



**ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE LA
CUENCA CALICANTO ENTRE 2005 Y 2024**

Diana Graciela Bobadilla Zapata

**UNIVERSIDAD DEL SINÚ SECCIONAL CARTAGENA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

PREGRADO

CARTAGENA DE INDIAS D. T. y C.

2025

**ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE LA
CUENCA CALICANTO ENTRE 2005 Y 2024**

DIANA GRACIELA BOBADILLA ZAPATA

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL**

ASESORES:

DUBAN ANDRES PATERNINA VERONA

JORGE DE JESÚS MERCADO SÁNCHEZ

UNIVERSIDAD DEL SINU SECCIONAL CARTAGENA

PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

PREGRADO

IX SEMESTRE

CARTAGENA DE INDIAS D. T. y C.

Cartagena, 19 de mayo de 2025

Doctor:

Ricardo Pérez Sáenz

Director de Investigaciones

Universidad del Sinú – Elías Bechara Zainúm

Seccional Cartagena

Cordial saludo.

La presente tiene como fin someter a revisión y aprobación para la ejecución del proyecto de investigación titulado: *“Análisis de la evolución de la respuesta hidrológica de la Cuenca Calicanto entre 2005 y 2024”*, adscritos a la Escuela de Ingeniería Civil en el área de pregrado.

Atentamente,

Firma: _____

Ing. Andrés Camargo Bocanegra

Director - Programa de Ingeniería Civil

Firma: _____

Duban Andrés Paternina Verona

Coordinador de Investigaciones - Programa de Ingeniería Civil

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

A mi Papá, quien es la personificación de la perseverancia, esfuerzo y dedicación, quien me motivó a cumplir esta meta haciéndome sentir capaz, respaldada y apoyándome a cada paso, a mis hijos y demás miembros de la maravillosa familia con la que fui premiada.

AGRADECIMIENTOS

A mi esposo y el cuerpo de docentes de la escuela de Ingeniería Civil de esta gran Universidad, quienes estuvieron atentos a mi formación, convirtiéndose en pieza fundamental para este logro, todo fue gracias a su guía y apoyo.

CONTENIDO

| | | |
|-----------|--|---------------|
| 1 | RESUMEN | XII |
| 2 | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | XIII |
| 3 | PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN | XVIII |
| 4 | JUSTIFICACIÓN..... | XIX |
| 5 | OBJETIVOS | XXII |
| | 5.1 General: | XXII |
| | 5.2 Específicos:..... | XXII |
| 6 | REVISIÓN LITERARIA..... | XXIII |
| | 6.1 Antecedentes | XXIII |
| | 6.2 Marco Teórico | XXIV |
| | 6.3 Marco Conceptual..... | XXXVI |
| 7 | METODOLOGÍA..... | XLI |
| | 7.1 Locación y Descripción del Área de Estudio | XLIV |
| | 7.2 Caracterización de la Cuenca | XLV |
| | 7.3 Análisis De Precipitaciones..... | L |
| | 7.4 Modelación Hidrológica..... | LXI |
| 8 | CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS..... | LXXIII |
| | 8.1 Cumplimiento del Objetivo General..... | LXXIV |
| | 8.2 Cumplimiento de los Objetivos Específicos | LXXIV |
| 9 | RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | LXXV |
| 10 | CONCLUSIONES | LXXIX |
| 11 | BIBLIOGRAFÍA | LXXXI |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|--------|
| Tabla 1. Números de Curva(Handbook of Hidrology, 1993) | XXXI |
| Tabla 2, Métodos Utilizados..... | XLVIII |
| Tabla 3. CNII Ponderado, año 2005. | L |
| Tabla 4. CNII Ponderado, año 2024. | L |
| Tabla 5. Estaciones IDEAM y Clasificación..... | LI |
| Tabla 6, Pmax24h por Estación y Periodo de Retorno..... | LI |
| Tabla 7, Precipitaciones promedio sobre la Cuenca..... | LV |
| Tabla 8, Precipitaciones sobre la Cuenca | LVII |
| Tabla 9, Distribución temporal de la precipitación acumulada en 6 horas..... | LIX |
| Tabla 10, Precipitaciones acumuladas para una tormenta de 6 horas y diferentes periodos de retorno..... | LX |
| Tabla 11, Caudales máximos estimados para diferentes periodos de retorno. | LXIII |
| Tabla 12. Comparación entre valores de caudales pico para diferentes periodos de retorno (PMDP vs. Modelo HEC-HMS)..... | LXXII |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|-------|
| Figura 1. Variables del método SCS de abstracción de las precipitaciones (Tomado de Water Resources Engineering - Larry W. Mays) | XXIX |
| Figura 2. Esquema metodológico del cumplimiento de objetivos | XLII |
| Figura 3. Cuenca Calicanto y Cauce Principal | XLVII |
| Figura 4. Modelo Digital de Elevación para la delimitación de la Cuenca. | XLVII |
| Figura 5. Información geográfica asociada a coberturas de la cuenca - año 2005. | XLIX |
| Figura 6. Información geográfica asociada a coberturas de la cuenca - año 2024. | XLIX |
| Figura 7, Precipitación Máxima en 24h, TR2 | LIII |
| Figura 8, Precipitación Máxima en 24hrs, TR5 | LIII |
| Figura 9, Precipitación Máxima en 24hrs, TR10 | LIV |
| Figura 10, Precipitación Máxima en 24hrs, TR50 | LIV |
| Figura 11, Precipitación Máxima en 24H, TR100 | LV |
| Figura 12, Registros pluviográficos de tormentas con duración de 6 horas. | LVIII |
| Figura 13, Distribuciones temporales de lluvia de 6 horas para el percentil 50%. | LIX |
| Figura 14, Distribución temporal de las lluvias para diferentes periodos de retorno – 6 horas (P50%). | LXI |
| Figura 15, Esquema del modelo Hidrológico | LXII |
| Figura 16, Hietograma (Superior) e Hidrograma del Caudal (inferior) Tr2..... | LXV |
| Figura 17, Hietograma (Superior) e Hidrograma del Caudal (inferior) Tr100..... | LXV |

Figura 18, Barrio San Jose de los Campanos en el año 2005, con detalle de los puntos en donde de aplicó la encuesta. LXVII

Figura 19, Barrio San Jose de los Campanos en el año 2024, con detalle de los puntos en donde de aplicó la encuesta. LXVIII

**Análisis de la evolución de la respuesta hidrológica
de la Cuenca Calicanto entre 2005 y 2024**

1 RESUMEN

Este trabajo de investigación analiza el impacto del cambio de uso del suelo en la respuesta hidrológica de la cuenca del canal Calicanto, ubicada en Cartagena de Indias, entre los años 2005 y 2024, considerando el impacto de la urbanización y el desarrollo industrial en las áreas comprendidas por esta cuenca. Para esta investigación se realizó un modelo hidrológico de condiciones asociadas al periodo del año 2005 y las condiciones de infiltración de cuenca del año 2024, para el cual se utilizó el software HEC-HMS, con el objetivo de evaluar cómo el crecimiento urbano ha afectado la respuesta hidrológica de la cuenca. Este modelo fue validado por información de habitantes y con el informe del Plan Maestro de Drenajes Pluviales de Cartagena.

Este proceso de urbanización tuvo un efecto directo sobre la capacidad de infiltración del suelo, lo cual se refleja en el aumento del número de curva (CN), pasando de 65.83 en 2005 a 76.81 en 2024, lo que indica una menor capacidad del suelo para absorber el agua de lluvia y un aumento en la escorrentía superficial.

