, por medio de un análisis integral. Estas simulaciones permiten estimar datos de caudal y del ciclo hidrológico, teniendo en cuenta factores como la variabilidad climática, escenarios extremos, cambio climático y cambio de la cobertura, entre otros cambios del comportamiento de la cuenca a analizar (IDEAM, n.d.).

Esta modelación se realiza por medio de una representación simplificada de un sistema complejo, ya sea en una forma física o en términos matemáticos; en estos modelos se representa el *ciclo hidrológico* de las cuencas hidrográficas. De esta manera se pueden tomar decisiones en temas relacionados con la hidrología; los resultados de estos modelos cambian dependiendo del alcance de cada uno, dónde algunos buscan predecir los comportamientos de escorrentías en periodos mensuales y otros buscan entender el comportamiento de tormentas de forma individual, teniendo como principal resultado hidrogramas (IDEAM, n.d.).

6.3.Marco Geográfico

Montelíbano es un municipio ubicado en el sur del departamento de Córdoba, Colombia, localizado en la zona derecha del río San Jorge, como se muestra en la Figura 1. Está ubicado a los 7° 59' 13" de Latitud Norte y a 75° 25' 30" de Longitud Oeste y a 55 metros sobre el nivel del mar. En cuanto a su clima, Montelíbano tiene un clima tropical, con veranos cortos y cálidos, e inviernos largos, calurosos y húmedos, dónde su temperatura promedio es de 28°C y se encuentra dentro de la zona de vida de bosque húmedo tropical. Respecto a sus precipitaciones, según el IDEAM, son de 2.500mm, con periodos de lluvia entre mayo y septiembre. El territorio del departamento se divide en un 60% de extensas llanuras caribeñas y el restante se caracteriza por las últimas prolongaciones de la cordillera de los Andes, lo que da lugar a la existencia de una variedad de climas.(Alcaldía de Montelíbano, 2000).

Localización Montelíbano y delimitación de la cuenca del río San Jorge, Córdoba

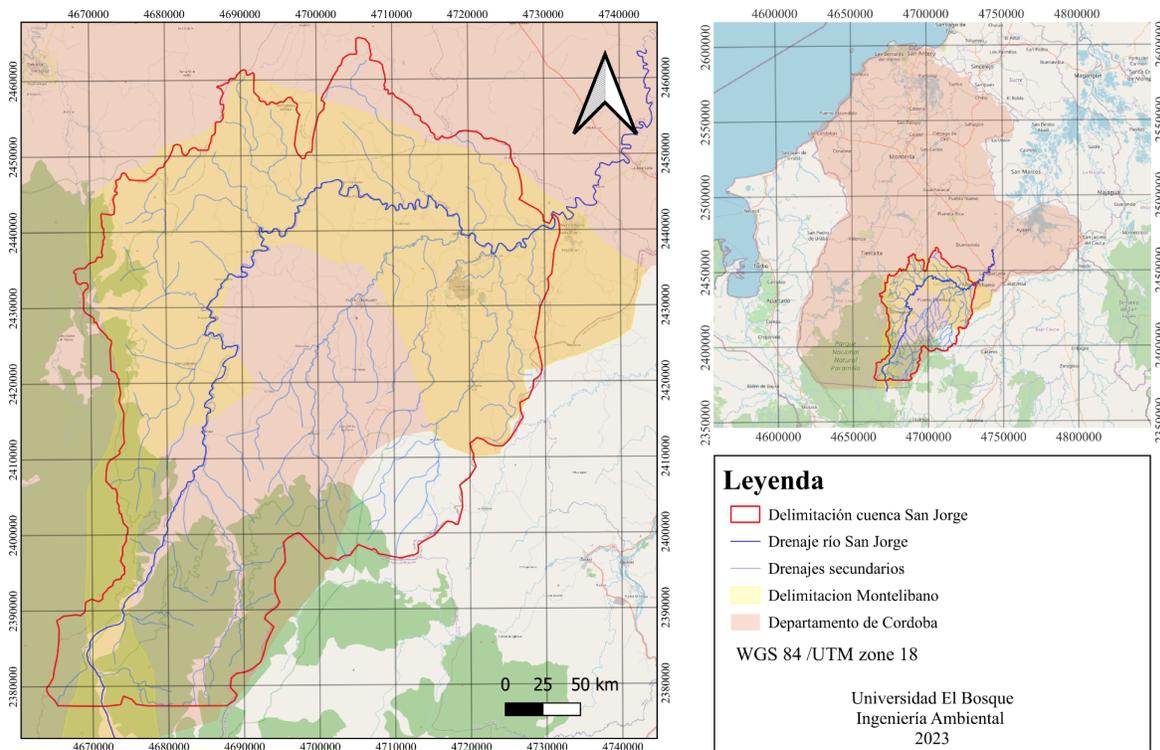


Figura 1. Localización Montelíbano, Córdoba

El desarrollo económico del departamento se dirige principalmente hacia la agricultura y la minería, con el comercio y la industria como fuente complementaria. Respecto al municipio de Montelíbano, su economía está clasificada dentro del sector primario con actividades de ganadería extensiva, pesca y aprovechamiento de maderables, y el sector secundario con actividades como la industria de ferróniquel y el comercio (Viloria de La Hoz, 2007).

6.4. Marco Institucional

En el contexto del municipio de Montelíbano, Córdoba, se ha identificado una creciente preocupación por el riesgo ante las inundaciones que se presentan. Dentro del desarrollo de esta investigación se consideraron distintos actores y entidades directamente relacionados con la zona y el tema de estudio, a partir de sus objetivos institucionales e intereses, los cuales se enuncian a continuación:

- **Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS)**

Es el principal encargado de la administración del ambiente y de los recursos naturales renovables del país. Su función principal es dirigir y regular la planificación ambiental del territorio, así como establecer las directrices y normativas que regirán la recuperación, preservación, protección, organización, gestión, utilización y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales renovables y del entorno nacional. Esto se hace con el propósito de asegurar

un desarrollo sostenible, sin perjuicio de las responsabilidades atribuidas a otros sectores (Decreto 3570, 2011).

- **Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD)**

Esta es la organización responsable de supervisar la totalidad del Sistema Nacional y de liderar la ejecución de la Gestión del Riesgo, asegurando la conformidad con las políticas y regulaciones internas, así como el desempeño de las funciones estipuladas en el Decreto-Ley 4147 de 2011 (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2014).

- **Corporación Autónoma Regional De Los Valles Del Sinú Y Del San Jorge (CVS)**

Es una entidad con el objetivo de gestionar de manera eficiente y apropiada la preservación, resguardo y manejo de los recursos naturales y del entorno, con el fin de promover el desarrollo sostenible del departamento de Córdoba. Esto se logra a través de la gestión ambiental y la participación de la comunidad (CVS, 2016)

- **Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales**

Es un establecimiento público y autónomo, con el objetivo de proporcionar los conocimientos, datos y la información ambiental necesarios para satisfacer las necesidades de las demás entidades ambientales, como el SINA; con el fin de respaldar a las corporaciones en el desempeño de sus responsabilidades relacionadas con la organización, gestión y utilización de los recursos naturales renovables en su respectiva zona (Ley 2241, 1995)

- **Gobernación de Córdoba**

Es una entidad que tiene como fin la promoción del desarrollo económico, social y sostenible del territorio; Mediante la aplicación de políticas, programas y proyectos que generan un impacto en el ámbito social como en el ambiental. Esto se hace con el objetivo de respaldar el desarrollo tanto agropecuario como industrial del departamento. Presentando atención a las necesidades de la población de Córdoba y garantiza el acceso a servicios esenciales para la población vulnerable, incluyendo a las víctimas, así como para todos los grupos de población que residen en el departamento, con la finalidad de mejorar su calidad de vida (Gobernación de Córdoba, n.d.)

- **Alcaldía de Montelíbano**

El objetivo de la alcaldía es gestionar los intereses del municipio de manera eficiente y transparente, trabajando en colaboración con la comunidad y valorando y respaldando sus propuestas en diversos ámbitos. Con el objetivo de abordar las necesidades más apremiantes de los residentes de Montelíbano, con la meta de mejorar su calidad de vida y garantizar un futuro próspero para todos los habitantes (Alcaldía de Montelíbano, 2000).

6.5. Marco Legal Normativo

Dentro de la construcción del marco normativo para la investigación, se tuvo una visión general de las leyes, reglamentos y disposiciones relevantes que tienen jurisdicción dentro del río San Jorge y el municipio de Montelíbano. Estas leyes se enuncian en la tabla a continuación:

Tabla 2. Leyes y normativas referentes a la investigación

Ley 99 de 1993	Esta ley establece el marco general para la gestión ambiental en Colombia y crea el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial como la entidad encargada de coordinar la política ambiental del país. La ley también establece los principios y criterios para la gestión del agua, incluyendo la protección de las fuentes hídricas y la gestión integrada de los recursos hídricos (Ley 99, 1993)
Ley 1523 de 2012	Esta ley establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y regula la prevención, preparación, atención y recuperación frente a eventos adversos como inundaciones, sequías y deslizamientos. La ley también establece la obligación de las entidades territoriales de elaborar planes de gestión del riesgo que incluyan la gestión del agua (Ley 1523, 2012)
Resolución 963 de 2013	Esta resolución establece las directrices para la elaboración de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) en Colombia, que son los instrumentos de planificación que regulan el uso del suelo y la gestión del territorio en los municipios del país. La resolución establece la obligación de incluir el componente de gestión del agua en los POT y de utilizar el modelado hidrológico para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgos asociados a los recursos hídricos (Resolución 963 del 2013).
Resolución 2115 de 2007	Esta resolución establece los criterios y procedimientos para la formulación y evaluación de proyectos de inversión en el sector de agua potable y saneamiento básico en Colombia. La resolución establece la necesidad de realizar estudios de hidrología y modelado hidrológico para la identificación y caracterización de las fuentes hídricas y para la evaluación del impacto ambiental de los proyectos (Resolución 2115, 2007)
Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río San Jorge	Este plan es un instrumento de planificación territorial que establece las políticas, estrategias y acciones para la gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca del río San Jorge. El plan incluye un análisis de la situación actual de la cuenca, un diagnóstico de los problemas y potencialidades del territorio y una propuesta de estrategias y acciones para la gestión integrada del agua y la protección ambiental (Corporación Autónoma Regional de los Valles de Sinú y San Jorge, 2019).

7. Metodología

La metodología de este trabajo se planteó a partir de la definición del enfoque, el alcance, el método, la técnica y los instrumentos necesarios para la elaboración de este trabajo de investigación. La metodología de elaboración del proyecto se muestra de acuerdo con el cumplimiento de cada uno de los objetivos específicos para así dar cumplimiento al objetivo de este trabajo donde se analiza el riesgo por inundaciones en el municipio de Montelíbano.

7.1. Enfoque

El enfoque de esta investigación es de carácter mixto, con inclinación cuantitativa; Debido a el análisis y manipulación de múltiples realidades de los datos hidrometeorológicos, obtenidos mediante la información disponible en las estaciones de monitoreo del IDEAM y Google Enginee, las cuales se escogieron a partir de su tipo de información y de los datos proporcionados, respecto al río San Jorge y el departamento de Córdoba. La parte cualitativa de este trabajo se centra en la observación y evaluación de los fenómenos de amenaza dentro del municipio, dónde se identifica la gravedad de las inundaciones y las consecuencias de estas, por medio de registros históricos y modelaciones (Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2018)

7.2. Alcance

Este trabajo, tiene un alcance de tipo descriptivo ya que en sus resultados describen y caracterizan los componentes dentro de las problemáticas de las inundaciones en la zona de estudio. La parte explicativa del documento se evidencia en la búsqueda de mostrar cómo ocurren las inundaciones y como es el comportamiento del río San Jorge en las épocas críticas. Finalmente, la parte correlacional de estudio se evidencia la relación entre los aspectos dentro del estudio del entorno y sus variables (Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2018)

Los resultados de este trabajo se realizarán por medio de un documento, dónde se haga una muestra gráfica del comportamiento del río San Jorge en épocas críticas de lluvias, permitiendo mostrar cómo sería la posible amenaza por inundaciones. Seguido de esto, se entregará otro documento dónde se formulen las diferentes estrategias de solución, que tienen en cuenta aspectos ingenieriles y ambientales. La construcción de estos entregables se realizó por medio de la búsqueda de información primaria y secundaria, donde se obtuvieron datos históricos del comportamiento del río y sus afectaciones en las inundaciones que ha presentado a la altura del municipio de Montelíbano.

En este trabajo no se pretende analizar la vulnerabilidad respecto a las inundaciones dentro de la zona de estudio, puesto que va más allá del alcance del trabajo y requiere de más áreas del conocimiento para su correcto resultado.

7.3. Método

El método de este trabajo de investigación está categorizado dentro del estudio analítico deductivo, el cual implica considerar los componentes individuales de un objeto o situación de estudio con el fin de obtener una comprensión más completa. Este método facilita la identificación de los elementos de un fenómeno y su examen sistemático de manera individualizada (Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2018)

7.4. Técnica

La técnica que se utilizó para este trabajo de investigación fue la recolección de información a nivel local y regional.; por medio de datos históricos en bases de datos, noticias e información de misiones como GPS Nasa y Google Engine.

7.5. Instrumentos

Los instrumentos utilizados para este trabajo de investigación fueron bases de datos dónde se indaga principalmente en trabajos de investigación, noticias, artículos científicos, documentos municipales y bases de datos hidrometeorológicos del IDEAM. Además de esto, se utilizaron herramientas computacionales como HEC RAS Y HMS, Qgis y Google Earth.

7.6. Metodología Objetivo 1

Para caracterizar la información geográfica e hidrometeorológica del río San Jorge a la altura del municipio de Montelíbano, se descargó un Modelo de Elevación Digital (DEM) desde la misión satelital de Alos Palsar del año 2011, con una resolución de 10 metros. Posterior a esto, se recortó el DEM sobre el tamaño de la cuenca en Qgis, la cual fue delimitada por medio de las capas suministradas por el Sistema de Información Geográfica para el Ordenamiento Territorial. Finalmente, se descargaron los datos de precipitación, desde la plataforma de consulta y descarga de datos del IDEAM, seleccionando las estaciones principales de la cuenca del río San Jorge en el periodo de tiempo desde el año 2000 al 2020.

En el análisis de la información geológica y geomorfológica de la zona, se descargaron los mapas y memorias de la cartografía geomorfológica de las planchas 81 y 82 del año 2012, a una escala 1:100.0000, suministrados por el Motor de Integración de Información Geocientífica del Servicio Geológico Colombiano; a partir de estos mapas y los documentos, se definieron las unidades geomorfológicas y geológicas (Servicio Geológico Colombiano, 2012).

Finalmente, se realizó un análisis de cobertura vegetal multitemporal, dónde se recopilaron datos e imágenes satelitales de los años 2010 y 2020. Estos datos se georeferenciaron y se realizaron correcciones geométricas para garantizar su compatibilidad. Luego, se segmentaron las imágenes en el polígono correspondiente al área de estudio, buscando representar las áreas homogéneas de cobertura vegetal y se procedió a realizar una clasificación de estas áreas, siguiendo la clasificación de Corine Land Cover tipo 1.

La comparación temporal de las clasificaciones se realizó por medio de la herramienta de análisis de índices de vegetación NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) del software Qgis. La identificación de estas áreas reveló cambios en la cobertura vegetal a lo largo del tiempo, los cuales se identificaron y describieron. Los resultados se interpretaron y se presentaron en mapas y gráficos (Alarcón & Rozo, 2021).

7.7. Metodología Objetivo 2

Calibración de los modelos

La calibración de modelos en HEC-HMS y HEC-RAS se llevó a cabo a través del proceso en el cual se utilizaron datos hidrológicos y meteorológicos del 27 de mayo del 2019; día en el cual se presentaron valores significativos de precipitación y caudal. Se seleccionaron parámetros clave del modelo, como coeficientes de escorrentía y tasas de infiltración, y se configuró el modelo inicialmente. Luego, se realizaron simulaciones iniciales y se compararon los resultados con datos observados en IDEAM y los

valores históricos, utilizando estadísticas para evaluar la precisión del modelo. A través de múltiples iteraciones, se ajustaron los parámetros del modelo para minimizar las discrepancias y se realizaron nuevas simulaciones (IDEAM, 2020). Finalmente, se validó el modelo utilizando datos independientes del IDEAM no utilizados en el proceso de calibración para garantizar la transparencia y la confiabilidad de los modelos calibrados (IDEAM, 2020).

Modelo hidrológico

La creación del modelo hidrológico en el área de estudio implicó examinar las precipitaciones máximas registradas en un tiempo de 24 horas, con el propósito de calcular un caudal pico, para la implementación del modelo de escorrentía pluvial en HEC HMS sobre la cuenca del bajo río San Jorge.