Los resultados hidrológicos obtenidos muestran un incremento en los caudales máximos para los diferentes periodos de retorno. En particular, se observó que para el periodo de retorno de 2 años (Tr_2), el caudal máximo aumentó en 35.75%, mientras que para el periodo de retorno de 100 años (Tr_{100}), el aumento fue de 22.5%. Estos valores reflejan una mayor vulnerabilidad de la cuenca frente a eventos extremos de lluvia, producto de la transformación del paisaje natural a un entorno predominantemente urbano.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según el Censo Nacional de Población y Vivienda de 2005 realizado por el DANE, la población de Cartagena de Indias para 2005 era aproximadamente 892,545 habitantes, mientras que para el año 2024 se proyectó en 1,059,626 personas (Cartagena Cómo Vamos, 2023). La tasa de crecimiento poblacional en la ciudad ha sido del 2% anual en promedio, alcanzando un incremento del 9.5% entre 2018 y 2023 (DANE, 2023). Este crecimiento demográfico ha estado acompañado por una expansión urbana significativa, particularmente en la cuenca del canal Calicanto, donde se han desarrollado catorce nuevas urbanizaciones y se ha ampliado la zona industrial en los últimos años.

La cuenca del canal Calicanto se encuentra en un área estratégica de Cartagena conocida como el "Triángulo de Desarrollo", una zona clave para la expansión urbana e industrial de la ciudad. Este sector comprende los barrios San José de los Campanos, la Zona Industrial y parte de Villa Estrella, y ha sido identificado como un polo de crecimiento económico y residencial (Alcaldía Distrital de Cartagena, 2023). Sin embargo, este crecimiento no ha estado acompañado por una planificación adecuada del drenaje pluvial, lo que ha generado impactos significativos en la respuesta hidrológica de la cuenca.

El desarrollo urbanístico en esta zona ha modificado el uso del suelo y alterado los patrones de escorrentía, incrementando el riesgo de inundaciones. Actualmente, más de 50,000

habitantes de estos sectores enfrentan problemas recurrentes de anegamiento, con pérdidas económicas debido a daños en viviendas e infraestructura (Alcaldía Distrital de Cartagena, 2023). La impermeabilización del suelo, producto de la urbanización sin medidas de control adecuadas, ha reducido la capacidad de infiltración, aumentando los volúmenes de escorrentía superficial y afectando el drenaje natural de la cuenca.

Existen diferentes escenarios en donde se ha verificado que la impermeabilización e intervenciones urbanísticas sobre las cuencas han traído consecuencias en la respuesta hidrológica de las cuencas. En el caso de la cuenca del arroyo Matute, se identifica el problema de la urbanización descontrolada en Cartagena de Indias, que ha llevado a la reducción de la capacidad natural del terreno para absorber agua. Esto ha provocado que, durante las temporadas de lluvias, el arroyo experimente crecidas que resultan en graves inundaciones en barrios como San José de los Campanos. Los problemas están exacerbados por la ocupación de áreas de amortiguación y la acumulación de desechos en el cauce, afectando tanto el caudal como la calidad del agua. Además, la tala de vegetación ribereña y los cambios en el uso del suelo han reducido la infiltración, aumentando la escorrentía superficial y el riesgo de inundación (Pareja et al., 2008)

En el caso del arroyo Policarpa, ubicado en el sector industrial de Mamonal en Cartagena, se subraya cómo el desarrollo industrial y la expansión de barrios han modificado la estructura de la cuenca y alterado su capacidad para drenar adecuadamente el agua. Las zonas aledañas al arroyo son frecuentemente afectadas por inundaciones, poniendo en riesgo la vida y los bienes de las comunidades. El documento concluye que muchas secciones del arroyo no

tienen la capacidad hidráulica suficiente para manejar el caudal de aguas pluviales, lo que agrava los problemas de desbordamiento y aumenta la vulnerabilidad de los residentes. Como solución, el estudio propone la construcción de un embalse para controlar el flujo y reducir el caudal hacia niveles manejables durante eventos de lluvias intensas (Del Castillo, Ortiz, & Moreno Egel, 2014).

A pesar de estos antecedentes, no se han realizado estudios detallados que integren la modelación hidrológica con el análisis de cambios en la cobertura del suelo para la cuenca del canal Calicanto. Este estudio busca llenar esta brecha de conocimiento mediante el uso de herramientas SIG y modelos hidrológicos, evaluando los efectos del crecimiento urbano en la escorrentía superficial entre los años 2005 y 2024. Los resultados obtenidos servirán como base para la planificación urbana y la gestión sostenible del drenaje pluvial en la ciudad.

Diversas investigaciones internacionales han demostrado que los cambios en la cobertura del suelo, impulsados por la expansión urbana o la restauración ecológica, generan alteraciones significativas en la respuesta hidrológica de las cuencas. Esto se manifiesta en variaciones en los procesos de infiltración, escorrentía, evaporación y almacenamiento de agua en el suelo. Por ejemplo, (Luan & Ma, 2025) analizaron los efectos de la restauración de la vegetación en la cuenca del río Amarillo, observando una mejora en la regulación hidrológica estacional. El estudio reveló que, al aumentar la cobertura vegetal, disminuyó la escorrentía superficial y se incrementó la evapotranspiración, generando una mayor retención del agua en el sistema. Este comportamiento es opuesto al observado en la cuenca Calicanto, donde el crecimiento

urbano ha reducido drásticamente las áreas vegetadas, elevando los valores del número de curva (CN) y disminuyendo la capacidad de infiltración.

En un contexto urbano, (Xu, y otros, 2025) destacan que la estructura espacio-temporal de la lluvia tiene un impacto directo sobre la respuesta de inundación en cuencas piedemontanas. A través del uso de modelos hidrológicos combinados con aprendizaje automático, demostraron que ignorar la distribución heterogénea de las precipitaciones puede generar subestimaciones críticas en los caudales pico. En la cuenca Calicanto, aunque se utilizó la distribución tipo Gumbel para estimar las precipitaciones máximas, este tipo de análisis resalta la necesidad de incorporar patrones más realistas de lluvia, especialmente en contextos costeros con alta variabilidad climática.

Asimismo, los efectos del cambio de uso del suelo en zonas costeras han sido estudiados por (Nené-Preciado, Sansón, Mendoza, & Bátiz., 2017), quienes analizaron cuencas tropicales del Pacífico mexicano. Los autores encontraron que la sustitución de vegetación por áreas urbanas e industriales alteró significativamente el balance hídrico, provocando aumentos en los caudales de escorrentía. Este hallazgo es directamente aplicable al caso de la cuenca Calicanto, donde el reemplazo de pastizales por urbanizaciones como Villa Estrella o San José de los Campanos ha incrementado el riesgo de anegamientos.

Desde una perspectiva de gestión, (Alessi & Torrero, 2015) proponen un enfoque de manejo integrado de cuencas, incorporando elementos tanto físicos como sociales. En su estudio sobre la cuenca del río Gualjaina, en Argentina, resaltan la importancia de involucrar a las comunidades locales y considerar la planificación territorial en el manejo de eventos

extremos. Esta visión es compatible con la metodología usada en la presente investigación, que incluye encuestas a residentes locales como mecanismo de validación social del modelo hidrológico.

Finalmente, el estudio de (Senadi, Zeroual, & Meddi, 2025) en la llanura de Mitidja, Argelia, documenta cómo el crecimiento urbano desorganizado ha afectado la recarga de acuíferos, reduciéndola hasta en un 40% debido al aumento de superficies impermeables. Esta situación guarda relación directa con lo observado en Cartagena, donde la rápida urbanización ha comprometido no solo la capacidad de drenaje superficial, sino también los procesos de recarga hídrica natural.

En conjunto, estos estudios refuerzan la necesidad de una planificación territorial basada en evidencia científica, que permita anticipar y mitigar los impactos negativos del cambio de uso del suelo sobre la hidrología urbana, tal como se pretende con el análisis realizado en la cuenca Calicanto.

3 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

A lo largo de las últimas dos décadas, el crecimiento urbano ha transformado significativamente el paisaje de numerosas cuencas hidrográficas, generando cambios en la cobertura del suelo que afectan la dinámica del ciclo hidrológico. La cuenca del canal Calicanto en Cartagena no ha sido ajena a este fenómeno, experimentando un proceso de urbanización que ha modificado sus patrones naturales de escorrentía, infiltración y generación de caudales. En este contexto, es fundamental comprender cómo estos cambios han impactado la respuesta hidrológica del sistema, considerando tanto la expansión de superficies impermeables como la reducción de áreas de cobertura vegetal.

Bajo esta premisa, la presente investigación se plantea la siguiente pregunta:

¿Cómo ha afectado el crecimiento urbano y los cambios en el uso del suelo entre 2005 y 2024 la dinámica hidrológica de la cuenca Calicanto en Cartagena (Colombia)?

4 JUSTIFICACIÓN

La cuenca del arroyo Calicanto, en Cartagena, ha experimentado significativos cambios hidrológicos debido al crecimiento urbano en áreas aledañas al barrio San José de los Campanos, con la ampliación de la zona industrial y la construcción de catorce nuevas urbanizaciones en los últimos diez años. Este proceso de urbanización ha generado un incremento en las superficies impermeables de la cuenca, alterando la capacidad de infiltración del suelo y aumentando la escorrentía superficial, lo que eleva el riesgo de inundaciones en periodos de lluvias intensas (Alcaldía Distrital de Cartagena, 2023). La expansión de la infraestructura urbana ha modificado la dinámica natural de los flujos de agua, afectando directamente a la comunidad.

El crecimiento de Cartagena y la transformación de áreas periféricas en zonas residenciales e industriales han generado efectos visibles en el comportamiento hidrológico de la cuenca Calicanto. La Alcaldía Distrital de Cartagena ha señalado el impacto del desarrollo urbano sobre áreas como San José de los Campanos, donde se han reportado problemas de drenaje e inundaciones recurrentes debido a la acumulación de escorrentía superficial (Alcaldía Distrital de Cartagena, 2023). Estos cambios han reducido la capacidad de infiltración del suelo y alterado la dinámica natural del flujo de agua, generando una mayor vulnerabilidad ante eventos de lluvias intensas. Esta investigación permitirá comprender la evolución de la respuesta hidrológica de la cuenca. Al identificar las áreas más vulnerables, se facilitará la

implementación de medidas de conservación y restauración ecológica que minimicen los efectos adversos de la urbanización en los ecosistemas locales.

Estudios recientes en contextos urbanos similares han confirmado que el aumento de superficies impermeables incrementa sustancialmente los caudales pico y la frecuencia de eventos de inundación. Por ejemplo, (Kimbi, Onodera, Wang, Kaihotsu, & Shimizu, 2024) evaluaron el impacto de la urbanización y el cambio climático en los procesos hidrológicos de una cuenca suburbana, encontrando que la expansión urbana y las variaciones climáticas han alterado significativamente el régimen hidrológico, aumentando la escorrentía superficial y reduciendo la infiltración del suelo. Del mismo modo, (Özer & Yalçiner Ercoşkun, 2024) analizaron el riesgo de inundación en el distrito de Esenyurt, Estambul, utilizando teledetección y SIG, y concluyeron que la urbanización intensiva ha incrementado la población afectada por inundaciones en un 32.9% y los daños económicos potenciales en un 22.3% entre 2014 y 2022.

Adicionalmente, investigaciones como las de (Vilca-Campana, y otros, 2025) en Arequipa, Perú, han demostrado la efectividad de modelos geoespaciales en la evaluación y mitigación del riesgo de inundaciones urbanas, resaltando la importancia de integrar herramientas de modelación hidrológica y SIG para una planificación urbana sostenible. Asimismo, (Consortio Consultores Cartageneros, 2007) (Jean Louis, 2024) estudió los efectos de la urbanización y la deforestación en las inundaciones en Cap-Haitien, Haití, utilizando modelos hidrológicos y hidráulicos, y encontró que estos factores han aumentado la

frecuencia y severidad de las inundaciones, afectando a la mayoría de los hogares entre 2017 y 2020.

Desde una perspectiva técnica, este estudio aplicará herramientas avanzadas de modelación hidrológica y análisis espacial mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) para evaluar la dinámica del flujo superficial en diferentes escenarios de cambio de uso del suelo. La utilización del modelo HEC-HMS permitirá obtener simulaciones detalladas del comportamiento hidrológico de la cuenca, proporcionando un enfoque cuantitativo y replicable para estudios similares en otras áreas urbanas. Investigaciones como la de (Jam-Jalloh, Liu, Wang, & Liu, 2024) han demostrado que la integración de modelos meteorológicos y hidrológicos, como WRF y HEC-HMS, mejora la precisión en la simulación de eventos de inundación, especialmente en cuencas montañosas.

Los resultados de esta investigación serán de utilidad para ingenieros, urbanistas y estudiantes, ofreciendo información relevante para la formulación de estrategias de ordenamiento territorial basadas en datos científicos.

5 OBJETIVOS

5.1 General:

Evaluar los cambios en la respuesta hidrológica de la Cuenca del Canal Calicanto entre los años 2005 y 2024 debido al crecimiento urbanístico y la disminución de pastizales.

5.2 Específicos:

- Delimitar la cuenca hidrográfica del canal Calicanto acorde a la información de los años 2005 y 2024 a través de herramientas SIG y análisis de imágenes satelitales.
- Comparar la respuesta hidrológica de la cuenca del canal Calicanto de los años 2005 y 2024, Mediante modelos hidrológicos usando el software HEC-HMS.
- Validar el impacto del crecimiento residencial en la dinámica de caudales de la cuenca.

6 REVISIÓN LITERARIA

6.1 Antecedentes

El estudio de las cuencas hidrográficas y su respuesta hidrológica ante cambios en el uso del suelo es una problemática de relevancia global, especialmente en el contexto del cambio climático y la urbanización en aumento. Investigaciones previas han demostrado que el incremento en superficies impermeables reduce la infiltración y genera un aumento en la escorrentía superficial, exacerbando el riesgo de inundaciones y afectando la sostenibilidad del recurso hídrico (Feyissa, Demissie, Saathoff, & Gebissa, 2024). Modelos hidrológicos aplicados en diversas partes del mundo han permitido evaluar estos efectos y proponer estrategias de mitigación.

Estudios en cuencas urbanas de montaña, como el realizado en San Luis-Palgrande en Manizales, han evidenciado que el crecimiento urbanístico modifica la dinámica hidrológica, aumentando el caudal pico y reduciendo el tiempo de concentración de la escorrentía (Rey-Valencia & Zambrano, 2018). En México, un análisis del impacto del cambio de cobertura y uso del suelo en la presa El Rejón reveló que la deforestación y el crecimiento urbano incrementan en un 41.5% los caudales máximos de diseño debido a la reducción de la capacidad de infiltración (Simental-Nájera, Arreguín-Cortés, Farfán-Gutiérrez, & Cervantes-Jaimes, 2023).