Dentro de los datos necesarios para el modelo hidrológico, se construyeron las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) para la compresión del periodo de retorno del modelo. Se seleccionaron las 4 estaciones más cercanas a las 9 microcuencas analizadas, con información de la precipitación máxima en un periodo de tiempo de 24 horas. En la zona de estudio del Bajo río San Jorge, a la altura del municipio de Montelíbano, se contó con 6 estaciones de precipitación activas y operadas con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Sin embargo, se seleccionaron las más representativa para el área de las microcuencas, las cuales fueron Uré (25010060), Puerto Libertador (25010010), Pica Pica (25010080) y La Hacienda (25010110), siendo estas las de mayor influencia alrededor de cada subcuenca, como se muestra en el mapa a continuación:

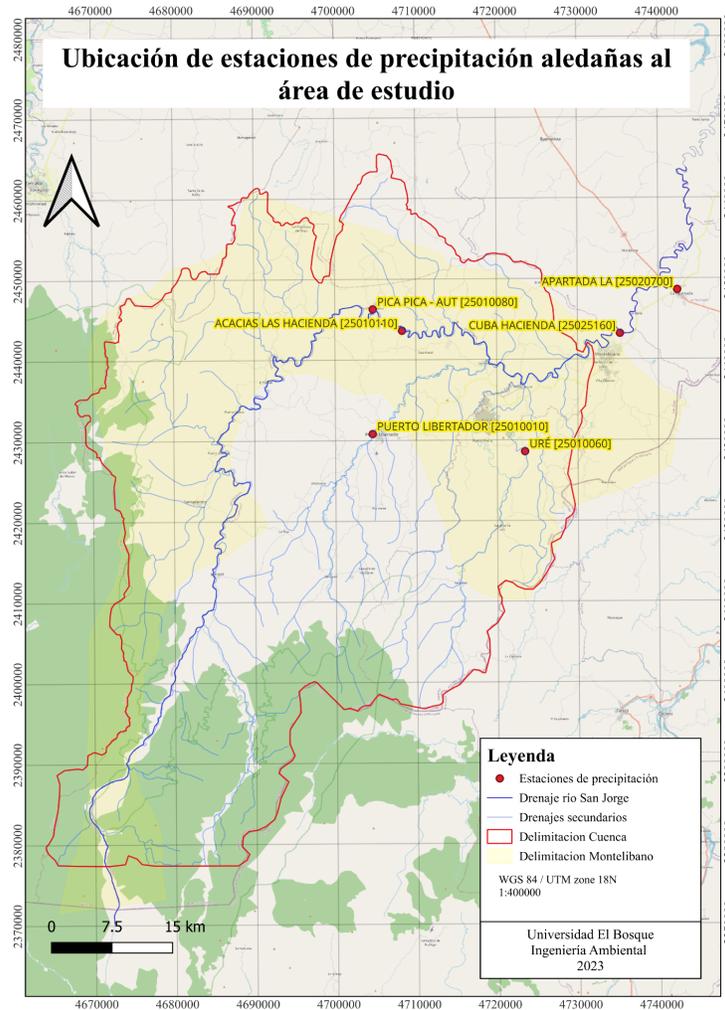


Figura 2. Estaciones de precipitación aledañas al área de estudio

En el registro de la información de precipitación suministrada por el IDEAM, los datos o valores faltantes de las estaciones son muy frecuentes, estos datos faltantes pueden deberse a errores sistémicos de calibración de equipos o de transcripción; así como errores aleatorios, que se generan por causas desconocidas o por imprecisiones en el método de medida (Guerrero & Londoño, 2007). Estos datos faltantes llevan a que se reduzca la cantidad de datos obtenidos, pérdida de información, disminución de la capacidad estadística y/o el aumento de los errores estándar, por lo que llevaría a que el análisis resultante se vea alterado (Dong & Peng, 2013). Para analizar los datos faltantes se realizó el método razón de promedio de Paulhus y Kohler (1952), con ayuda de la herramienta Excel; este método completa los datos de precipitación diaria mediante promedios de valores de estaciones cercanas, normalizados mediante división por sus respectivas precipitaciones medias, como se muestra en la ecuación:

$$x^f = X^f * \frac{X^*}{X_{media} - X^f}$$

Dónde:

x^f representa el dato faltante de un mes en la estación

X^f representa el promedio multianual para el mes faltante

X^* representa el acumulado anual en el año en el que está el dato faltante

X_{media} representa el promedio multianual de los acumulados anuales

Seguido de esto, se hizo el análisis estadístico de los datos, con el fin de conseguir series diarias y de precipitación máxima anual, para obtener la frecuencia necesaria y modelar las lluvias de diseño y determinar los caudales máximos de modelación hidráulica.

Dado que no se dispone de las curvas IDF proporcionadas por el IDEAM, se empleó la metodología descrita en el manual de drenaje para carreteras del INVIAS (Instituto Nacional de Vías, 2013). Estas curvas son utilizadas para estimar caudales máximos, útiles en el diseño de los modelos, por medio de hietogramas que representan la variación de la intensidad de la precipitación, respecto a la variación del tiempo. A partir de esta metodología, se calculó la intensidad de lluvia con la precipitación promedio máxima anual descrita anteriormente, en un período de 24 horas utilizando la siguiente fórmula (Instituto Nacional de Vías, 2013).

$$i = \frac{a * T^b * M^d}{(t/60)^c}$$

Dónde:

i ($\frac{mm}{h}$) corresponde a la intensidad de la lluvia

T (años) es el periodo de retorno

$M(mm)$ es la precipitación máxima promedio anual en 24 horas a nivel multianual;

t (min) es la duración de la lluvia

a, b, c, d Son parámetros de ajuste de la regresión los cuales se presentan en la Tabla 3, en donde el área de estudio corresponde a la región caribe.

Tabla 3. *Parámetros básicos de las curvas IDF para la región Caribe*

Región	Parámetros			
Caribe	a	b	c	d
	24,85	0,22	0,50	0,10

Fuente: (Instituto Nacional de Vías, 2013)

En el proceso de construcción del modelo hidrológico en el programa HEC-HMS, se utilizó el método de lluvia-escorrentía, desarrollado por el *Hydrologic Engineering Center* (HEC) del *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE), que está diseñado para simular el hidrograma de escorrentía que se produce en un determinado punto de la red fluvial como consecuencia de un periodo de lluvia. Para la implementación del modelo de inundaciones implementado en HEC-HMS se utilizaron los parámetros mencionados anteriormente como el caudal y las curvas IDF (AVR-CAR, 2015).

Este modelo se implementa haciendo uso del método de número de curva (CN) para la transformación del hidrograma en datos de escorrentía y así lograr la retención de la información. El cálculo de número de curva se generó a partir del DEM, el análisis de coberturas y la geología del terreno, lo cual permitió obtener un CN promedio para la superficie de cada subcuenca dentro del área de estudio, con ayuda de la clasificación planteada en la metodología del SCS (Soil Conservation Service), consultada en Chow et al., (1994). Finalmente se corrió el escenario a 100 años para obtener los hidrogramas de caudales para integrar en el modelo hidráulico.

Modelo Hidráulico

Para el modelo hidráulico, se utilizó el programa HEC RAS, este software de acceso libre desarrollado por U.S Army Corps of engineers-Hydrologic Engineer Center, permitió el análisis de comportamiento hidrológico en 1D, a partir del tránsito del caudal de diseño del hidrograma obtenido en el periodo de retorno determinado. La modelación realizada en el área de estudio consistió en definir la geometría 1D para simular el flujo del canal y la zona de desborde de manera detallada, en donde se define una dirección de flujo y diversas secciones transversales (Chow, 1994).

El modelo se hizo utilizando el sistema de coordenadas WGS84 en la zona 18N, en este punto fue necesario configurar la geometría del tramo a modelar con los resultados del HEC-HMS como el DEM y la capa del drenaje principal del río, también se crearon las líneas de banco alrededor del cauce y se dibujaron las líneas de sección, bajo las cuales se determina el la longitud y extensión de la inundación dentro del área. Adicionalmente se requirió del cálculo del coeficiente de rugosidad de Manning.

Los coeficientes Manning o de resistencia al flujo uniforme en canales de lecho rígido se encuentran tabulados en diferentes fuentes bibliográficas (Chow, 1994). En canales de lecho móvil como el que se está analizando, además de la rugosidad que ofrecen las paredes y el lecho, es necesario considerar la rugosidad que ofrecen las formas del lecho. A partir del reconocimiento de varios factores primordiales que afectan el coeficiente de rugosidad, se siguió la metodología planteada por Chow (1994), dónde se estima el valor del coeficiente, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$n = (n_0 + n_1 + n_3 + n_4) * n_5$$

Donde n_0 es un valor que relaciona el material que predomina en el canal, n_1 es un valor que debe agregarse al n_0 para corregir el efecto de las rugosidades superficiales, n_2 es un valor para considerar

las variaciones en forma y tamaño de la sección transversal del canal, n_3 es un valor para considerar las obstrucciones, n_4 es un valor para considerar la vegetación y las condiciones de flujo, y n_5 es un factor de corrección de los efectos por meandros en el canal. Los valores apropiados de n_0 a n_4 y n_5 se pueden seleccionar de la de acuerdo con las condiciones dadas en la Tabla 4.

Tabla 4. *Valores de coeficiente de rugosidad-Cowan*

Condiciones del canal			Valores
Material	Tierra	n0	0.020
	Roca		0.025
	Grava fina		0.024
	Grava gruesa		0.028
Grado de Irregularidad	Ligero	n1	0.00
	Menor		0.005
	Moderado		0.010
	Severo		0.020
Variaciones de la sección transversal del canal	Gradual	n2	0.000
	Ocasional		0.005
	Frecuente		0.010-0.015
Efecto relativo de Obstáculos	Despreciable	n3	0.000
	Menor		0.010-0.015
	Apreciable		0.020-0.030
	Severo		0.040-0.006 0
Vegetación	Baja	n4	0.005-0.010
	Media		0.010-0.025
	Alta		0.025-0.050
	Muy alta		0.050-0.100
Grado de Intensidad	Menor	n5	1.000
	Apreciable		1.150

Condiciones del canal			Valores
	Severo		1.300

Fuente: Modificado de (Chow, 1994).

Este modelo se realizó a partir de un régimen de flujo estacionario, para el cual fue necesario tener en cuenta la pendiente del río y el caudal pico obtenido de la modelación hidrológica; se simuló bajo unas condiciones de frontera de profundidad normal, es decir, que el software simula el comportamiento del río con un flujo uniforme. Finalmente, en el análisis del flujo se escogió el régimen de flujo subcrítico y se obtuvieron los ráster de profundidad y velocidad, dónde se plasman los valores y las áreas de mayor afectación en caso de inundación de este río.

7.8. Metodología Objetivo 3

Para la identificación de la amenaza por inundación, se hizo una evaluación por medio de la matriz de la Figura 3, planteada por la metodología suiza para la elaboración de mapas de amenaza de la cual se adoptaron los rangos presentados por la metodología IDIGER (IDIGER, 2020). En esta matriz se definen las profundidades máximas de acuerdo con los datos característicos de la población colombiana en cuanto a la estatura de los niños y adultos y la velocidad a la que se presentan afectaciones a las vidas humanas. La amenaza de inundación potencial se determina mediante la combinación de la intensidad y la frecuencia (periodo de retorno) del evento correspondiente. Para este propósito, se emplea la siguiente matriz para evaluar las diversas amenazas en la zona de investigación. El color rojo corresponde a la zona de amenaza alta, el color amarillo a la zona de amenaza media y el color verde a la zona de amenaza baja por inundación (IDIGER, 2020).

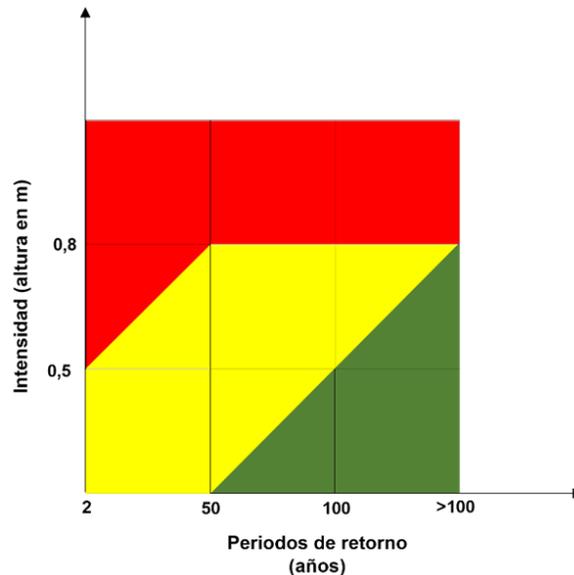


Figura 3. Categorías de amenaza en función de la combinación de variables de velocidad y profundidad

Fuente: Modificado (PLANAT, 2005) en (IDIGER, 2021)

Después de contar con la información relevante sobre la velocidad y profundidad del escenario de inundación, se categorizó el área anteriormente obtenida en función de las zonas de clasificación para el período de retorno de 100 años. En esta categorización, la amenaza baja se sitúa entre 0,0 m y 0,5 m, la amenaza media se ubica entre 0,5 m y 0,8 m, y la amenaza alta corresponde a valores superiores a 0,8 m. A partir de esta categorización, se calculó el área total para cada categoría, con un enfoque especial en la zona urbana del municipio de Montelíbano.

7.9. Metodología Objetivo 4

Para la propuesta de soluciones se consideraron soluciones estructurales y no estructurales en función de las problemáticas identificadas en la evaluación de la amenaza por inundaciones en el casco urbano del municipio de Montelíbano, Córdoba; para esto, se propuso una metodología que involucra la identificación las problemáticas específicas derivadas de esta evaluación, tales como vulnerabilidades críticas y áreas expuestas. Posteriormente, se procedió a la selección de soluciones estructurales, como infraestructuras de control o mitigación de la amenaza, de acuerdo con las características de la amenaza y las necesidades identificadas. Simultáneamente, se evaluaron soluciones no estructurales como la poligrafía social y programas de concientización comunitaria, considerando aspectos de preparación y respuesta. Finalmente, se realizará el análisis de las soluciones propuestas. Esta metodología busca garantizar una gestión integral y efectiva de la amenaza, abordando tanto aspectos físicos como la preparación y la resiliencia de las comunidades afectadas.

7.10. Matriz metodológica

La matriz metodológica tiene como objetivo mostrar la metodología tomada en cuenta para la construcción del trabajo de investigación. Esta matriz se construye a partir de la descripción del enfoque, el alcance, el método y las actividades, técnicas e instrumentos, desglosadas entre los objetivos específicos planteados anteriormente, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Matriz metodológica del trabajo de investigación

Enfoque		Mixto		
Alcance		Correlacional, descriptivo, analítico		
Método		Analítico descriptivo		
Objetivos		Actividades	Técnicas	Instrumentos
Objetivo General	Objetivos Específicos			
Analizar la amenaza por inundaciones en el municipio de Montelíbano a partir de modelos hidrológicos e hidráulicos en cuenca alta del Río San Jorge	Caracterizar la información geográfica e hidrometeorológica de la zona del municipio de Montelíbano y la cuenca del Río San Jorge, con base en datos históricos.	Identificación de la zona de estudio Selección de estaciones hidrometeorológicas Descarga de precipitaciones	Revisión documental Recuperación de información Identificación de zonas de estudio Análisis de datos	Bases de datos Software de análisis geoespacial (Qgis) Catálogos de descarga de datos IDEAM

<p>utilizando las herramientas HEC HMS, HEC RAS.</p>	<p>Busca de datos y fechas históricas</p> <p>Delimitación de la cuenca y subcuencas</p>			
	<p>Proponer modelo hidrológico e hidráulico de la cuenca del río San Jorge a la altura del municipio de Montelíbano, a partir de la herramienta HEC RAS y HMS.</p>	<p>Introducción de datos en HMS</p> <p>Calibración del modelo</p> <p>Uso generalizado del modelo en HMS</p> <p>Introducción de datos en HEC RAS</p> <p>Calibración del modelo</p> <p>Uso generalizado del modelo en RAS</p>	<p>Diseño computacional</p>	<p>Software de análisis computacional</p>
	<p>Identificar las zonas de amenaza en municipio de Montelíbano</p>	<p>Identificación de zonas de amenaza</p> <p>Clasificación de la amenaza</p> <p>Construcción del mapa de amenazas</p>	<p>Diseño computacional</p> <p>Revisión documental</p> <p>Recuperación de información</p>	<p>Software de análisis computacional</p> <p>Bases de datos</p>
	<p>Considerar soluciones de acuerdo con las problemáticas encontradas en la evaluación de la amenaza.</p>	<p>Revisión bibliográfica</p> <p>Propuesta de soluciones estructurales y no estructurales</p>	<p>Análisis de estudios previos</p>	<p>Bases de datos</p>

8. Aspectos éticos

Este trabajo de investigación se realizó por medio de datos históricos, revisión bibliográfica y procesamiento de datos hidrometeorológicos, con ayuda de herramientas computacionales y sistemas de información geográfica. Estos procedimientos no necesitaron de contacto con talento humano o comunidades, por lo cual no se debe tener en cuenta ningún aspecto ético.

9. Resultados, Análisis y discusión de resultados

A partir de la metodología descrita en el capítulo anterior, en este apartado se muestran los resultados, análisis y discusión de estos, de acuerdo con cada uno de los objetivos específicos planteados para este trabajo de investigación.

9.1. Objetivo específico 1

Caracterizar la información geomorfológica, geológica e hidrometeorológica de la zona del municipio de Montelíbano y la cuenca del Río San Jorge, con base en datos históricos.

El municipio de Montelíbano, ubicado en el departamento de Córdoba, Colombia, se caracteriza por tener una geología y geomorfología que reflejan la influencia de su ubicación en la región andina y la transición hacia la planicie costera del Caribe. Desde una perspectiva geológica, el municipio está asentado sobre una base de rocas sedimentarias que datan del período Cretácico. Estas rocas incluyen lutitas, arcillas y areniscas que se han formado a lo largo de millones de años y que contribuyen a la diversidad geológica de la zona (Servicio Geológico Colombiano, 2012).

La geomorfología de Montelíbano también es notablemente variada, lo que se debe en gran parte a la influencia de ríos importantes como el río San Jorge y el río Sinú, que atraviesan la región. La topografía varía desde colinas suavemente onduladas hasta extensas llanuras aluviales. La presencia de estos ríos ha dado lugar a la formación de terrazas fluviales y áreas de humedales en las zonas circundantes. Además, la combinación de procesos fluviales y marinos a lo largo de la historia geológica de la región ha contribuido a la creación de esta variada topografía (Servicio Geológico Colombiano, 2012).

La topografía de Montelíbano abarca áreas bajas y planas que tienden a acumular agua durante eventos de lluvia intensa o crecidas de ríos. La presencia de los grandes ríos de esta zona aumenta el riesgo de inundaciones durante crecidas significativas. Además, la capacidad de infiltración del suelo puede ser limitada, especialmente en suelos impermeables, lo que favorece la escorrentía y la acumulación de agua. La relación entre la infiltración y la escorrentía en Montelíbano depende de factores como la intensidad y duración de las lluvias, la capacidad de absorción del suelo y la topografía del terreno. En áreas con suelos impermeables y superficies planas, la escorrentía puede prevalecer, lo que aumenta el riesgo de inundaciones (Servicio Geológico Colombiano, 2012). El desarrollo urbano no planificado y la urbanización dentro del municipio han reducido la capacidad del suelo para absorber agua, agravando el problema. Estos factores, combinados con cambios climáticos y actividades humanas que alteran los flujos de agua, contribuyen a la propensión de Montelíbano a las inundaciones (Alcaldía de Montelíbano, 2000).

En los últimos años, el IDEAM ha identificado a Montelíbano como un municipio con amenaza de inundación, con una frecuencia de retorno de 2.33 años. Los principales eventos de inundación de los últimos años fueron en julio de 2022, donde se reportaron alrededor de 1.400 personas afectadas; y en agosto de 2022, donde se reportaron inundaciones en la zona rural del municipio, causando pérdidas en cultivos, animales y viviendas. Estos eventos de inundación pueden ser causados por la dinámica fluvial del río San Jorge y otros ríos cercanos, así como por las fuertes lluvias que se presentan en la región (IDEAM, n.d.).

El climograma de Montelíbano, como se muestra en la Figura 4, revela un clima tropical caracterizado por una marcada estacionalidad. Las temperaturas máximas son más pronunciadas entre enero y marzo, lo que indica que estos meses son los más cálidos del año. Por otro lado, las temperaturas mínimas descienden notoriamente entre mayo y julio, marcando la estación más fresca. La precipitación presenta un patrón estacional, con un aumento notorio a partir de abril o mayo, alcanzando su punto máximo en mayo, junio y octubre. La estación seca abarca de diciembre a marzo.

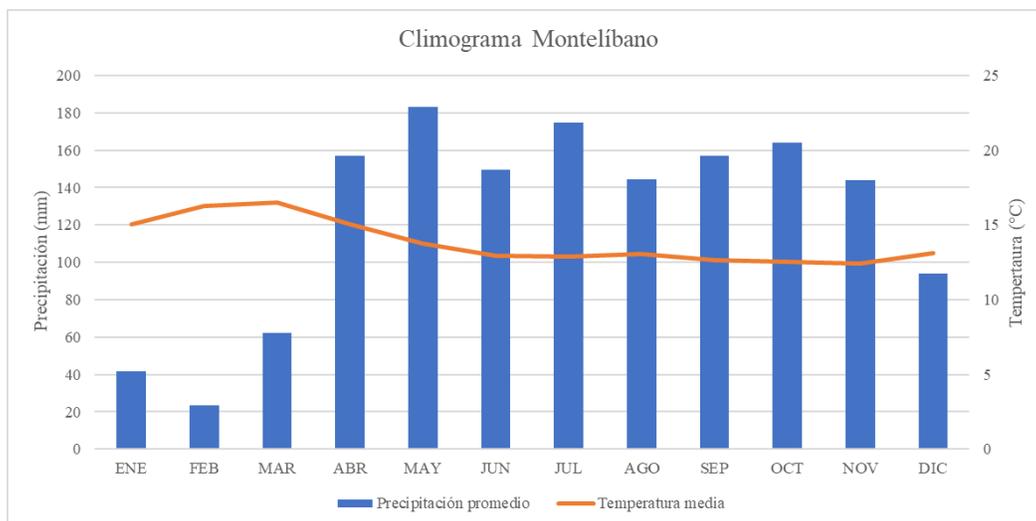


Figura 4. *Climograma de Montelíbano y la cuenca Alta río San Jorge*

Respecto al análisis de cambio de cobertura realizado a partir del cambio del NDVI, representado en la Figura 5, se observó un aumento del 30% de las zonas desnudas a lo largo de todo el municipio, con valores entre 0.1 y 1, clasificados en la categoría de coberturas en menor vigor vegetal o suelos desnudos, con valores designados entre 0,1 y 1 de acuerdo con la Tabla 6 (Alarcón & Rozo, 2021).

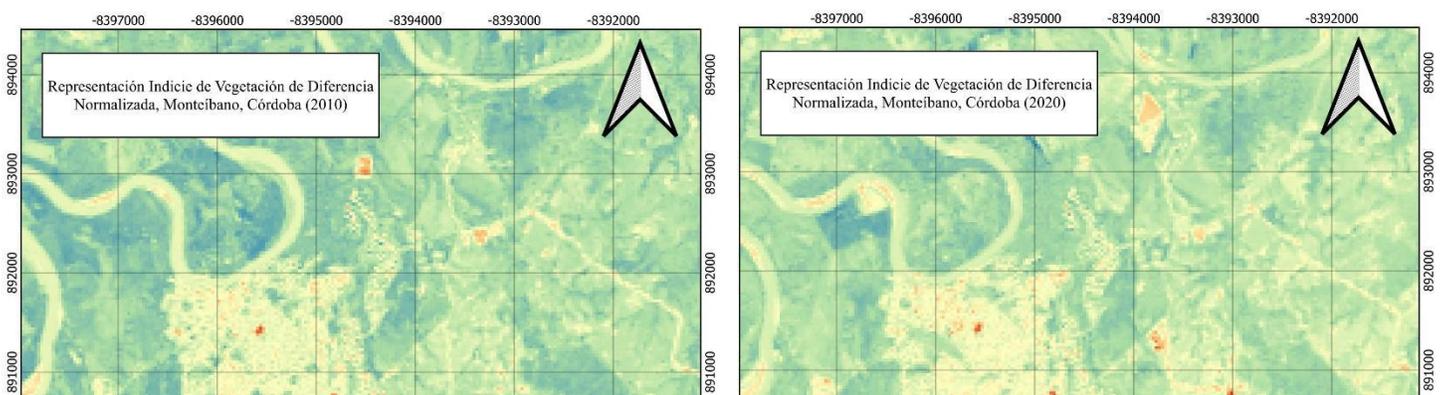


Tabla 6. Valores de clasificación NDVI

Valores	Rangos	Interpretación	Convención
Muy Altos	Entre 0.61 y 1	Reflejan mayor vigor vegetal y coberturas sanas	
Altos	Entre 0.31 y 0.6		
Medios	Entre 0 y 0.3	Coberturas en menor vigor vegetal o suelos desnudos	
Bajos	Entre -0.6 y -0.1		
Muy Bajos	Entre -1		

Fuente: (Alarcón & Rozo, 2021)

9.2. Objetivo específico 2

Proponer modelo hidrológico e hidráulico de la cuenca del río San Jorge a la altura del municipio de Montelíbano, a partir de la herramienta HEC RAS y HMS.

El modelo hidrológico en HMS se utilizó para determinar los caudales de diseño para eventos de tormenta utilizando el método de número de curva para transformación del hidrograma en escorrentía y para cuantificar la retención, se describe la metodología de obtención del número de curva y los parámetros del modelo empleados.

Cuando resulta difícil obtener mediciones directas de los caudales de drenaje en cuencas hidrográficas, se recurre a los modelos de lluvia-escorrentía. Estos modelos permiten estimar el caudal máximo instantáneo de escorrentía superficial en la cuenca en cuestión, utilizando datos históricos de precipitación de la cuenca y adaptándose a las características específicas de la cuenca, como su geometría, tipos de suelo, vegetación, y otros factores.

De acuerdo con al cálculo de CN para las nueve subcuencas determinadas por el programa HMS, que se muestran en la Figura 6, se obtuvieron los siguientes valores, según la categorización establecida en el SCS que tiene en cuenta el uso y tipo del suelo, cobertura de la tierra y grupos de suelos hidrológicos (Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo SNGRD, 2017), como se muestra en la Tabla 7, junto con la longitud del flujo, relacionada con la longitud de cada una de las subcuencas y la respectiva pendiente.

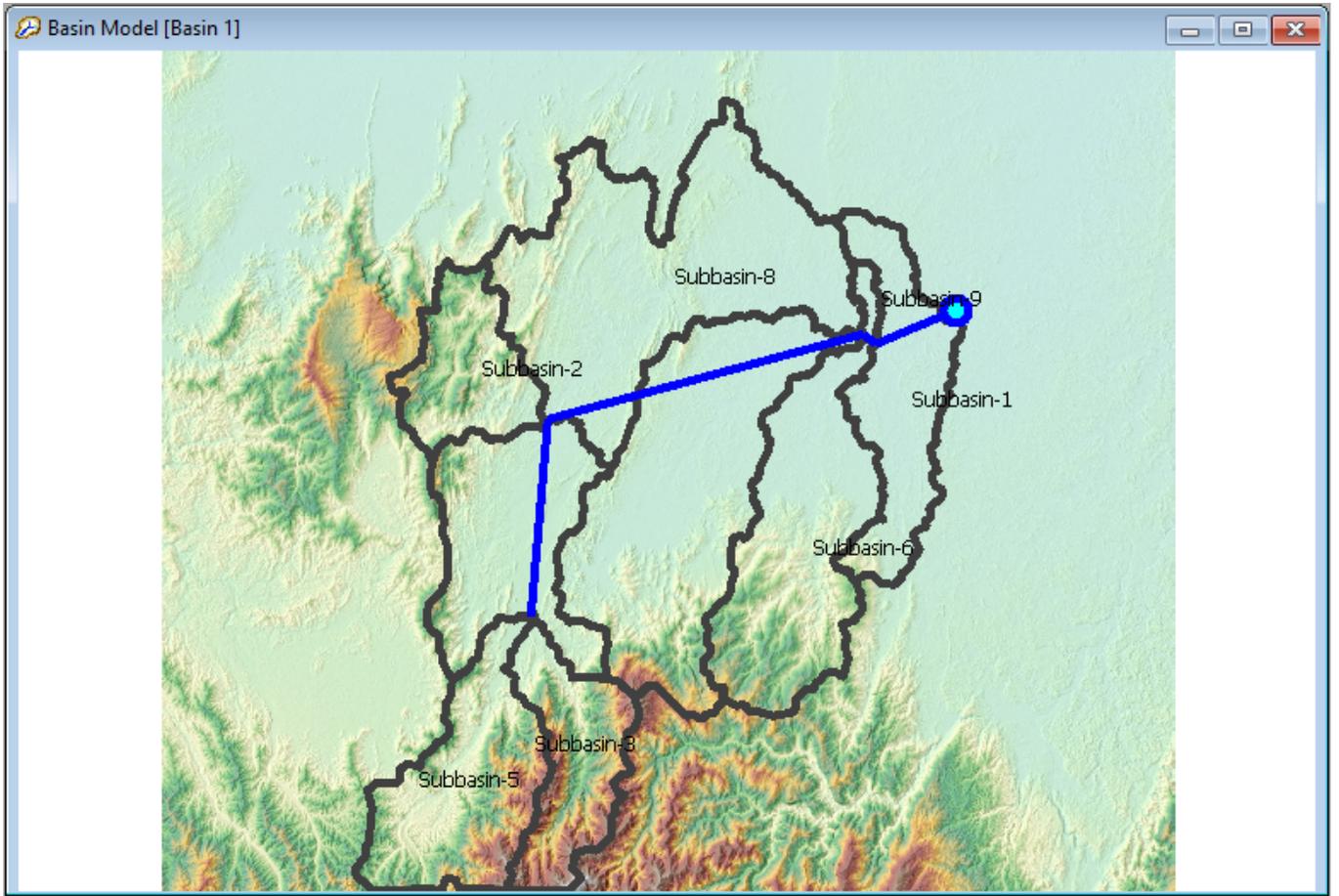


Figura 6. Delimitación subcuencas del área de estudio

Tabla 7. Cálculo de longitud, pendiente y Número de curva por subcuencas

Subcuenca	Longitud del flujo (Km)	Pendiente	CN
Subbasin-1	38,201	0,055	88,681
Subbasin-2	25,044	0,257	75,178
Subbasin-3	32,644	0,424	75,048
Subbasin-4	56,137	0,133	84,575
Subbasin-5	38,997	0,340	75,613
Subbasin-6	51,763	0,166	83,568
Subbasin-7	38,207	0,156	79,554
Subbasin-8	53,391	0,093	87,273
Subbasin-9	10,361	0,039	90,749

Teniendo en cuenta la metodología utilizada para el procesamiento de la información obtenida y relleno de datos, se seleccionaron las estaciones de Uré, Puerto Libertador, Pica Pica, y La Hacienda, las cuales presentan un conjunto de datos que abarca la precipitación diaria y los valores de precipitación máxima

anual, lo que permite llevar a cabo el análisis de frecuencia necesario para elaborar estimaciones de lluvias de diseño y calcular los caudales máximos en el proceso de modelación. La Figura 7, muestra el comportamiento de la lluvia máxima en 24 horas para las microcuencas de interés, en un periodo de tiempo entre los años 2000 a 2020, de acuerdo con los datos suministrados en el Anexo 1.

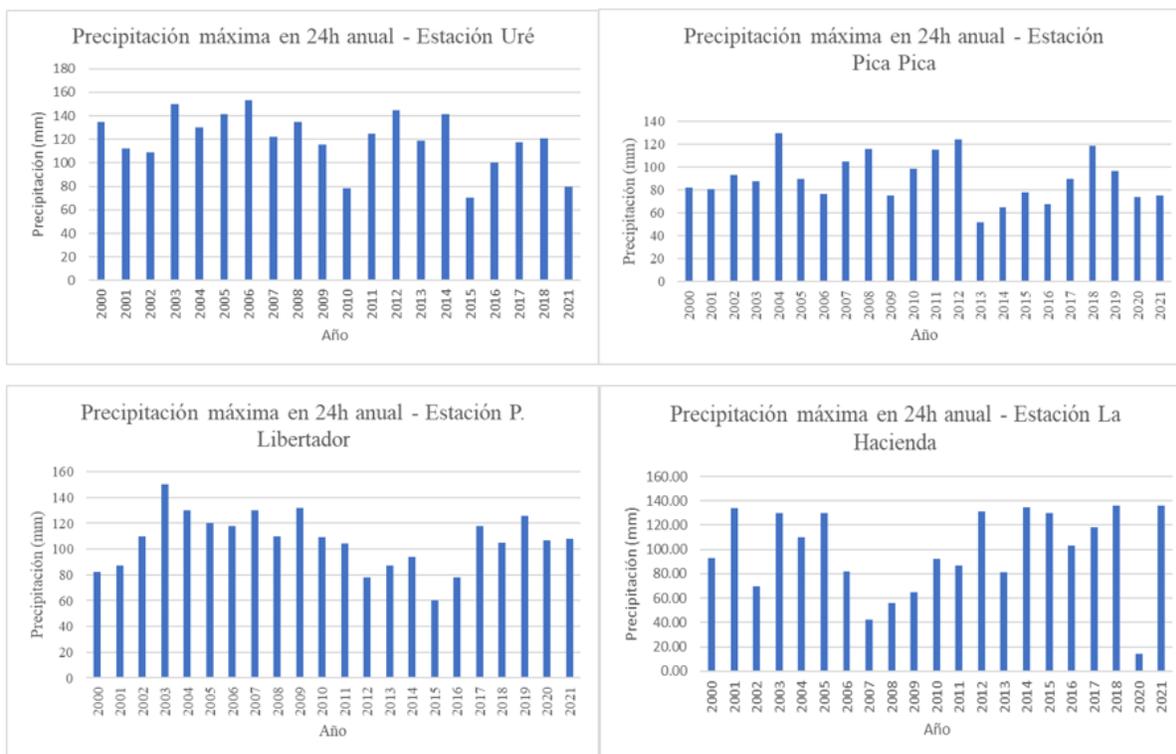


Figura 7. Series de precipitación máximas anuales 2000-2020

Del análisis de la precipitación de estas cuatro estaciones, se observó que la estación con más lluvia fue Uré, teniendo valor promedio de 120,03mm, con una precipitación máxima de 153 mm en el año de 2006; seguido de esto, se encuentra la estación de Puerto libertador, con una precipitación promedio de 106,5 mm y máxima de 150 mm en el año 2003; continúa la estación de La Hacienda, con una precipitación promedio de 98,81 mm y máxima de 135 mm. Finalmente está la estación Pica Pica, con una precipitación promedio de 90,59mm y una máxima de 130mm.