En Colombia, la cuenca del río Chinchiná ha sido objeto de estudios que destacan cómo el cambio de cobertura vegetal afecta la generación de caudales y la producción de escorrentía superficial, con incrementos del 26.3% en los valores de escorrentía directa en un periodo de 27 años (Patiño, 2018). De manera similar, investigaciones en la cuenca del arroyo Mameyál en Turbaco identificaron que el crecimiento urbano ha generado aumentos en la escorrentía superficial y cambios en la morfometría del cauce, incrementando la vulnerabilidad a inundaciones (Arrieta-Gaviria & Zaraza-Caro, 2020).

6.2 Marco Teórico

El presente estudio se inscribe en este marco de referencia, buscando analizar la evolución de la respuesta hidrológica en la cuenca del canal Calicanto y su relación con los cambios en el uso del suelo. A través de modelación hidrológica y el uso de herramientas SIG, se pretende generar información que contribuya a la planificación territorial y la gestión sostenible de los recursos hídricos en la región.

6.2.1 Proceso de Delimitación de la Cuenca Hidrográfica

6.2.1.1 Información Topográfica

La topografía es esencial para la delimitación de cuencas hidrográficas, ya que la dirección y el flujo del agua están influenciados por la elevación y la pendiente del terreno. Los mapas topográficos detallan líneas de contorno que permiten visualizar cambios de altura e identificar puntos altos y bajos en el terreno, conocidos como crestas y valles. La delimitación

inicia marcando los puntos más altos alrededor del área de interés, formando una línea o límite que separa los flujos hacia distintas cuencas. Este límite, conocido como divisoria de aguas, es el principal elemento para definir la extensión de una cuenca (Chow, 1971).

6.2.1.2 Imágenes Satelitales y SIG (Sistemas de Información Geográfica)

Las imágenes satelitales proporcionan una visión general del terreno y permiten observar elementos naturales y construidos, como vegetación, suelos y urbanización, que influyen en el flujo de agua. Junto con los SIG, estas imágenes permiten realizar un análisis más detallado de la superficie de la cuenca. Los SIG facilitan el uso de modelos digitales de elevación (MDE), que ofrecen representaciones tridimensionales del terreno, lo que permite trazar con mayor precisión las divisorias de aguas y visualizar el flujo de escorrentía superficial (Maidment, 1993).

6.2.1.3 Visitas de Campo en Puntos Estratégicos

Las visitas de campo son fundamentales para obtener información numérica o cualitativa que sea útil para verificar información calculada mediante modelos hidrológicos. A través de recorridos estratégicos en puntos críticos del sistema de drenaje, como zonas de alta pendiente, confluencias de arroyos y áreas de transición entre la cuenca y su entorno, es posible observar directamente los elementos físicos que pueden afectar el flujo. Estas observaciones ayudan a ajustar la delimitación basada en la topografía y en los modelos digitales, y a identificar características específicas del terreno que puedan no ser visibles en las imágenes satelitales o en los mapas (Dingman, 2002).

6.2.2 Análisis estadístico de precipitaciones

6.2.2.1 Precipitaciones máximas en 24 horas

El análisis de precipitaciones máximas en 24 horas es una metodología utilizada para determinar el volumen máximo de lluvia que puede caer en un periodo de un día completo. Esta métrica es importante para el diseño de infraestructura hidráulica, ya que proporciona información sobre eventos extremos que pueden causar inundaciones. Este tipo de análisis permite calcular caudales de diseño y anticipar el impacto de lluvias intensas en una cuenca (Chow, 1971).

6.2.2.2 Análisis de frecuencia tipo Gumbel

El análisis de frecuencia tipo Gumbel es un método estadístico utilizado para modelar la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos, como precipitaciones máximas, en el tiempo. Este enfoque permite estimar la recurrencia de eventos de lluvia intensos y ayuda a diseñar estructuras de control de inundaciones. El modelo de Gumbel asume que los eventos extremos siguen una distribución específica y calcula la probabilidad de excedencia para un periodo de retorno determinado, como 10, 50 o 100 años (Ward & Trimble, 2003)

Para aplicar la distribución tipo Gumbel se utiliza una función de probabilidad, expresada a partir de la siguiente ecuación:

$$X_t = \mu + K_t \sigma$$

Dónde:

X_t : Magnitud de la operación para cierto periodo de Retorno

μ : Valor Promedio de los datos obtenidos

K_t : Factor de Frecuencia de la distribución de probabilidad de Gumbel

σ : Desviación estándar muestral.

El término K_t se expresa de la siguiente manera:

$$K_t = - \frac{1}{\sigma_n} \cdot \text{Ln} \left[-\text{Ln} \left(\frac{T-1}{T} \right) \right] - \frac{Y_n}{\sigma_n}$$

Dónde:

T: Periodo de retorno en años

Y_n y σ_n : son coeficientes de la distribución Gumbel que dependen del número de datos a analizar.

6.2.2.3 Ajustes de precipitaciones por: duración de lluvia, por área y por cambio climático.

Los ajustes de precipitaciones se realizan para modelar la variabilidad espacial y temporal de la lluvia en una cuenca. Esto incluye ajustar las precipitaciones por:

6.2.2.3.1 Duración de la lluvia:

Se estudia la cantidad de lluvia que cae en intervalos de tiempo específicos (p. ej., 1 hora, 3 horas, 24 horas) para identificar patrones que permitan prever la respuesta de la cuenca (Dingman, 2002).

6.2.2.3.2 Factor de Reducción por Área:

La precipitación no siempre es uniforme; por lo tanto, se utilizan correcciones de área para obtener valores representativos en zonas con variabilidad espacial.

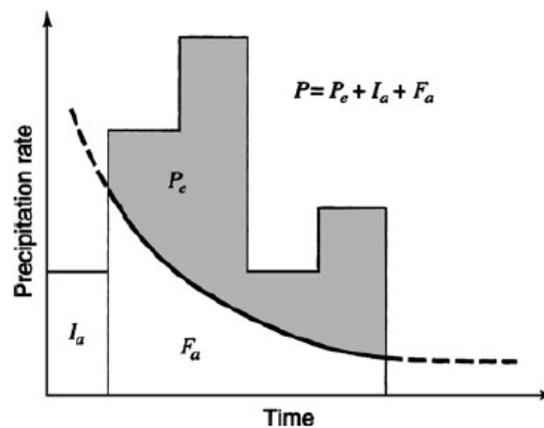
6.2.2.3.3 Cambio climático:

Debido a los efectos del cambio climático, la frecuencia y magnitud de las precipitaciones extremas pueden variar, haciendo que los modelos hidrológicos tradicionales se ajusten para reflejar las nuevas condiciones climáticas (Novotny, 1994).

6.2.2.4 Modelo lluvia-Escorrentía del SCS

Este modelo está basado en la relación correspondiente al número de curva y el hidrograma. El U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service (US Army Corps of Engineers, 2000), ahora llamado National Resources Conservation Service (NRCS), establece una relación entre la precipitación y el escurrimiento superficial en una cuenca. Se considera que la lluvia total (**P**) se divide en tres componentes: la abstracción inicial (**I_a**), que representa el volumen de agua que no genera escorrentía inicial; la abstracción continua (**F_a**), que es el agua retenida en el suelo después de que comienza el escurrimiento; y el exceso de precipitación o escorrentía directa (**P_e**) tal como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Variables del método SCS de abstracción de las precipitaciones (Tomado de Water Resources Engineering - Larry W. Mays)



6.2.2.4.1 Teoría de Infiltración en el suelo con el número de Curva del SCS

El modelo de Número de Curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) es un método empírico que estima la cantidad de escorrentía producida en una cuenca basándose

en el tipo de suelo, la cobertura vegetal y las condiciones de humedad previa. Este número de curva (CN) indica la capacidad de infiltración de un suelo, donde valores bajos de CN representan una alta infiltración (baja escorrentía) y valores altos indican baja infiltración (alta escorrentía). Este modelo es ampliamente utilizado en estudios de cuencas debido a su simplicidad y efectividad en condiciones variables (Chow, 1971).