En las Figura 8, Figura 9, Figura 10 y Figura 11, se presentan las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para las cuatro estaciones de análisis, con la representación de periodos de retorno de 25, 50 y 100 años, de acuerdo con la metodología de INVIAS. Estas curvas presentan la intensidad o magnitud de la lluvia cada 30 minutos, con una duración de 24 horas, junto con la estimación de la frecuencia, expresada en años (IDEAM, 2018). Como se puede observar en estas gráficas, la intensidad decrece a mayor duración, y la frecuencia con el paso de los años del periodo de retorno, siendo similar el comportamiento en las cuatro estaciones.

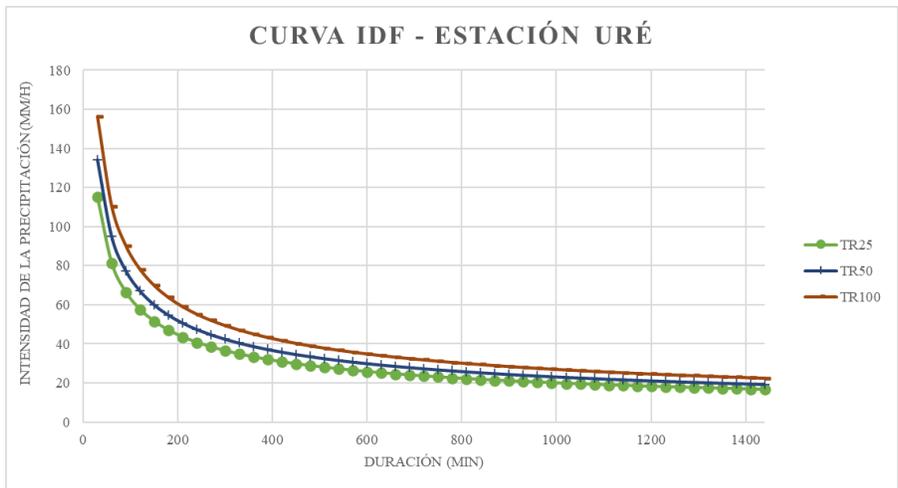


Figura 8. *Curva IDF Estación Uré*

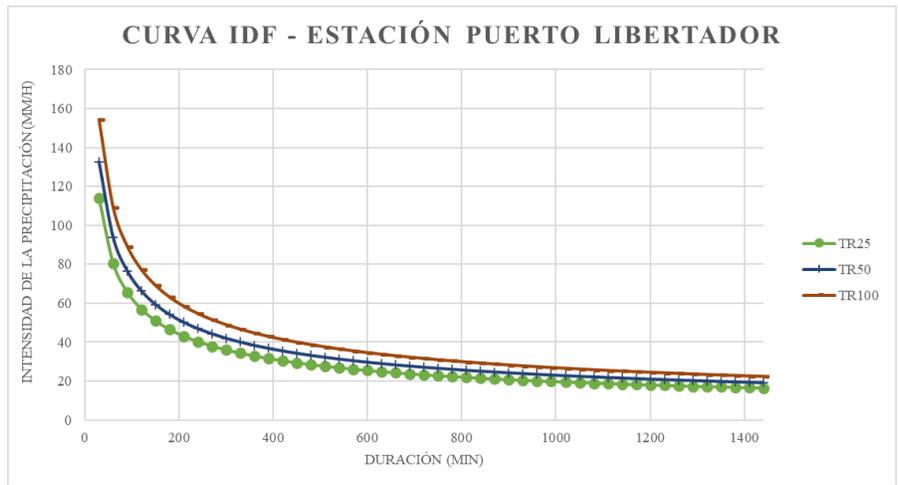


Figura 9. *Curva IDF Estación Puerto Libertador*

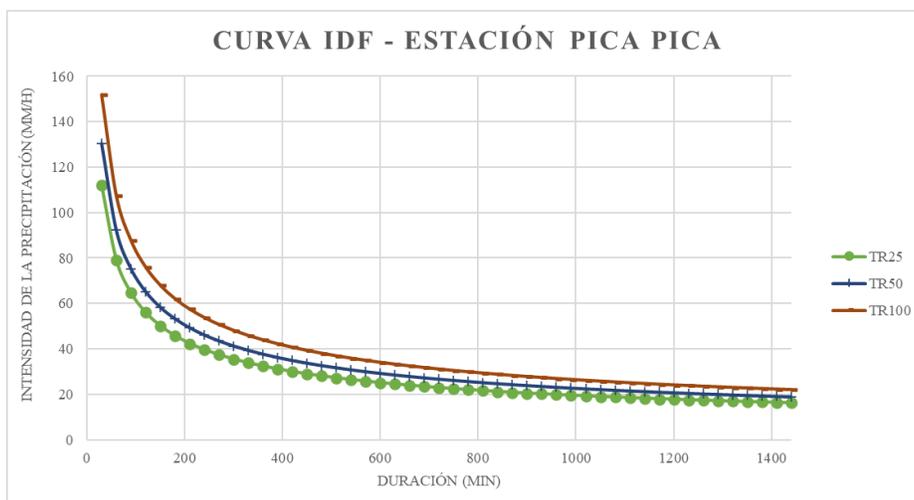


Figura 10. Curva IDF Estación Pica Pica

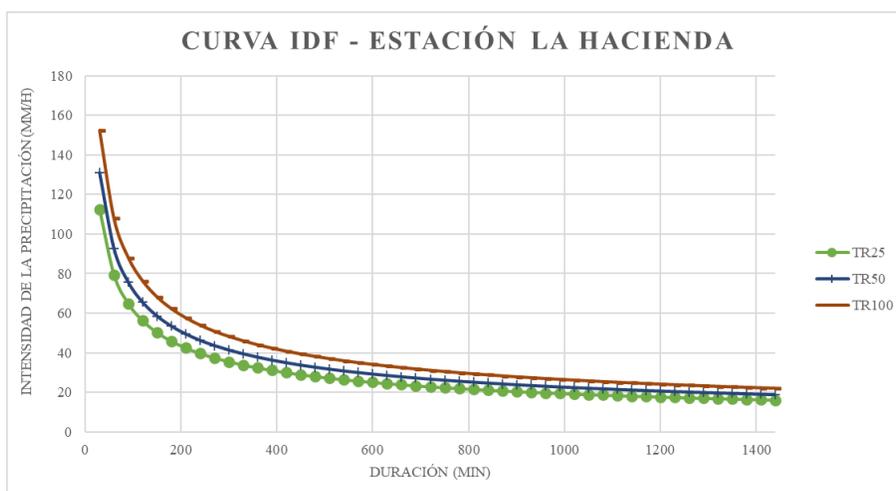


Figura 11. Curva IDF Estación La Hacienda

Para la elaboración de los hietogramas, se utilizaron los datos para un periodo de retorno de 100 años, según lo estipulado por la metodología del Departamento del Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER, 2020) La elaboración de estos hietogramas permitió ver de forma gráfica la distribución de la lluvia, los picos de precipitación, los cuales posteriormente se introdujeron en HEC-HMS y se logró determinar los caudales de modelación.

Estos hietogramas de diseño se construyeron a partir de las curvas IDF generadas, según el **Anexo 2**, dónde se muestra a detalle el procedimiento de cálculo. Se integraron estos gráficos con el método de bloques alternos para un periodo de 100 años. Los hietogramas de diseño integrados en el modelo meteorológico, dónde los valores de caudal pico fueron de 78,12 mm para la estación de Ure, 77,19 mm para la estación de Puerto Libertador, 75,95 mm para la estación de Pica Pica, y 76,25 mm para la

estación de La Hacienda, se ingresaron en el programa de HMS, teniendo como resultado la Figuras 12, 13, 14 y 15.

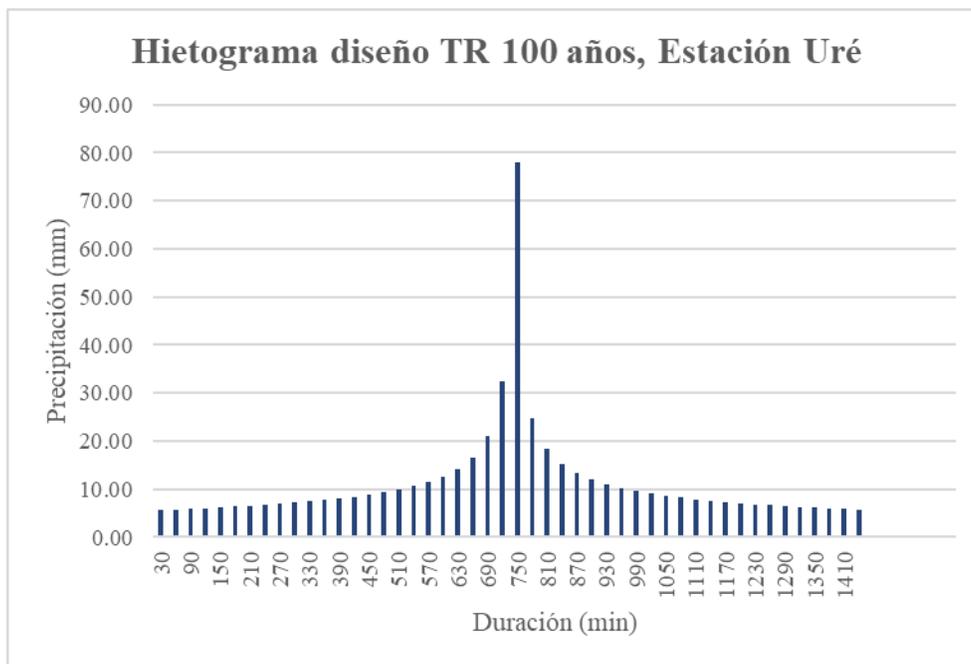


Figura 12. Hietograma de diseño en (mm) para una duración de tormenta de 24 horas (Periodo de retorno 100 años), Estación Uré

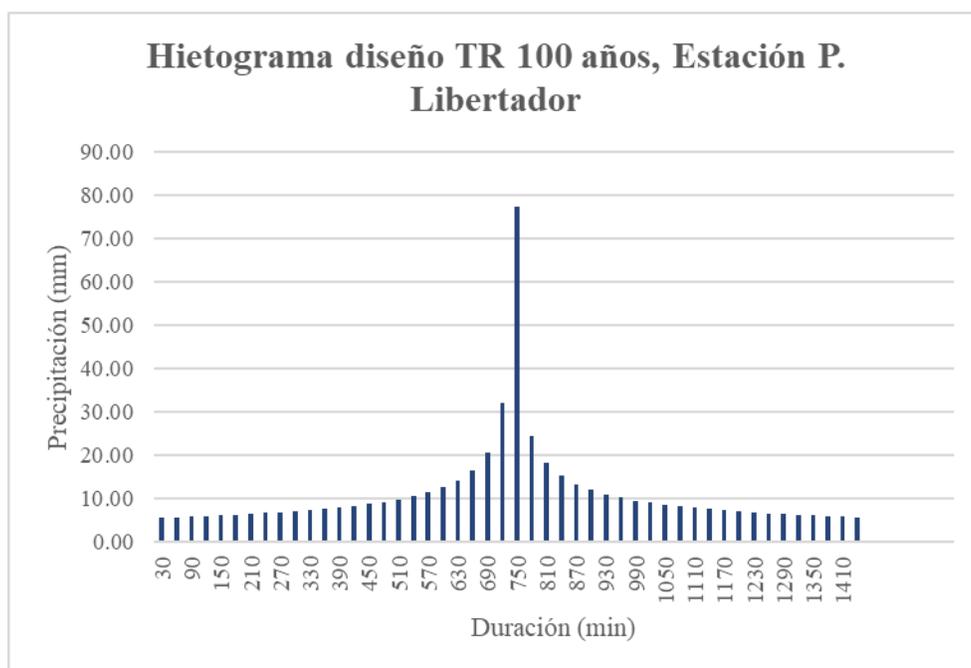


Figura 13. Hietograma de diseño en (mm) para una duración de tormenta de 24 horas (Periodo de retorno 100 años), Estación Puerto Libertador

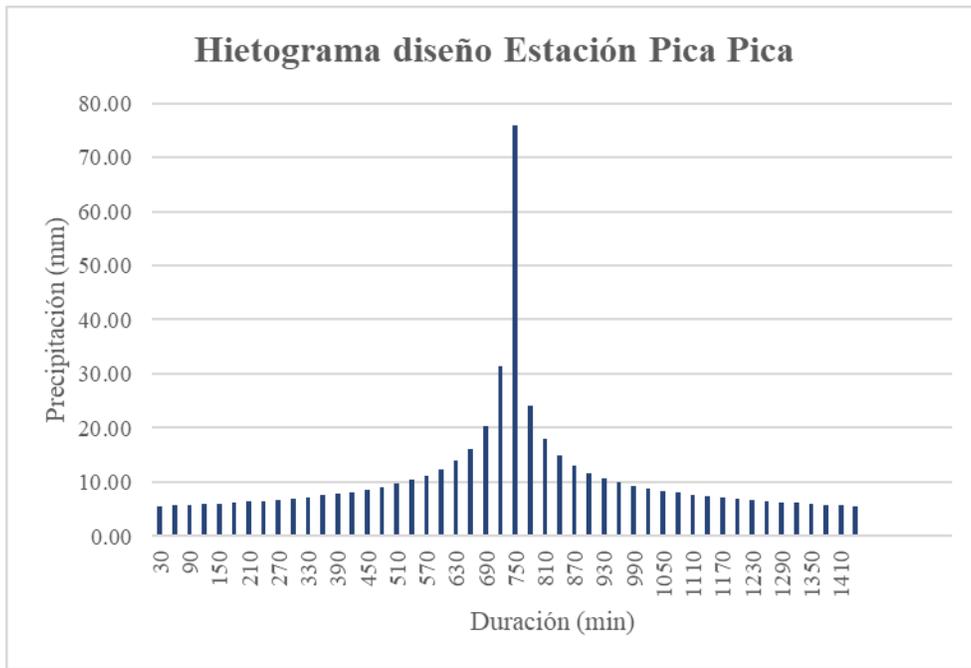


Figura 14. *Hietograma de diseño en (mm) para una duración de tormenta de 24 horas (Periodo de retorno 100 años), Estación Pica Pica*

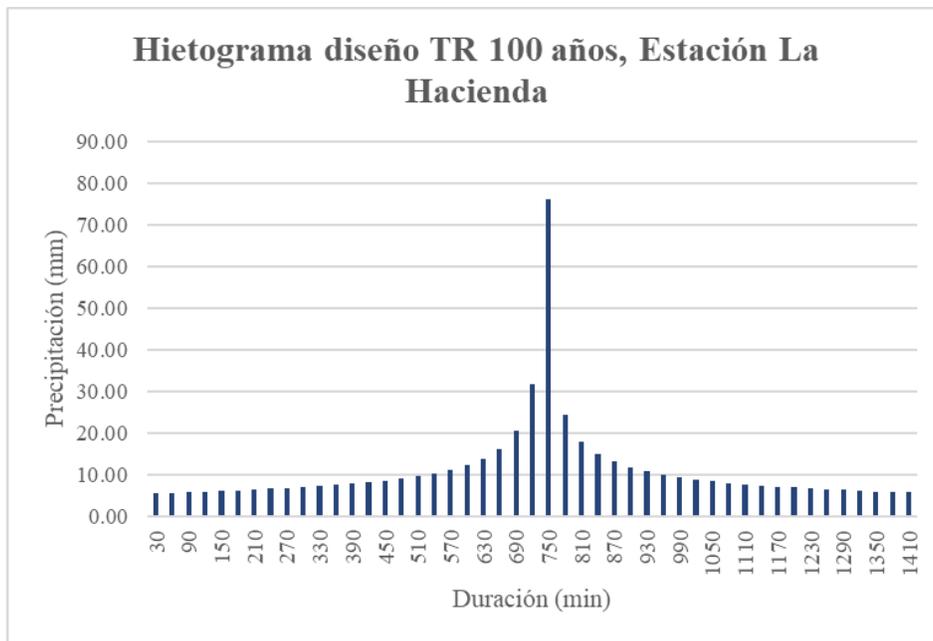


Figura 15. *Hietograma de diseño en (mm) para una duración de tormenta de 24 horas (Periodo de retorno 100 años), Estación La Hacienda*

Definidas las subcuencas, el valor de CN, los datos de precipitación y la aferencia de cada estación sobre cada una de las subcuencas se configuró el modelo hidrológico con la herramienta, tal como se muestra en la siguiente figura.