Los números de curva (CN), según el método SCS (Soil Conservation Service) y aplicado en modelos, son índices que representan la capacidad de infiltración de distintas coberturas y tipos de suelo en una cuenca. Estos números varían de 30 a 100, donde valores altos indican suelos o superficies altamente impermeables (como áreas urbanizadas), lo que genera una mayor escorrentía superficial, mientras que valores bajos representan terrenos con buena infiltración, como áreas vegetadas o sin alteración. Este valor se utiliza en modelación hidrológica para estimar el volumen de escorrentía directa generado por una precipitación dada y es clave para simular la respuesta hidrológica de una cuenca.

El cálculo de CN depende de tres factores principales: el tipo de suelo, el uso del suelo, y el estado de humedad previo. El número de curva se combina con otros parámetros, como el tiempo de concentración y la precipitación, para modelar eventos de lluvia-escorrentía y estimar caudales de diseño que ayudan en la planificación de drenajes y gestión de recursos hídricos (US Army Corps of Engineers, 2000). La Tabla 1 muestra los valores de número de curva usados en Colombia para planificación urbana, por parte del Reglamento Técnico del sector de Agua potable y saneamiento básico (RAS).

Tabla 1. Números de Curva (Handbook of Hidrology, 1993) .

| Tipo de vegetación | Condición hidrológica | Tipo de suelo | | | |
|--|-----------------------|---------------|----|----|----|
| | | A | B | C | D |
| Barbecho | - | 77 | 86 | 91 | 94 |
| | Pobre | 76 | 85 | 90 | 93 |
| | Buena | 74 | 83 | 88 | 90 |
| Cultivos alineados | Pobre | 72 | 81 | 88 | 91 |
| | Buena | 67 | 78 | 85 | 89 |
| | Pobre | 71 | 80 | 87 | 90 |
| | Buena | 64 | 75 | 82 | 85 |
| | Pobre | 70 | 79 | 84 | 88 |
| | Buena | 65 | 75 | 82 | 86 |
| | Pobre | 69 | 78 | 83 | 87 |
| | Buena | 64 | 74 | 81 | 85 |
| | Pobre | 66 | 74 | 80 | 82 |
| | Buena | 62 | 71 | 78 | 81 |
| | Pobre | 65 | 73 | 79 | 81 |
| | Buena | 61 | 70 | 77 | 80 |
| | Pobre | 65 | 76 | 84 | 88 |
| | Buena | 63 | 75 | 83 | 87 |
| | Pobre | 64 | 75 | 83 | 86 |
| | Buena | 60 | 72 | 80 | 84 |
| | Pobre | 63 | 74 | 82 | 85 |
| | Buena | 61 | 73 | 81 | 84 |
| Cultivos no alineados, o con surcos pequeños o mal definidos | Pobre | 62 | 73 | 81 | 84 |
| | Buena | 60 | 72 | 80 | 83 |
| | Pobre | 61 | 72 | 79 | 82 |
| | Buena | 59 | 70 | 78 | 81 |
| | Pobre | 60 | 71 | 78 | 81 |
| | Buena | 58 | 69 | 77 | 80 |
| | Pobre | 66 | 77 | 85 | 89 |
| | Buena | 58 | 72 | 81 | 85 |
| Cultivos densos de leguminosas o prados | Pobre | 64 | 75 | 83 | 85 |
| | Buena | 55 | 69 | 78 | 83 |

| Tipo de vegetación | Condición hidrológica | Tipo de suelo | | | |
|--|-----------------------|---------------|----|----|----|
| | | A | B | C | D |
| en alternancia | Pobre | 63 | 73 | 80 | 83 |
| | Buena | 51 | 67 | 76 | 80 |
| Pastizales o pastos naturales | Pobre | 68 | 79 | 86 | 89 |
| | Regulares | 49 | 69 | 79 | 84 |
| | Buena | 39 | 61 | 74 | 80 |
| Pastizales | Pobre | 47 | 67 | 81 | 88 |
| | Regulares | 25 | 59 | 75 | 83 |
| | Buena | 67 | 35 | 70 | 79 |
| Prados permanentes | - | 30 | 58 | 71 | 78 |
| Matorral - herbazal, siendo el matorral predominante | Pobre | 48 | 67 | 77 | 83 |
| | Regulares | 35 | 56 | 70 | 77 |
| | Buena | | 48 | 65 | 73 |
| Combinación de arbolado y herbazal, cultivos agrícolas leñosos | Pobre | 57 | 73 | 82 | 86 |
| | Regulares | 43 | 65 | 76 | 82 |
| | Buena | 32 | 58 | 72 | 79 |
| Montes con pastos (aprovechamientos silvopastoriles) | Pobre | 45 | 66 | 77 | 83 |
| | Regulares | 36 | 60 | 73 | 79 |
| | Buena | 25 | 55 | 70 | 77 |
| Bosques | I Muy pobre | 56 | 75 | 86 | 91 |
| | II Pobre | 46 | 68 | 78 | 84 |
| | III Regular | 36 | 60 | 70 | 76 |
| | IV Buena | 26 | 52 | 63 | 69 |
| | V Muy buena | 15 | 44 | 54 | 61 |
| Caseríos | - | 59 | 74 | 82 | 86 |
| Caminos en tierra | - | 72 | 82 | 87 | 89 |
| Caminos con firme | - | 74 | 84 | 90 | 93 |

6.2.2.4.2 Tiempo de concentración:

El tiempo de concentración es el tiempo que tarda el agua en desplazarse desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de salida. Existen varios métodos para calcular el tiempo de concentración, entre ellos:

6.2.2.4.2.1 Método de Kirpich:

Utilizado en cuencas pequeñas, basado en la pendiente y longitud de la cuenca.

La ecuación matemática es la siguiente:

$$T_c = 0.06628 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

Donde:

L: longitud de la línea de drenaje en km.

S: pendiente media de la línea de drenaje.

T_c : tiempo de concentración expresado en horas.

6.2.2.4.2.2 Ventura - Heras

$$T_c = 4A^{0.5}L^{0.5}H^{-0.5}$$

T= Tiempo de concentración (horas)

L= longitud del canal principal (Km)

A= Área de la cuenca (km^2)

H= Diferencia de altura extremos del canal principal (m)

6.2.2.4.2.3 Témez y D.N.C: TÉMEZ, J.R. (2003)

$$T = 0,3 \times \left(\frac{L}{S^{0,25}}\right)^{0,76}$$

Dónde:

T= Tiempo de concentración (Horas)

S= Pendiente media del cauce principal (m/m)

L= Longitud del cauce (km)

6.2.2.4.2.4 Ven Te Chow:

Utilizada en cuencas rurales de los Estados Unidos con áreas entre 0,01 y 18,5 Km² y pendientes entre 0,51% y 9%.

$$T_C = 0,1602 * L^{0,64} * S^{-0,32}$$

Donde:

Tc: Tiempo de concentración (h)

L: Longitud del cauce principal (Km)

S: Pendiente promedio del cauce (m/m)

6.2.2.4.3 Método de SCS:

Utiliza factores empíricos que consideran la longitud de flujo y el tipo de cubierta del terreno. Estos métodos permiten determinar el tiempo de respuesta de una cuenca ante eventos de precipitación, y se elige el más adecuado según las características de cada cuenca (Maidment, 1993).