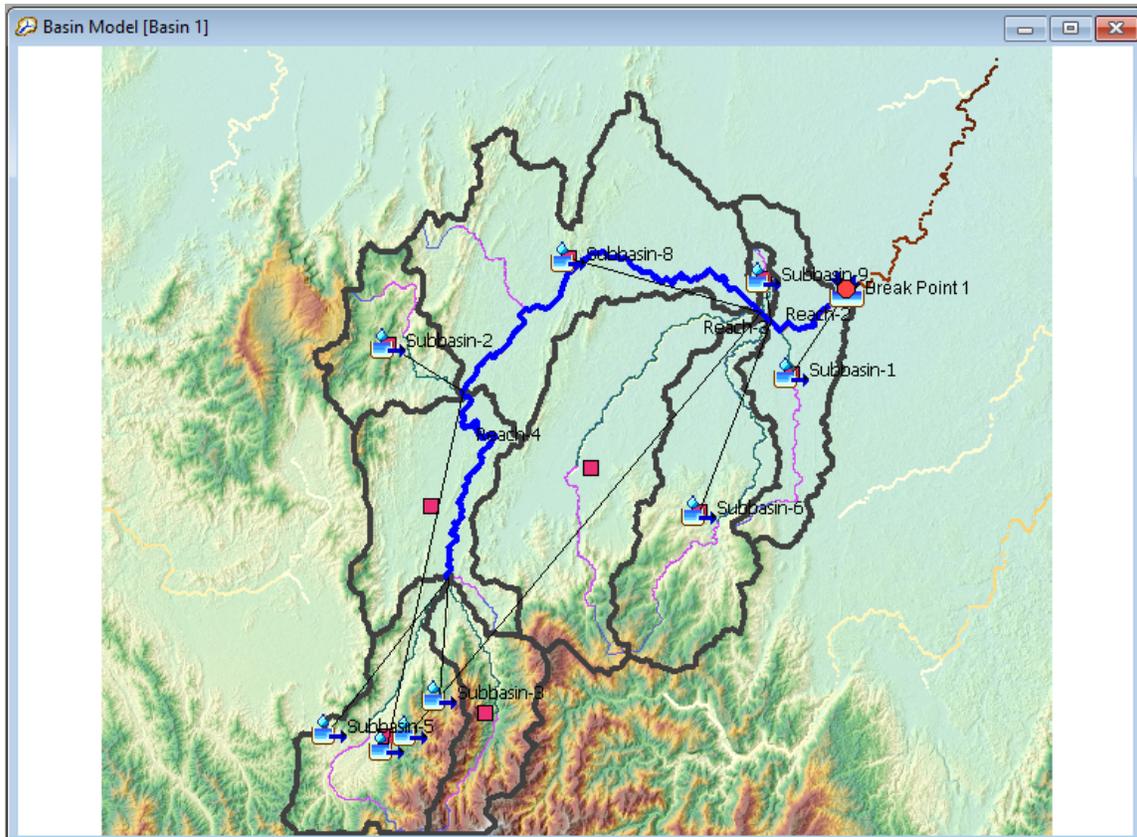


Figura 16. Modelo HEC-HMS

Finalmente, en el modelo hidrológico, se simuló el escenario de 100 años para obtener los hidrogramas de caudales para integrar en el modelo hidráulico. En las figuras a continuación se muestran las series de caudales de diseño obtenidas en cada una de las microcuencas analizadas.

La Figura 17 se muestra el hidrograma para las subcuencas 1, asociada a la estación Uré, en esta gráfica se observan las precipitaciones durante 24 horas, dónde en la parte superior se muestran los excesos de precipitación y las pérdidas, en la parte inferior, se evidencia que a las 17:00 hora se presenta el mayor caudal con un valor de 3339,7 m³/s.

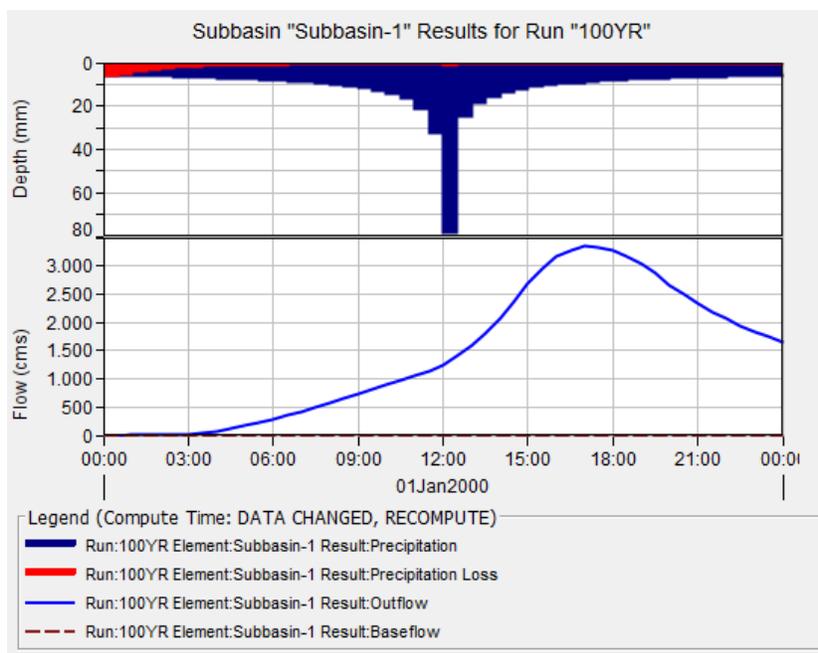


Figura 17. Hidrograma de crecida subcuencas de estudio 1, 100 años

La Figura 18 muestra el hidrograma correspondiente a las subcuencas 2, asociada a la estación Puerto Libertador. En este hidrograma se evidencia una mayor pérdida de precipitación en la parte superior y, en la parte inferior muestra que a las 15:00 horas se presenta el mayor pico de caudal, con un valor de 3018,8 m³/s; para esta subcuenca.

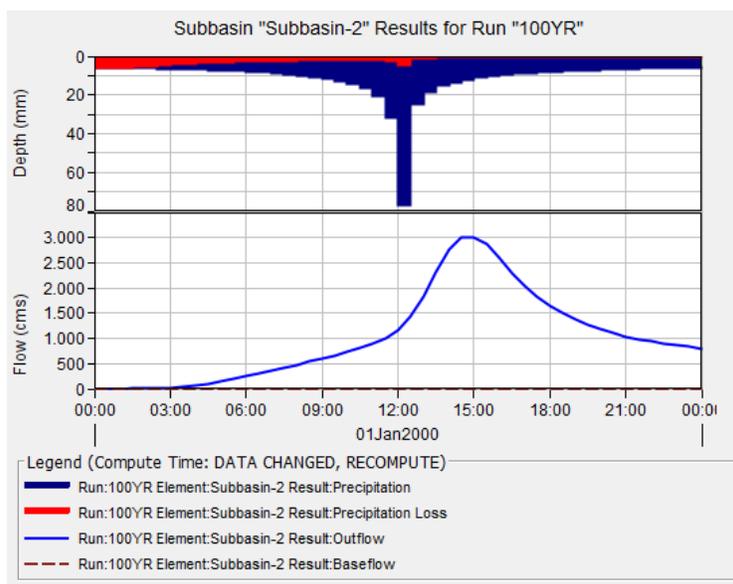


Figura 18. Hidrograma de crecida subcuencas de estudio 2, 100 años

En la Figura 19 se muestra el hidrograma correspondiente a la subcuenca 3, asociada a la estación Puerto Libertador. En esta gráfica se evidencia que a las 15:00 el caudal pico llega a un valor de 4361,7 m³/s.

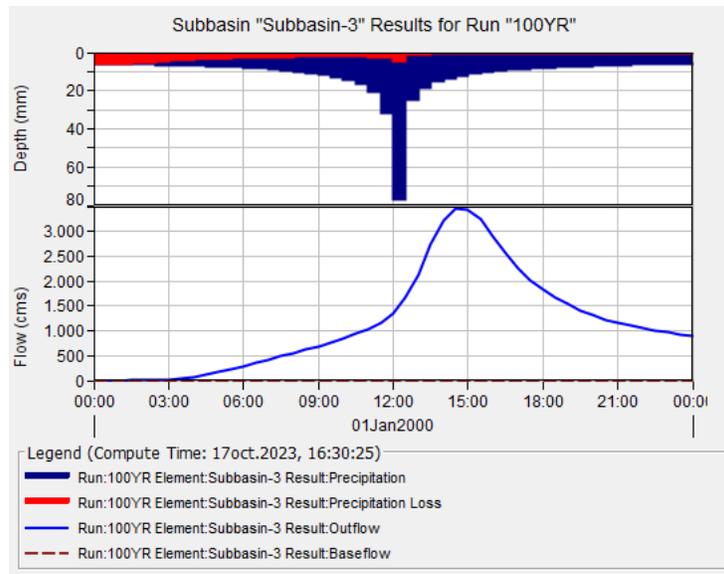


Figura 19. Hidrograma de crecida subcuencas de estudio 3, 100 años

En la Figura 20 se muestra el hidrograma correspondiente a subcuenca 4, asociada a la estación Puerto Libertador. En esta gráfica se evidencia que a las 17:30 horas se llega al caudal pico, con un valor de 7463,7 m³/s.

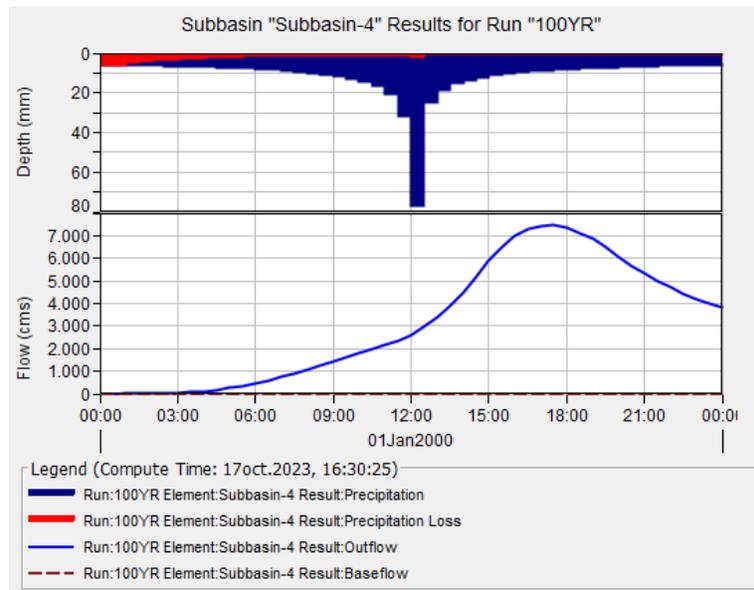


Figura 20. Hidrograma de crecida subcuencas de estudio 4, 100 años

En la Figura 21 se muestra el hidrograma correspondiente a subcuenca 5, asociada a la estación Puerto Libertador. En esta gráfica se evidencia que a las 15:30 horas se llega al caudal pico, con un valor de 4751,4 m³/s.

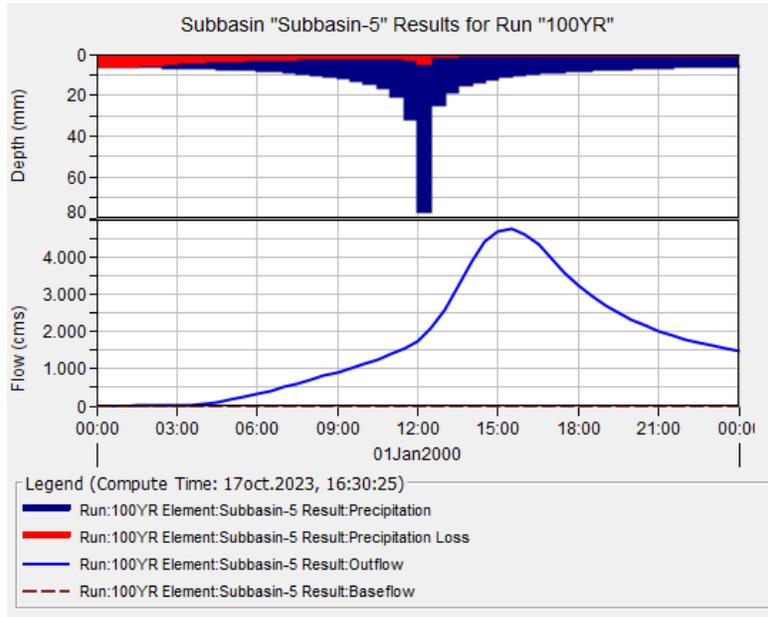


Figura 21. Hidrograma de crecida subcuencas de estudio 5, 100 años

En la Figura 22 se muestra el hidrograma correspondiente a la subcuenca 6, asociada a la estación Uré. En esta gráfica se evidencia que a las 16:30 horas se llega al caudal pico, con un valor de 5518,9 m³/s.

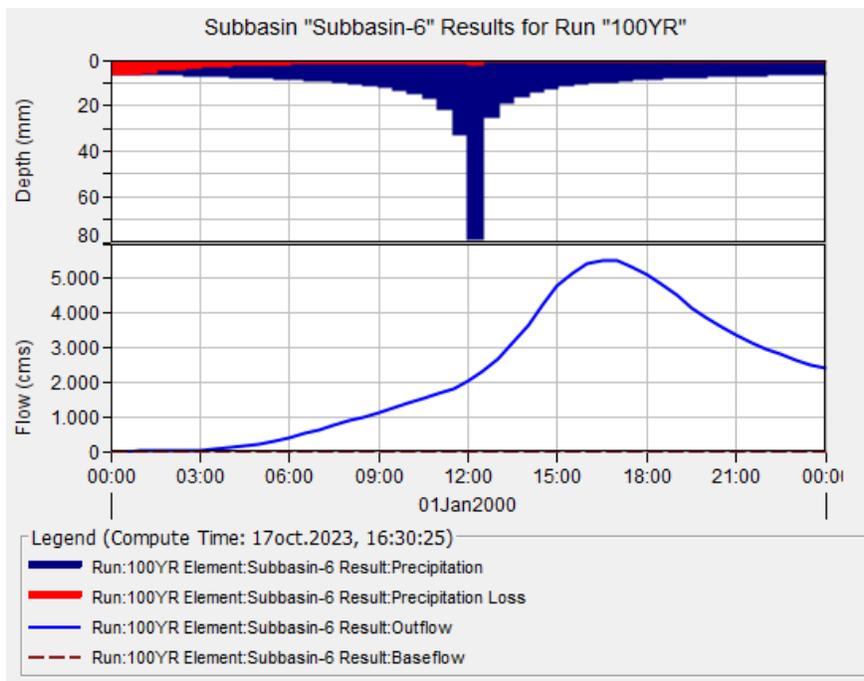


Figura 22. Hidrograma de crecida subcuencas de estudio 6, 100 años

En la Figura 23 se muestra el hidrograma correspondiente a subcuenca 7, asociada a la estación Puerto Libertador. En esta gráfica se evidencia que a las 16:30 horas se llega al caudal pico, con un valor de 4417,0 m3/s.

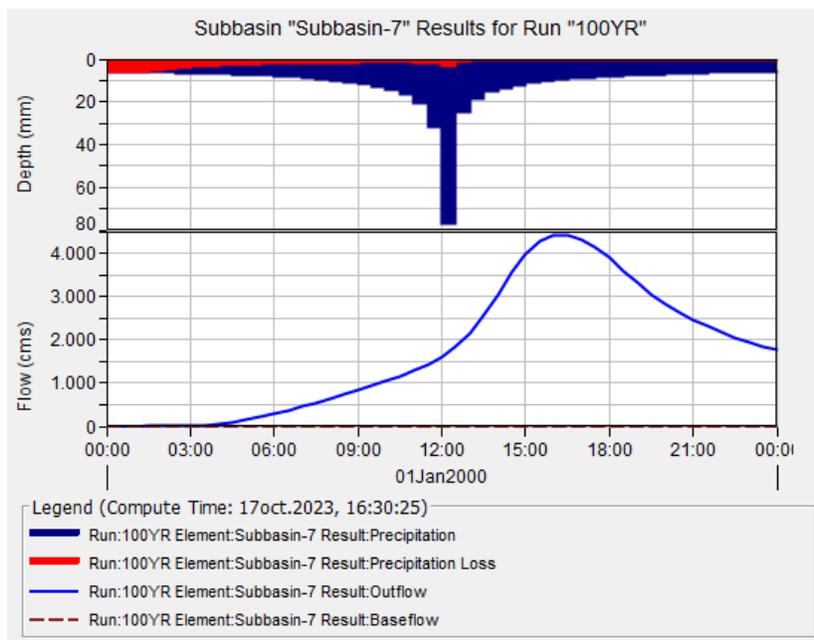


Figura 23. Hidrograma de crecida subcuencas de estudio 7, 100 años

En la Figura 24 se muestra el hidrograma correspondiente a la subcuenca 8, asociada a la estación Pica Pica. En esta gráfica se evidencia que a las 17:30 horas se llega al caudal pico, con un valor de 8069,0 m³/s.