6.2.2.4.3.1 Curvas de masa de precipitaciones

Las curvas de masa de precipitaciones representan gráficamente la acumulación de precipitación en el tiempo, mostrando cómo se distribuye la intensidad de la lluvia durante un evento. Estas curvas son útiles para analizar la distribución temporal de la lluvia en relación con el escurrimiento generado, y se emplean en la simulación de modelos de lluvia-escurrimiento, pues ayudan a predecir los picos de flujo (Ward & Trimble, 2003).

6.2.2.4.3.2 Modelación hidrológica con el Software HEC-HMS

El HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) es un software desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. que modela el proceso de lluvia-escorrentía en cuencas hidrográficas. Este programa permite simular la respuesta hidrológica de una cuenca ante diferentes eventos de precipitación, incorporando métodos como el modelo SCS y análisis de caudales pico, siendo una herramienta fundamental para la evaluación de riesgos de inundación y el diseño de estructuras de control de escorrentía (US Army Corps of Engineers, 2000).

6.3 Marco Conceptual

6.3.1 Cuenca Hidrográfica

Una cuenca hidrográfica se define como el área de terreno que recoge y drena el agua de precipitación hacia un cauce común, generalmente un río, lago o el océano. Está delimitada por una divisoria de aguas, que sigue los puntos más altos del relieve circundante, determinando el área de influencia de la cuenca sobre el sistema de drenaje natural (Chow, 1971). Este concepto es esencial para evaluar la dinámica de flujos de agua en sistemas hídricos naturales y urbanos, ya que permite identificar áreas críticas para la gestión del recurso hídrico y el control de inundaciones. Las cuencas están influenciadas por factores topográficos, climáticos y de uso del suelo, que determinan la dirección, magnitud y tiempo de respuesta hidrológica ante eventos de precipitación (Maidment, 1993)

6.3.2 Divisoria de Aguas

La divisoria de aguas es un concepto clave en la delimitación de cuencas hidrográficas y se refiere a la línea imaginaria o borde que separa dos áreas de drenaje contiguas. Es decir, la divisoria define los límites de una cuenca, asegurando que toda el agua de lluvia que cae dentro de estos límites fluya hacia el mismo cauce o cuerpo de agua. En la práctica, la divisoria de aguas se traza siguiendo los puntos más altos del terreno y es esencial para entender y modelar la distribución del flujo de agua en la cuenca, así como para implementar planes de gestión y conservación de recursos hídricos (Maidment, 2002).

6.3.3 Impacto de la urbanización en cuencas hidrográficas:

La urbanización afecta significativamente la hidrología de una cuenca al aumentar las áreas impermeables, como carreteras y edificaciones, lo que reduce la capacidad de infiltración del suelo y eleva el volumen y velocidad de la escorrentía superficial. Estas modificaciones alteran el ciclo hidrológico, disminuyendo la recarga de acuíferos y aumentando el riesgo de inundaciones (Novotny, 1994). En estudios previos, se ha demostrado que el incremento del número de curva (CN), indicador hidrológico que mide la capacidad de infiltración del suelo, está directamente asociado con la expansión urbana (USDA, 1986).

6.3.4 Sistemas de Información Geográfica (SIG):

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas computacionales diseñadas para capturar, almacenar, analizar y visualizar datos geoespaciales. Estas herramientas

permiten la integración de información geográfica con otros tipos de datos, facilitando el análisis espacial y la toma de decisiones en diversos campos, incluyendo la hidrología y la gestión de recursos hídricos (Maidment, 2002).

6.3.5 Modelo hidrológico:

Un modelo hidrológico es una representación matemática que simula el ciclo hidrológico y los procesos relacionados con el movimiento y distribución del agua en una cuenca. Estos modelos son fundamentales para predecir respuestas hidrológicas ante diferentes condiciones climáticas y de uso del suelo, y se emplean en la planificación y gestión de recursos hídricos (Singh & Woolhiser, 2002).

6.3.6 Cambio climático:

El cambio climático se refiere a las variaciones significativas y duraderas en los patrones climáticos globales, atribuibles en gran medida a actividades humanas que incrementan las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Estas alteraciones impactan diversos sistemas naturales, incluyendo los recursos hídricos y la frecuencia de eventos hidrológicos extremos (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2008).

6.3.7 Precipitaciones extremas:

Las precipitaciones extremas son eventos de lluvia o nevadas que superan significativamente los valores promedio históricos en una región específica. Estos eventos pueden provocar

inundaciones y otros desastres naturales, y su frecuencia e intensidad pueden verse afectadas por el cambio climático (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2008).

6.3.8 Período de retorno:

El período de retorno es una medida estadística que indica el intervalo promedio de tiempo entre eventos climáticos o hidrológicos de una magnitud específica, como una inundación o una tormenta intensa. Por ejemplo, un evento con un período de retorno de 100 años tiene una probabilidad del 1% de ocurrir en cualquier año dado (Chow, 1971).

6.3.9 Respuesta hidrológica

La respuesta hidrológica de una cuenca está determinada por su capacidad de interceptar, infiltrar y transportar el agua de lluvia. Esta capacidad depende de factores como la cobertura vegetal, el tipo de suelo, y las condiciones climáticas (Ward & Trimble, 2003). Cambios significativos en estas variables, como la deforestación y el desarrollo urbano, pueden generar efectos acumulativos que incrementan los riesgos de inundaciones y erosión del suelo.

6.3.10 Infiltración

La infiltración es el proceso por el cual el agua de lluvia penetra en el suelo, alimentando los acuíferos y reduciendo el volumen de escorrentía superficial. Este fenómeno depende de la permeabilidad del suelo, la cobertura vegetal y las condiciones previas de humedad. Una

menor infiltración, como ocurre en áreas urbanizadas, incrementa la escorrentía y el riesgo de inundaciones (Maidment, Handbook of hydrology, 1993).

6.3.11 Escorrentía superficial

La escorrentía superficial es el agua de lluvia que no se infiltra en el suelo y fluye sobre la superficie terrestre. Este proceso está estrechamente relacionado con el número de curva (CN), que mide la impermeabilidad del terreno. Áreas con mayor urbanización y pavimentación presentan valores altos de escorrentía, aumentando los caudales pico y el potencial de erosión del suelo (USDA, 1986).

6.3.12 Cobertura del suelo

La cobertura del suelo influye directamente en la capacidad de una cuenca para infiltrar agua y regular la escorrentía. La vegetación densa fomenta la infiltración, mientras que áreas urbanizadas con pavimento y edificaciones la limitan, incrementando la escorrentía superficial y modificando el balance hídrico (Chow, 1971).

6.3.13 Software HEC-HMS

El *Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) es una herramienta computacional que modela la respuesta hidrológica de una cuenca ante eventos de precipitación. Este software permite simular la escorrentía, los caudales pico y otros

parámetros hidrológicos mediante métodos como el número de curva del SCS y el análisis de tiempo de concentración (US Army Corps of Engineers, 2000).

6.3.14 Hidrogramas de caudal

Un hidrograma de caudal es una representación gráfica que muestra cómo varía el caudal en un punto de un río o arroyo a lo largo del tiempo durante un evento de precipitación. Este análisis es crucial para comprender la dinámica hidrológica de una cuenca y diseñar sistemas de drenaje que puedan manejar caudales pico (Maidment, Handbook of hydrology, 1993).