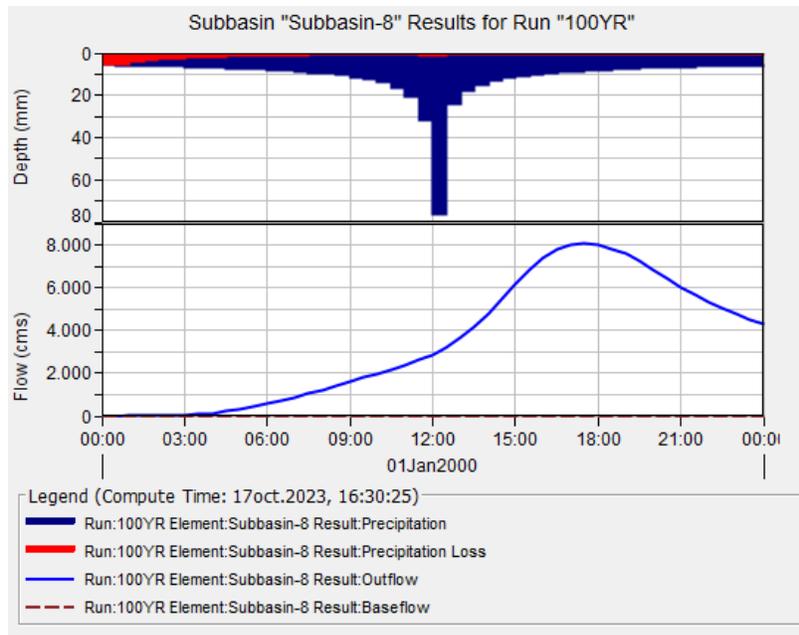


Figura 24. Hidrograma de crecida subcuencas de estudio 8, 100 años

En la Figura 25 se muestra el hidrograma correspondiente a la subcuenca 9, asociada a la estación La Hacienda. En esta gráfica se evidencia que a las 17:30 horas se llega al caudal pico, con un valor de 328,0 m³/s.

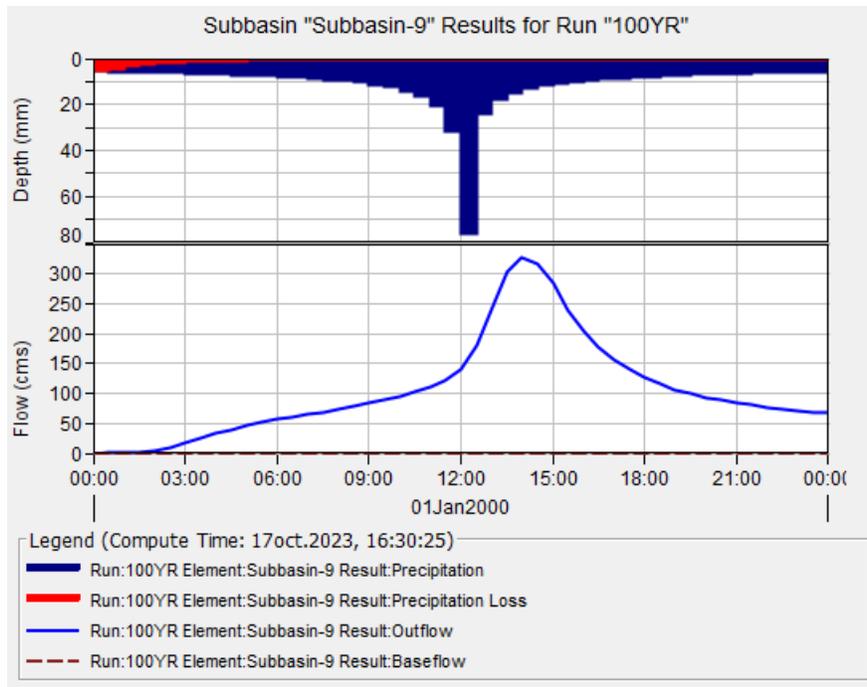


Figura 25. Hidrograma de crecida subcuencas de estudio 9, 100 años

De estos 9 hidrogramas, la subcuenca con mayor caudal fue la subcuenca 7 y la de menor caudal fue la subcuenca 9. También se puede notar que en caudal generado de la escorrentía en la simulación no logró disiparse por completo en ninguna de las subcuencas, por lo que se necesitan más de 24 horas para que esto ocurra y así lograr la reducción del flujo y prevenir la acumulación del agua.

Finalmente, se obtuvo el valor pico de descarga de la cuenca principal, como se muestra en la tabla 8. Este valor resulta bastante significativo, confirmando así, las implicaciones de este en términos de inundaciones.

Tabla 8. Caudal pico para la cuenca principal el periodo de retorno de 100 años

Periodo de retorno	TR100
Caudal pico (m ³ /s)	3339,7

Dentro de las limitaciones que se determinaron en la ejecución de este modelo hidrológico por medio del análisis de la escorrentía, se encontró que la variabilidad espacial y temporal en aspectos como la precipitación y la infiltración, no contempla la variación la cobertura en el paso de los años, debido a que en esta se hace uso de un DEM de una misión específica, con una superficie no variable, creando predicciones y evaluaciones de riesgo simplificadas y mejor precisión. La cobertura variable del suelo, que incluye aspectos como la vegetación, la impermeabilización y la rugosidad, desempeña un papel crítico en la forma en que el agua se comporta durante una inundación (San Román, 2021). La omisión de esta variabilidad puede llevar a la subestimación de las áreas propensas a inundaciones, la inadecuada planificación de medidas de mitigación y la falta de protección efectiva para la población y

las propiedades en riesgo. Este tipo de modelación también está sujeto a cierto grado de incertidumbre debido a las limitaciones en los datos, las simplificaciones en los procesos, los cambios en la topografía y las propiedades del suelo, en el sistema hidrológico que se analiza (San Román, 2021).

Respecto a la ejecución de modelo hidráulico, en el HEC-RAS, la geometría establecida para la ejecución de modelo se muestra en la Figura 26, donde se observa el DEM, junto con el área de modelación que se estableció a partir de una geometría 1D, donde se definió el trazado del río en color azul, los límites del escarpe del cauce en color rojo, el límite de la extensión de las geoformas asociadas a posibles eventos extremos en color verde y sus respectivas secciones transversales. Finalmente, a la condición de frontera de salida se le asignó la pendiente de 0,00082588, correspondiente al tramo del recorrido del río lo largo de la cuenca definida

Las líneas de secciones transversales se dibujaron con una longitud entre 3km y 5km y una distancia entre ellas de 1km a 3km, la zona donde se ve mayor densidad de líneas, corresponde la ubicación de la zona urbana del municipio de Montelíbano, siendo esta la zona de mayor interés respecto al comportamiento de la inundación.

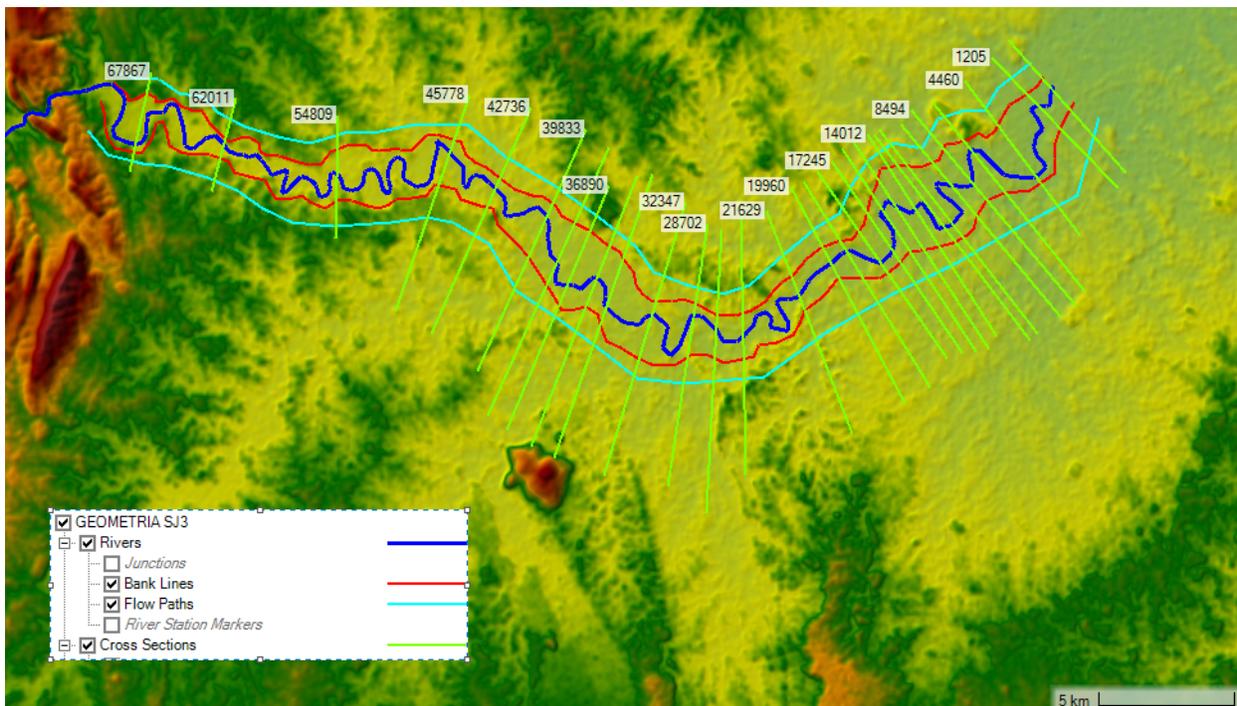


Figura 26. Geometría asignada, modelo HEC-RAS, río San Jorge

Las secciones transversales muestran cómo varía la elevación de la superficie del terreno, la profundidad del agua y otros parámetros hidráulicos a lo largo de una línea perpendicular al flujo del río o canal. Estas secciones transversales son esenciales para comprender cómo el agua fluye y cómo interactúa con el entorno circundante. En una sección transversal típica, se representan elementos como la línea de flujo, la superficie del terreno, la profundidad del agua. En la Figura 27, se muestran las secciones transversales más representativas dentro de modelo

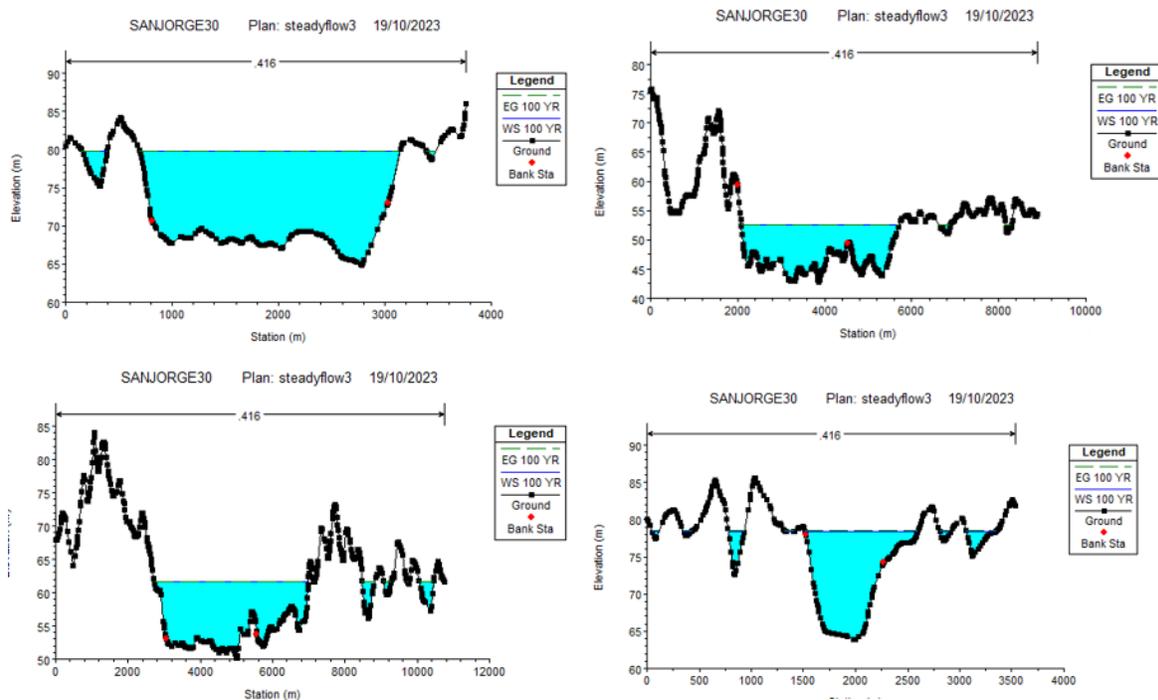


Figura 27. Secciones transversales

Para la asignación del coeficiente de Manning, se tuvieron en cuenta las variables definidas anteriormente, donde según las características del terreno, el material con mayor predominancia fue la grava gruesa, con un grado de irregularidad severo y variaciones ocasionales en las secciones, el grado de vegetación es medio y el grado de intensidad de la sinuosidad es severo. En la Tabla 9 se muestran los valores asignados para cada una de las condiciones y el valor total resultante.

Tabla 9. Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad de Manning para la cuenca evaluada

	<i>n0</i>	<i>n1</i>	<i>n2</i>	<i>n3</i>	<i>n4</i>	<i>n5 (m)</i>	<i>n</i>
Valor 1	0.28	0.01	0.005	0.01	0.015	1.3	0.416

De acuerdo con el estudio hidrológico, se tuvo en cuenta una cauda pico para la cuenca de 3339,7 m³/s para el periodo de retorno de 100 años, siendo este valor utilizado como condición de frontera dentro la simulación correspondiente.

Una vez definida la geometría y las condiciones, se simuló bajo un flujo estacionario, donde se asume que este no varía con el tiempo y tienen una misma velocidad, siendo estas condiciones acordes con las características del río y la información disponible. En las condiciones de contorno, se escogió la profundidad normal; bajo esta condición, el software hace uso de la energía generada por la pendiente para calcular una profundidad uniforme con ayuda la ecuación de Manning, y simulando de igual forma

un flujo uniforme. Cabe resaltar también que estas condiciones de flujo y contorno requieren menos información adicionales, en comparación con otros escenarios de modelación.

Finalmente se analiza este escenario bajo un régimen de flujo subcrítico, característico en la simulación de escenarios que cuentan con altas profundidades y bajas velocidades, dónde como resultado de obtienen capas en formato ráster con información de velocidad y profundidad del agua, dentro del escenario de inundación. La Figura 28 muestra los resultados de la distribución de la velocidad dentro del área de estudio, en esta imagen se aprecia una velocidad constante, con valores que van desde los 0.00 y 0.42 m/s. La Figura 29 muestra los niveles de la lámina de agua, los cuales varían entre los 0.001 y 16,82 m.