6.3.15 Dinámica de la urbanización en cuencas

El desarrollo urbano modifica significativamente las características de una cuenca, reduciendo la infiltración y aumentando los caudales superficiales. Esto se refleja en cambios en el número de curva (CN), que mide la impermeabilidad del suelo. Por ejemplo, un aumento del CN en la cuenca Calicanto entre 2005 y 2024 indica un incremento de áreas impermeables, aumentando el riesgo de inundaciones (USDA, 1986).

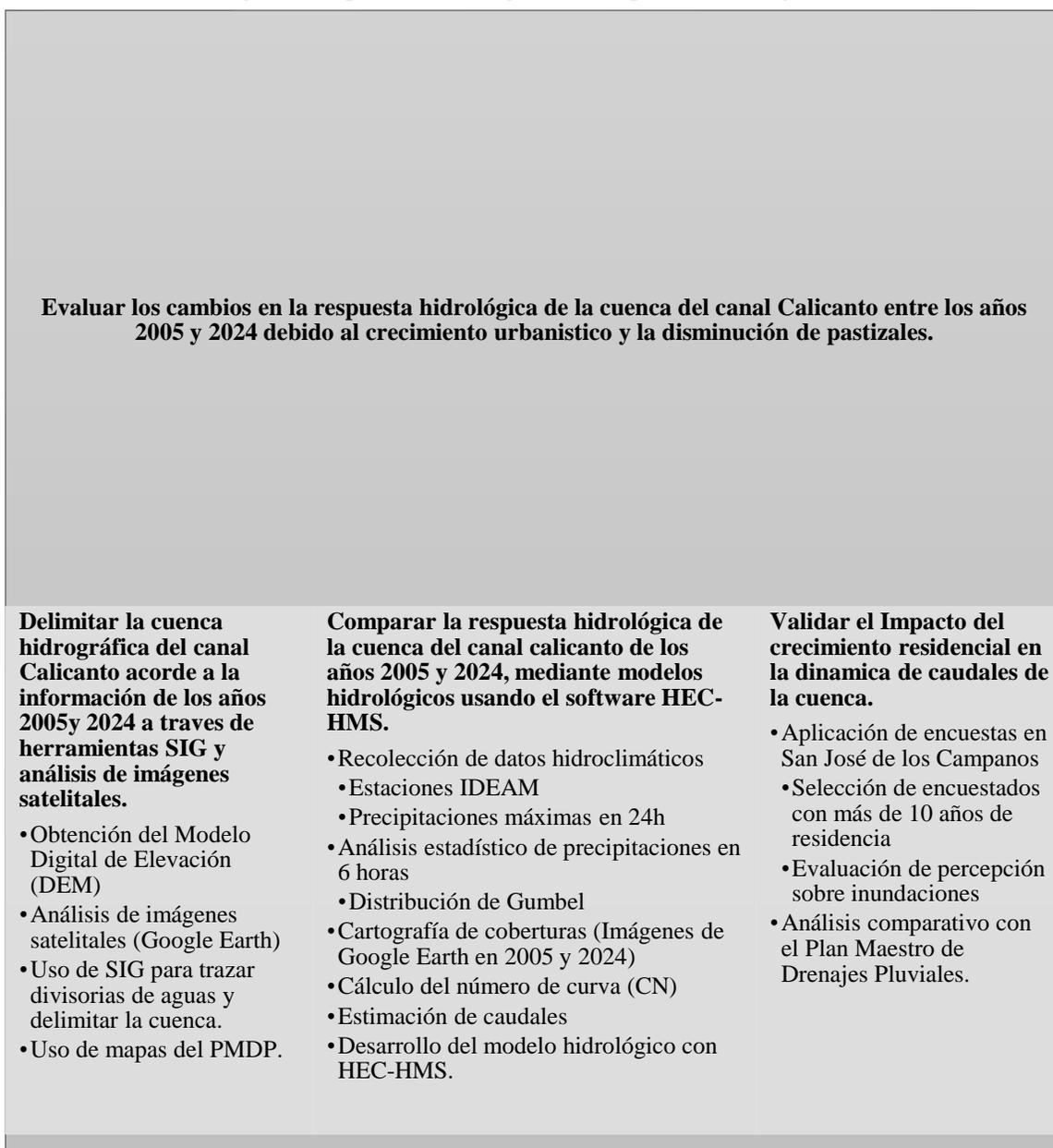
7 METODOLOGÍA

Para garantizar el cumplimiento de los objetivos de esta investigación, se ha diseñado una metodología estructurada basada en el análisis de la dinámica hidrológica de la cuenca del canal Calicanto. La selección de datos y herramientas se fundamentó en criterios de

relevancia, disponibilidad y precisión, asegurando la fiabilidad de los resultados obtenidos.

La siguiente Figura muestra la relación de los objetivos con las actividades de la metodología.

Figura 2. Esquema metodológico del cumplimiento de objetivos



Se emplearon datos cartográficos, hidrometeorológicos y de uso del suelo provenientes de fuentes oficiales y estudios previos. La delimitación de la cuenca se realizó mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), permitiendo la caracterización morfométrica y la identificación de cambios en la cobertura del suelo a lo largo del período de estudio. Para la modelación hidrológica, se utilizó el software HEC-HMS, el cual permite simular la respuesta de la cuenca ante diferentes eventos de precipitación, considerando parámetros como la escorrentía, la infiltración y el tiempo de concentración.

Adicionalmente, se llevaron a cabo entrevistas y recopilación de testimonios de la comunidad con el fin de validar los resultados obtenidos en la modelación y conocer la percepción local sobre la evolución de las inundaciones.

A partir de estos elementos, se ejecutaron las siguientes actividades para el desarrollo de la investigación:

- Se realiza la Caracterización la cuenca usando información satelital y digital aplicando técnicas de información geográfica con el fin de delimitar la cuenca hidrográfica y caracterizar las coberturas del suelo en la cuenca en las condiciones de 2005 y 2024. Se analizan un conjunto de datos de precipitaciones gestionadas desde la plataforma oficial del IDEAM, DHIME. Esto comprende precipitaciones máximas en 24 horas y patrones de lluvia típicos de la zona norte del departamento de Bolívar.

- Se realiza la modelación hidrológica mediante el software HEC-HMS, de las condiciones de cuenca de los años mencionados anteriormente, y se comparan los caudales pico obtenidos en cada resultado.
- Se validan los resultados del modelo hidrológico mediante encuestas aplicadas a residentes de los barrios afectados dentro del período de estudio (2005-2024), con el objetivo de evaluar su percepción sobre la variación en la magnitud de las inundaciones a lo largo de estos años.

7.1 Locación y Descripción del Área de Estudio

En la costa Caribe Colombiana, en la Ciudad de Cartagena al sur oriente, nos encontramos con la cuenca Calicanto, la cual comprende diferentes barrios y urbanizaciones, mencionados a continuación;

- Urbanización Horizonte.
- Brisas de Galicia.
- Huellas de Alberto Uribe.
- Urbanización Horizonte IV etapa.
- Urb. Bosque de la Ceiba.
- Bosques de la Circunvalar.
- Villa Andrea.
- Urb. Villa Grande de Indias.
- Urb. Villa Grande de Indias II.
- Bosques de Villa Grande de Indias.
- Parque Heredia.