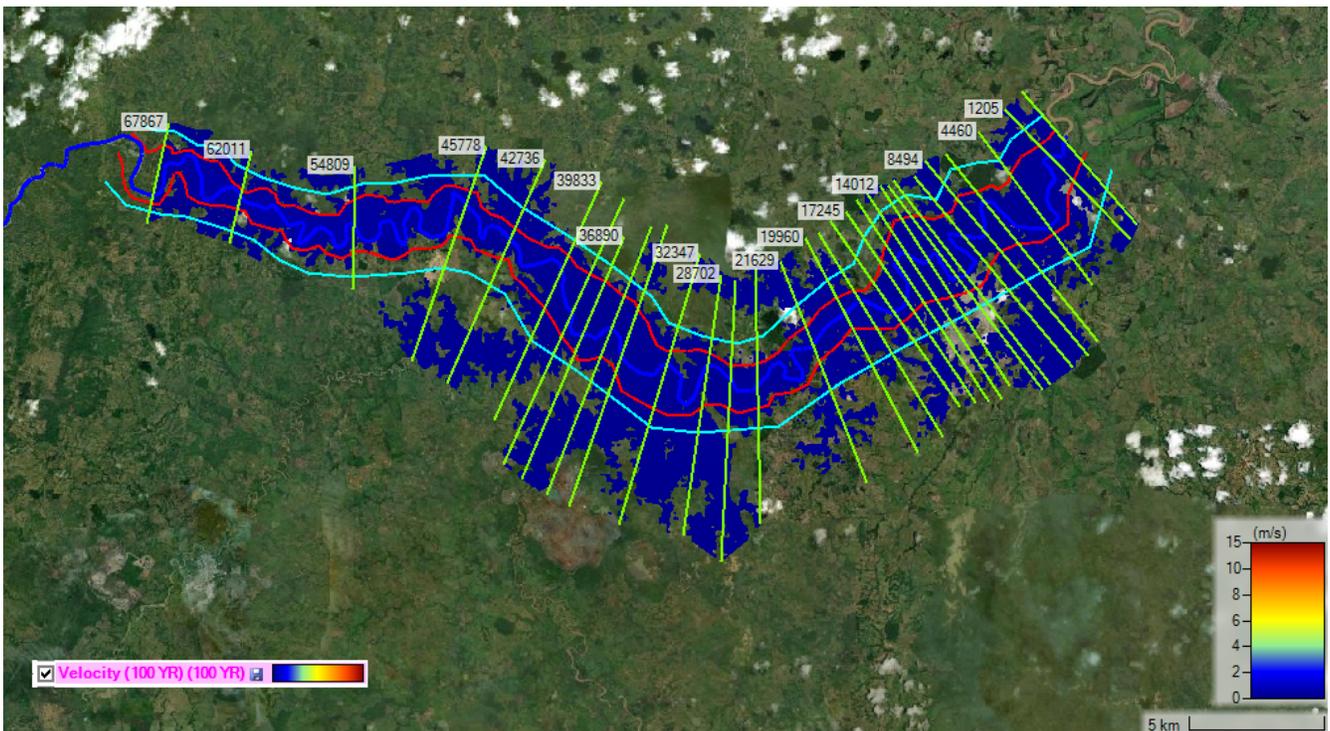


Figura 28. Distribución de los resultados de velocidad para el RT 100 años

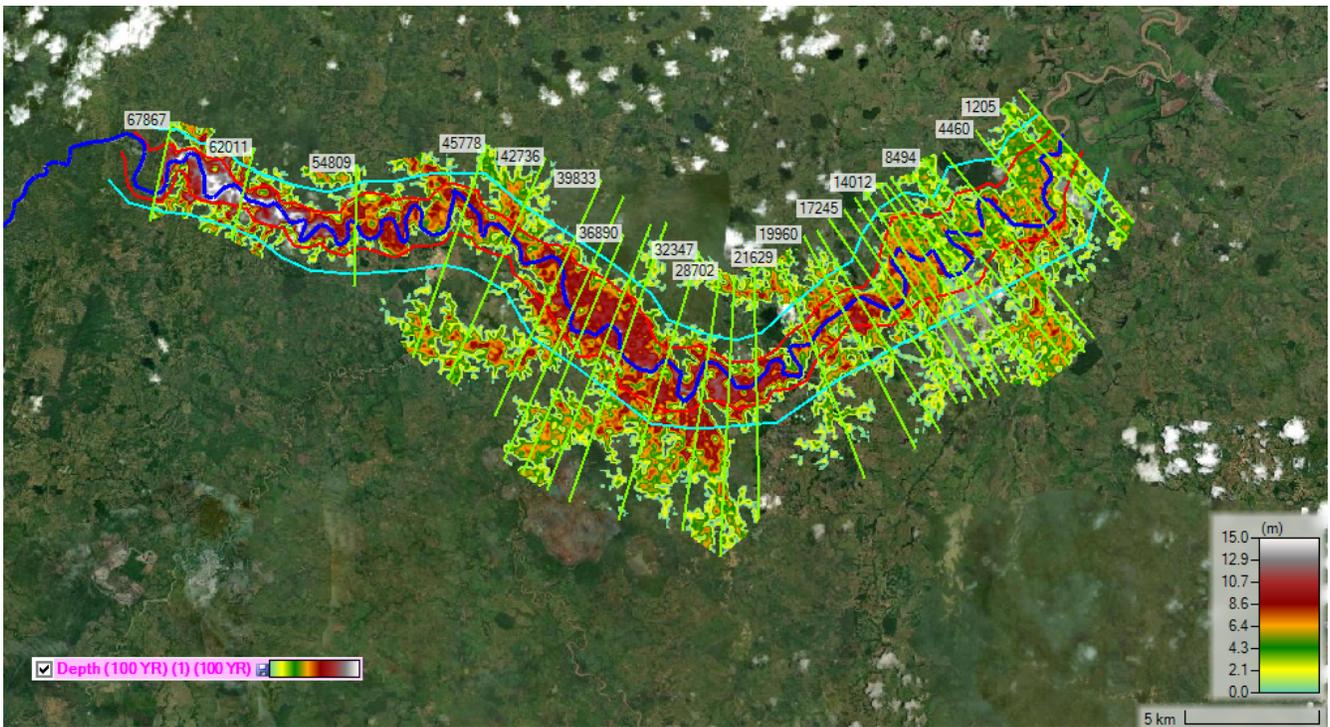


Figura 29. *Distribución de los resultados de profundidad de la lámina de agua para el TR100*

Al hacer este tipo de modelos bajo las características de un flujo estable, dónde sus características no varían significativamente dentro del periodo de análisis, se debe tener en cuenta que existen limitaciones relacionadas con la asunción de un flujo permanente, dónde no se tienen en cuenta comportamiento no transitorio, que presentan variaciones rápidas de velocidad y caudal.

Adicionalmente, se realizó un análisis estadístico de los caudales para los escenarios de 25, 50, 100 y 500 años, para lograr la simulación de estos y graficar el comportamiento de las áreas de inundación con los diferentes periodos de retorno. En la Figura 30 se observa que el área tiene un aumento similar al comportamiento logarítmico, dónde tiene una tendencia a que las áreas aumenten rápidamente en los primeros años y después tengan un crecimiento más lento.

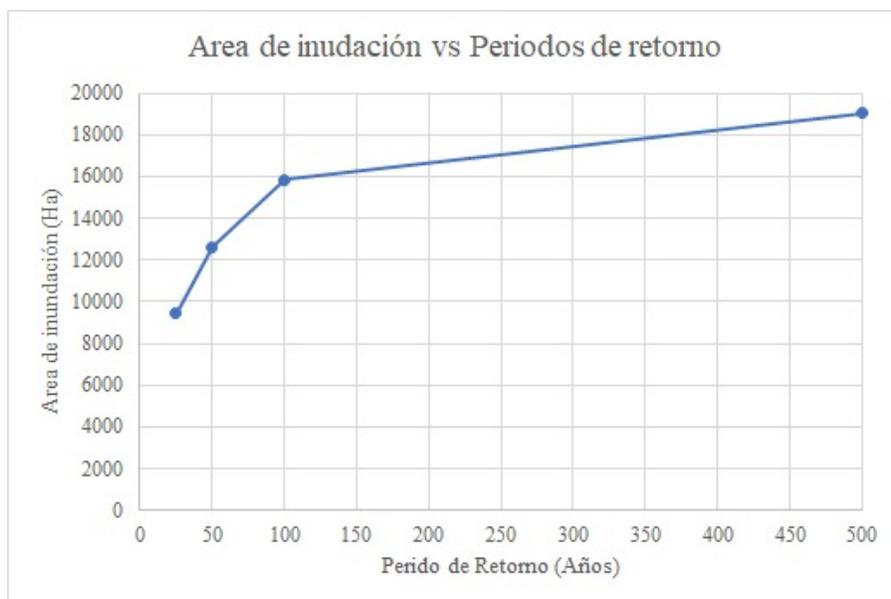


Figura 30. *Crecimiento del área respecto al periodo de retorno*

9.3.Objetivo específico 3

Identificar las zonas de amenaza ante inundación en municipio de Montelíbano

Como se mencionó anteriormente para esta zonificación se clasificó la capa de altura de la lámina de agua según la metodología adoptada por IDIGER (2020), teniendo en cuenta la intensidad en función de la altura de la lámina de agua modelada para el río San Jorge, teniendo en cuenta un periodo de retorno de 100 años.

La Figura 31 muestra la distribución de la amenaza por inundación asociada al río San Jorge, haciendo énfasis en la Figura 32 dónde se hace zoom al casco urbano del municipio. Al hacer el cálculo de las áreas por categoría y relacionar su porcentaje respecto al área total de la amenaza, como se muestra en la Tabla 9, se encontró que la amenaza alta tiene un valor de 14.605 hectáreas, abarcando el 92% del área total. A nivel del casco urbano del municipio, se evidencia que esta amenaza se presenta en la zona noroccidental del municipio, demostrando una llanura de inundación una distancia entre los 3 y 5 kilómetros del río del río San Jorge.

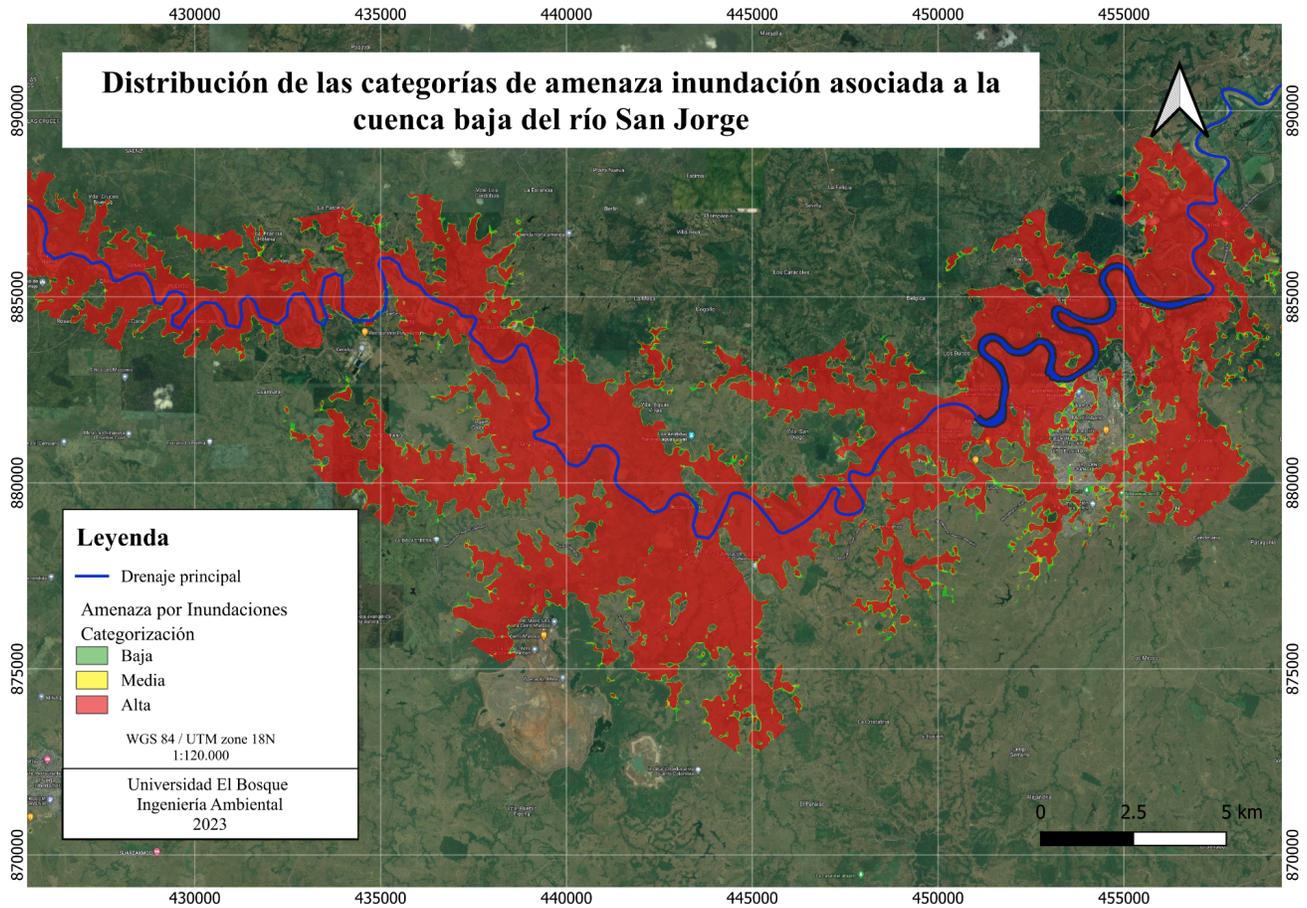


Figura 31. *Distribución de las categorías de amenaza por inundación asociada a la cuenca baja del río San Jorge*

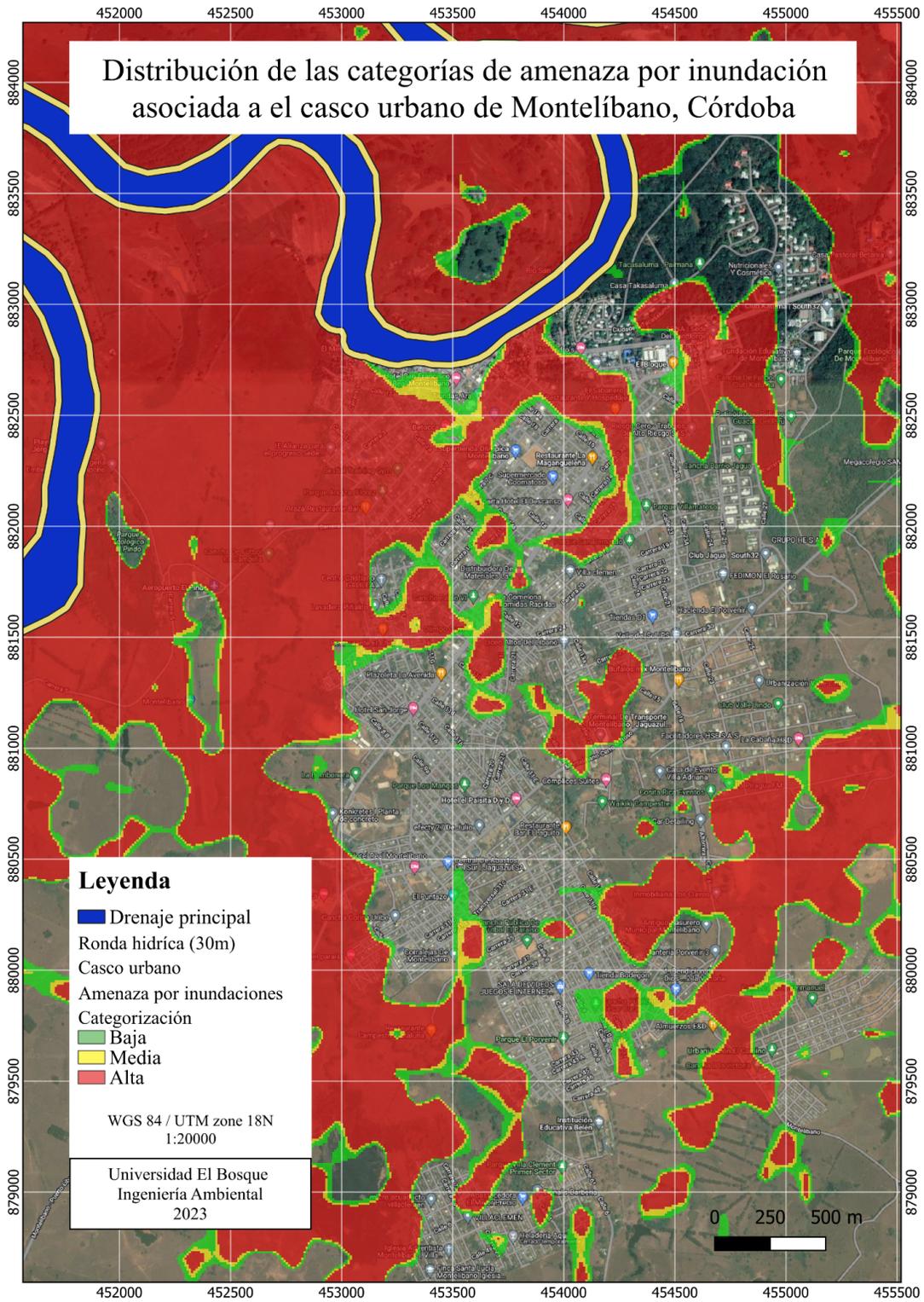


Figura 32. Distribución de las categorías de amenaza por inundación asociada a el casco urbano de Montelíbano, Córdoba

Tabla 10. *Área total por categoría de amenaza*

Categoría	Área (ha)	Porcentaje
Baja	775.18	4.9%
Media	457.45	2.9%
Alta	14605.00	92.2%
Área total	15837.63	

Dentro de las zonas que poseen una mayor amenaza se encuentran zonas residenciales, comerciales y áreas educativas, siendo estos puntos de gran interés de protección debido a las graves consecuencias que conlleva para la vida, la seguridad y la economía local. Estas inundaciones representan un riesgo directo para la vida de los residentes, estudiantes y trabajadores, lo que puede resultar en tragedias y daños personales. Además, provocan daños materiales significativos a las viviendas, escuelas y negocios, generando pérdidas económicas y trastornos a la educación. La interrupción de la actividad económica en las zonas comerciales lleva a la pérdida de empleos y la disminución de la producción económica, lo que afecta negativamente la calidad de vida de la población. Por tanto, la prevención de inundaciones y la gestión adecuada de riesgos son esenciales para garantizar la seguridad, la estabilidad económica y la calidad de vida de la comunidad.

9.4. Objetivo específico 4

Identificar soluciones de acuerdo con las problemáticas encontradas en la evaluación de la amenaza

Con los resultados obtenidos de la zonificación se identificó que la zona urbana del municipio está categorizada en una amenaza alta por inundación, con un porcentaje de 92.2% respecto al área total analizada requiere soluciones para el control de las inundaciones, para así evitar daños estructurales y a la comunidad.

Dentro de las alternativas existentes para el manejo de la amenaza por inundación en el municipio de Montelíbano, se plantearon soluciones estructurales y no estructurales, las cuales aportan para la gestión de este tipo de desastres naturales (Bravo & Ortiz, 2011). Las soluciones estructurales implican la construcción de infraestructuras físicas, como diques, presas, canales de desvío o sistemas de drenaje, con el propósito de minimizar la exposición ante la amenaza. Estas soluciones suelen ser tangibles y se utilizan para cambiar la forma en que el agua o las amenazas naturales interactúan con el entorno (Bravo & Ortiz, 2011). Por otro lado, las soluciones no estructurales se basan en enfoques no físicos, como la planificación, la legislación, la educación pública y la concienciación, para reducir la exposición y vulnerabilidad ante amenazas. Estas soluciones a menudo se centran en cambiar el comportamiento humano y las políticas, promoviendo prácticas más seguras y sostenibles. La combinación de soluciones estructurales y no estructurales es fundamental para una gestión integral de amenazas y desastres, ya que ambos enfoques pueden complementarse para aumentar la resiliencia de las comunidades y reducir el impacto de eventos adversos (Bravo & Ortiz, 2011).

Un ejemplo de solución estructurada es la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en Montelíbano. En primer lugar, es esencial llevar a cabo una evaluación detallada de la zona, considerando aspectos como la topografía, el uso del suelo y los patrones de precipitación para identificar las áreas vulnerables a inundaciones como se hizo anteriormente. La planificación urbana y la colaboración con las autoridades locales son fundamentales para integrar los SUDS en proyectos de desarrollo y renovación urbana. La selección de técnicas SUDS apropiadas, como zonas de infiltración, techos verdes, pavimentos permeables, espacios verdes de infiltración y barriles de lluvia, debe estar respaldada por un diseño y construcción adecuados. La educación y sensibilización de la comunidad son clave para informar sobre los beneficios de los SUDS y promover la participación ciudadana en su mantenimiento (Forfang, 2021; Hankin et al., 2021). El monitoreo continuo y la colaboración multidisciplinaria garantizan la eficacia a largo plazo de estas soluciones, mientras se consideran las dimensiones culturales y sociales para adaptarlas a la realidad local. La implementación exitosa de SUDS en Montelíbano contribuirá a mejorar la resiliencia de la ciudad ante inundaciones y promoverá prácticas sostenibles en la gestión del agua en la región (Forfang, 2021; Huang et al., 2020).

La poligrafía social, como medida no estructural, es un enfoque que busca comprender y analizar las dinámicas sociales y las interacciones de una comunidad en relación con una amenaza, como las inundaciones. Para implementar la poligrafía social en Montelíbano frente a las amenazas de inundación, se deben seguir pasos específicos (Betancurth Loaiza et al., 2019). En primer lugar, es esencial identificar a los actores clave en la comunidad, incluyendo residentes locales, autoridades municipales y organizaciones locales. Luego, se debe llevar a cabo una evaluación de la vulnerabilidad de la comunidad, analizando factores como las zonas de amenaza que se muestran anteriormente en la zonificación, frente a la capacidad de respuesta local. La participación de la comunidad es fundamental, fomentando reuniones públicas y la formación de comités de gestión de riesgos (Betancurth Loaiza et al., 2019). A través de la colaboración entre la comunidad y otras partes interesadas, se pueden desarrollar estrategias de mitigación de inundaciones, como la mejora de la infraestructura de drenaje y la promoción de prácticas de desarrollo sostenible. Un sistema de monitoreo y evaluación continuos permitirá ajustar las medidas según sea necesario, y se debe trabajar en conjunto con las autoridades para desarrollar políticas y regulaciones que fomenten la seguridad en la construcción y la gestión sostenible del agua. La educación pública y la concienciación son esenciales, al igual que la coordinación y cooperación entre todas las partes interesadas. La implementación de la poligrafía social en Montelíbano contribuirá a una gestión más efectiva de las amenazas de inundación, involucrando a la comunidad y a las partes interesadas locales en la reducción de riesgos y la mejora de la resiliencia ante estas amenazas (Betancurth Loaiza et al., 2019).

Para crear una metodología de soluciones integradas se puede incluir también un sistema de alerta temprana dentro del municipio, donde se establezca una red de monitoreo meteorológico y de niveles de agua en ríos y arroyos cercanos a la localidad. Esta red puede estar compuesta por estaciones climáticas, sensores de nivel de agua y sistemas de radar que proporcionen datos en tiempo real sobre las condiciones climáticas y los niveles de agua (Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento & Banco Mundial Región de América Latina y El Caribe, 2014). Adicionalmente, estos sistemas deben incluir un centro de control y análisis de datos que reciba información constante de estas estaciones y la

procese para identificar patrones climáticos que puedan indicar la posibilidad de inundaciones. Este centro estaría equipado con personal capacitado para interpretar la información y tomar decisiones informadas. Finalmente, es necesario un sistema de comunicación eficiente que permita la difusión rápida de alertas a la población (Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento & Banco Mundial Región de América Latina y El Caribe, 2014). Esto incluye la utilización de sirenas, mensajes de texto, aplicaciones móviles, redes sociales y otros canales de comunicación para alertar a los residentes sobre la inminente amenaza de inundaciones (Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento & Banco Mundial Región de América Latina y El Caribe, 2014).

10. Conclusiones y recomendaciones

La evaluación de las amenazas de inundación es un proceso esencial para la gestión adecuada del riesgo de desastres a nivel nacional. En el caso del municipio de Montelíbano, se ha identificado un riesgo significativo de inundaciones debido a factores como su topografía, precipitación intensa y la ocupación del suelo. A través del uso de modelación hidráulica e hidrológica, se logró obtener una comprensión más profunda del comportamiento de las inundaciones en la zona de estudio. Con esta modelación, se ha identificado que el caudal del río puede aumentar de manera significativa en el periodo de retorno de 100 años. Por lo tanto, es crucial que se tomen medidas adecuadas para prevenir futuros daños tanto a la comunidad como a la infraestructura del municipio.

Para llevar a cabo esta evaluación, se realizó una caracterización de la información geomorfológica, geológica e hidrometeorológica de la zona del municipio de Montelíbano y la cuenca del Río San Jorge. Esto se basó en datos históricos, lo que reveló que las condiciones geológicas y geomorfológicas son elementos críticos en la evaluación de la zona de estudio. Las geoformas presentan características especiales que, sin una planificación adecuada del territorio y un uso responsable del mismo, pueden aumentar el riesgo, como se observa en la situación actual. En lo que respecta a la información hidrometeorológica, a pesar de la robustez de la plataforma del IDEAM en cuanto a precipitación, se encontró que había estaciones con datos faltantes en la zona de estudio, lo que requirió el relleno estadístico de esos datos.

Para mejorar los resultados y abordar estas deficiencias, se recomienda utilizar misiones satelitales para complementar los datos faltantes y obtener información más completa sobre precipitación y caudal en la zona específica de estudio.

En la propuesta de los modelos hidrológico e hidráulico de la cuenca del Río San Jorge en Montelíbano, las herramientas HEC RAS y HMS proporcionaron información valiosa sobre cómo se comportaría el río San Jorge en caso de un aumento significativo en el caudal con un periodo de retorno de 100 años. Estos modelos también destacaron las áreas que se verían afectadas en términos de profundidad de la lámina de agua y velocidad del flujo.

El modelo hidrológico se basó en la simulación de escorrentía de lluvia utilizando un Modelo Digital del Terreno (DEM) del año 2011. Sin embargo, se enfatiza la necesidad de considerar la variabilidad espacial y temporal al definir subcuencas y condiciones iniciales, además de la posibilidad de complementar las simulaciones con modelos de pronóstico meteorológico para mejorar la predicción de eventos hidrológicos extremos.

En cuanto a la modelación hidráulica, se utilizó una aproximación 1D para representar el flujo a lo largo de la longitud del río o canal de manera unidimensional, lo que facilitó la definición de la cuenca de manera simple y eficiente, una ventaja dada la gran cantidad de datos manejados y la extensión de la

cuenca baja del río San Jorge. No obstante, se sugiere mejorar la definición de las condiciones de flujo, teniendo en cuenta posibles condiciones inestables para simular escenarios donde el flujo no sea uniforme y haya cambios en la geometría del canal.

Para abordar las problemáticas encontradas en la evaluación de la amenaza y dado el alto riesgo que enfrenta el municipio, se propone la implementación de soluciones tanto estructurales como no estructurales de manera integrada. Esto se realiza con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de la comunidad frente a posibles inundaciones.

La implementación exitosa de soluciones estructurales y no estructurales requiere una colaboración estrecha entre las autoridades locales, la comunidad y otros actores relevantes. Es importante tener un enfoque a largo plazo y adaptativo, ya que las amenazas pueden evolucionar con el tiempo. Además, la comunicación efectiva y la educación pública son fundamentales para garantizar que las personas estén preparadas y sepan cómo responder ante desastres.

11. Referencias Bibliográficas

- Alarcón, A., & Rozo, M. A. (2021). Aplicación de índices espectrales para determinar la transformación del bosque seco en Agua de Dios (Cundinamarca, Colombia). *Revista Avances investigación En ingeniería*. <https://link.gale.com/apps/doc/A681186305/IFME?u=anon~8c4e503&sid=googleScholar&xid=c8b95f8c>
- Alcaldía de Montelíbano. (2000). *Plan Básico de Ordenamiento Territorial de Montelíbano 2001-2010*.
- Arrieta, E. J., & Galván López, E. M. (2017). *COMPORTAMIENTO ESPACIO TEMPORAL DE LAS INUNDACIONES EN EL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA Y SU RELACIÓN CON LA PRECIPITACIÓN. PERIODO 1938 – 2015*. Universidad de Córdoba.
- Betancurth Loaiza, D. P., Vélez Álvarez, C., & Sánchez Palacio, N. (2019). Cartografía social: construyendo territorio a partir de los activos comunitarios en salud. *Entramado*, 16(1), 138–151. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.6081>
- Bravo, E., & Ortiz, R. (2011). *LAS INUNDACIONES EN COLOMBIA. MEDIDAS ESTRUCTURALES Y NO-ESTRUCTURALES*.
- Cárdenas, J. (2022). *INCORPORACIÓN DE LA GESTIÓN DEL RIESGO COMO DETERMINANTE AMBIENTAL PARA EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL EN ÁREAS SUSCEPTIBLES A INUNDACIONES LENTAS. CASO DE ESTUDIO VEREDA EL PLAYÓN BAJO SINÚ (CÓRDOBA, COLOMBIA)*.
- Cárdenas, K. (2018). ANÁLISIS GENERAL DE LA GESTIÓN DEL RIESGO POR INUNDACIÓN EN COLOMBIA. *Revista Científica En Ciencias Ambientales y Sostenibilidad*, 4(1). <https://revistas.udea.edu.co/index.php/CAA/article/view/335841>
- Chagua, J. Z. (2018). *Estudio de inundación de la zona correspondiente al distrito de Calango, provincia de Cañete, departamento de Lima, Mediante el uso de los modelos matemáticos HEC-HMS Y HEC-RAS*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Chow, V. Te. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw Hill Interamericana S.A. .

- Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo SNGRD. (2017). *Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes*.
- Ley 1523, Pub. L. No. 1523 (2012).
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2018). *DIEZ RESPUESTAS SOBRE EL FENÓMENO DE LA NIÑA Y SUS IMPACTOS EN JURISDICCIÓN CAR*.
- Corporación Autónoma Regional de los Valles de Sinú y San Jorge. (2019). *DOCUMENTO PLAN DE ORDENAMIENTO Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA RÍO BAJO SAN JORGE*.
- CVS. (2016). *Nosotros*. Corporación Autónoma Regional de Los Valles Del Sinú y Del San Jorge.
- Dong, Y., & Peng, C.-Y. J. (2013). Principled missing data methods for researchers. *SpringerPlus*, 2(1), 222. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-222>
- Ley 99, (1993).
- Estrada, V., & Pacheco, R. M. (2012). Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 33(1), 71–80. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382012000100008&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Forfang, S. (2021). *Study finds nature-based solutions add flood resilience across large areas*. Interreg North Sea.
- Gobernación de Córdoba. (n.d.). *Misión y visión*. Gobernación de Córdoba.
- Guerrero, A., & Londoño, G. (2007). *Introducción de errores en la medición*. Instituto Tecnológico Metropolitano, ITM.
- Guzmán, R., & Maldonado, P. (2020). Modelo Biopsicosocial en Salud ¿Cuál es la importancia? *Instituto de Salamanca*.
- Hankin, B., Page, T., McShane, G., Chappell, N., Spray, C., Black, A., & Comins, L. (2021). How can we plan resilient systems of nature-based mitigation measures in larger catchments for flood risk reduction now and in the future? *Water Security*, 13, 100091. <https://doi.org/10.1016/J.WASEC.2021.100091>
- Hernandez-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación : las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Education.
- HIDROLOGÍA - IDEAM*. (n.d.). Retrieved November 4, 2021, from <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/hidrologia>
- Huang, Y., Tian, Z., Ke, Q., Liu, J., Irannezhad, M., Fan, D., Hou, M., & Sun, L. (2020). Nature-based solutions for urban pluvial flood risk management. *WIREs Water*, 7(3). <https://doi.org/10.1002/wat2.1421>
- IDEAM. (n.d.). *Modelación Hidrológica y amenazas por inundación*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2018). *Protocolo de Modelación Hidrológica e Hidráulica*. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023833/Protocolo_Modelacion_HH.pdf

- IDEAM. (2020). *Memoria Técnica Afectación Inundaciones*.
- IDIGER. (2020). *Guía para la Elaboración de Conceptos Técnicos para la Planificación Territorial*. IDIGER.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). *Manual de drenaje para carreteras*.
<https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/984-manual-de-drenaje-para-carreteras>
- Resolución 2115, (2007).
- Oquendo, Y. (2020). *Dinámica de las inundaciones en el municipio de San Pelayo (Córdoba) desde su configuración espacial hasta la actualidad: una mirada desde la geografía histórica*. Universidad de Córdoba.
- Decreto 3570, Pub. L. No. Decreto (2011).
- La Junta Directiva del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, (IDEAM), Pub. L. No. 2241 (1995).
- Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento, Banco Mundial Región de América Latina y El Caribe. (2014). *SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA POR FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS EN COLOMBIA: HERRAMIENTAS PARA LA TOMA DE DECISIONES EN MOMENTOS DE EMERGENCIAS*.
- Rojas, O., & Martínez, C. (2011). Revista universitaria de geografía. *Revista Universitaria de Geografía*, 20(1), 83–116.
http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-42652011000100005&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- San Román, J. (2021). *HEC-HMS. Manual elemental* .
- Sedano-Cruz, K., Carvajal-Escobar, Y., & Díaz, J. Á. (2013). *ANÁLISIS DE ASPECTOS QUE INCREMENTAN EL RIESGO DE INUNDACIONES EN COLOMBIA ANALYSIS OF THE ASPECTS WHICH INCREASE THE RISK OF FLOODS IN COLOMBIA*. 37.
- Servicio Geológico Colombiano. (2012). *CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA DE LAS PLANCHAS 72 PUEBLO NUEVO Y 82 MONTELÍBANO (DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA)* .
- Tavera, A. C. (2018). *Evaluación del impacto de la resolución de modelado en la simulación del evento de inundación de Mocoa en abril de 2017*. Universidad El Bosque.
- Triana, M. L., & Leal, J. S. (2022). *Propuesta sostenible para la mitigación del riesgo de inundación en la cuenca alta del río Combeima municipio Ibagué, Tolima*. Universidad El Bosque.
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2014). *Misión y visión*. UNGRD.
<https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Mision-y-Vision.aspx#:~:text=Somos%20la%20Unidad%20que%20dirige%2C%20orienta%20y%20coordina,el%20manejo%20de%20los%20desastres%20asociados%20con%20fen%C3%B3menos>
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2022, May 9). *Lluvias han afectado a más de 18.000 familias en Colombia. Llamado a no bajar la guardia en lo que queda de la temporada*. UNGRD.

Viloria de La Hoz, J. (2007). La economía del departamento de Córdoba : ganadería y minería como sectores clave. *Observatorio Del Caribe Colombiano*, 2000.
<https://repositorio.banrep.gov.co/handle/20.500.12134/1951>