- Urb. La Carolina.
- Terrazas de Calicanto.
- Brisas de la Cordialidad.
- Parte del Barrio Villa Rosita.
- Barrio San José de los Campanos.

En esta zona, pasan varios cuerpos de agua provenientes del municipio de Turbaco, los cuales drenan hacia la Ciénaga de la Virgen, entre los cuales se destacan; el arroyo Matute y el arroyo el Limón. De estos cuerpos de agua principales se pueden resaltar diferentes canales en la zona sur oriental de Cartagena, por ejemplo, los canales de la Carolina, Isla de León, Magdalena, San José, Simón Bolívar y Chapundun, entre estos también se encuentra el canal Calicanto.

Según el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), El área de estudio se caracteriza por ser una zona de mejoramiento integral de la zona suroriental, específicamente el Triángulo de Desarrollo Social, como parte del plan parcial que involucra 400 ha de suelo en tratamiento de desarrollo, el cual fue adoptado por medio del decreto 0747 de 2003 y el decreto 0022 de enero de 2005. (Observatorio de Cartagena, 2024).

7.2 Caracterización de la Cuenca

La cuenca del canal calicanto tiene una extensión de 10.43 km², que abarca parte de la zona rural del municipio de Turbaco, algunas conurbaciones, una zona industrial como lo es Zona Franca y la zona urbana de la ciudad de Cartagena mencionada en el presente documento.

El cuerpo de agua principal tiene una longitud de 6.87 km desde la zona alta del municipio de Turbaco hasta el barrio la Carolina, atraviesa diferentes barrios, empezando por la Urbanización Asturias, Villa grande de Indias I y II, San José de los Campanos, Villa Juliana etapa II, Huellas de Alberto Uribe, nuevos proyectos urbanísticos como Parque Heredia y finalmente el barrio La Carolina, hasta este punto delimitamos el alcance del estudio, hasta la Vía la Cordialidad, omitiendo algunos barrios agua abajo como por ejemplo; Barrio Nuevo Paraíso, Las Américas, Condominio Carioca, Flamengo.

La cuenca se delimitó usando información descrita del Plan Maestro de Drenajes Pluviales de la ciudad de Cartagena, sumado al uso del modelo digital de elevación del IGAC con resolución de información de 30m x 30m, adicionalmente, se utilizó la información tridimensional del programa Google Earth Pro, en donde se pudieron identificar las divisorias de agua tanto en la zona rural como en la urbana. Es importante resaltar que a pesar de las múltiples intervenciones que se han realizado en la cuenca entre 2005 y 2024, estas no han representado cambios en las condiciones de área de esta, solo ha cambiado el uso de suelo.

La Figura 3 muestra la cuenca del canal Calicanto y su respectivo cauce principal. Por otro lado, la Figura 4, muestra el relieve de la zona, mediante un modelo digital de elevación, en donde podemos señalar que la parte alta de la cuenca alta cuenta con 88 m sobre el nivel del mar, mientras que, en la parte media, justo en el barrio San José de los campanos la elevación pasa a ser de alrededor de 20 m y al finalizar, justo a la altura de la vía la cordialidad el canal

presenta una elevación promedio con una elevación de 6 m.s.n.m. De esta manera podemos apreciar que la cuenca va en declive hasta llevar su cauce hasta la Ciénaga de la Virgen.

Figura 3. Cuenca Calicanto y Cauce Principal

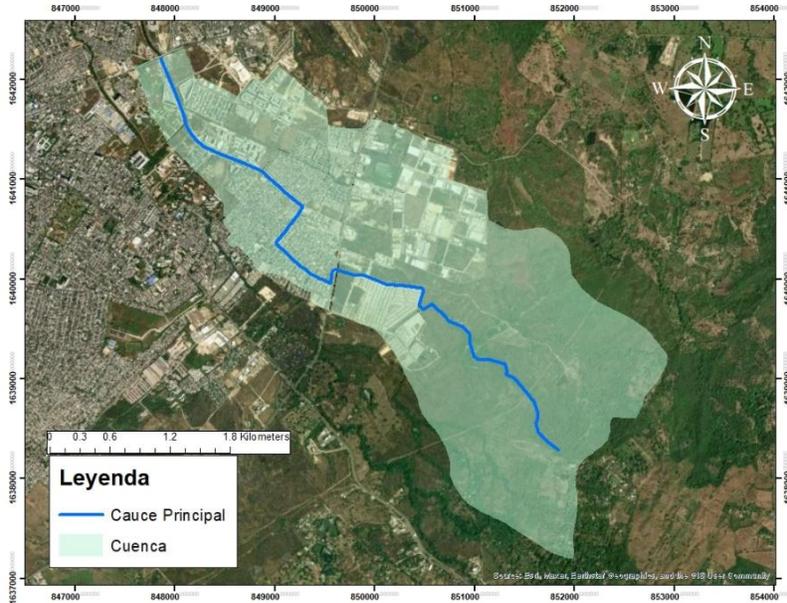
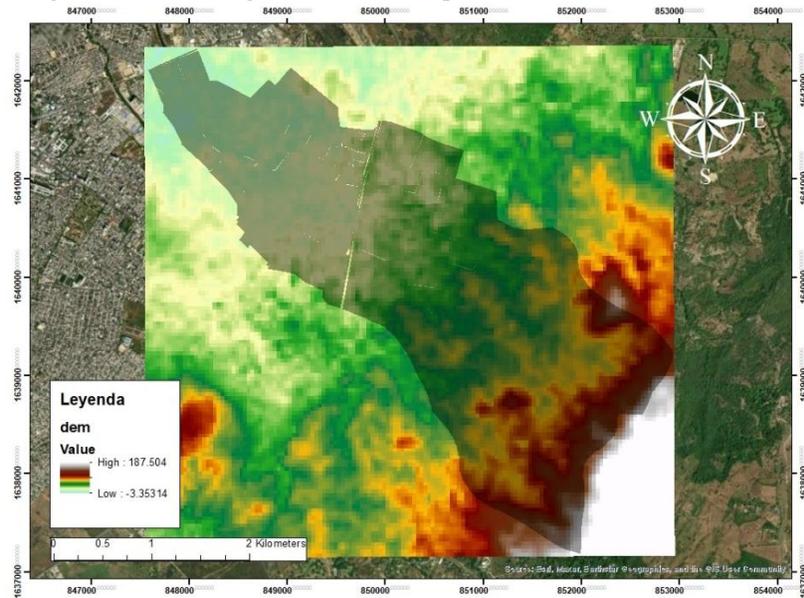


Figura 4. Modelo Digital de Elevación para la delimitación de la Cuenca.



7.2.1 Tiempo de Concentración

Para el tiempo de concentración se utilizaron los métodos; Kirpich, Ventura – Herás, Teméz y Ven Te Chow teniendo los siguientes datos y sacando un promedio de los cuatro métodos. Estas ecuaciones utilizan los datos de longitud y pendiente del cauce, siendo la longitud de aproximadamente 6.87km, y la pendiente promedio de 0.035 la cual fue estimada mediante el uso de información geográfica a partir de la capa del modelo digital de elevación terrestre.

Tabla 2, Métodos Utilizados

| Método | Resultado |
|-----------------------|------------------|
| Kirpich | 1.06 |
| Ventura-Herás | 2.38 |
| Teméz | 2.45 |
| Ven Te Chow | 2.73 |
| Promedio (h) | 2.16 |
| Promedio (min) | 129 |

7.2.2 Condiciones de Infiltración de la Cuenca.

Se realizó un mapeo de las coberturas de la zona en 2005 y 2024, utilizando imágenes satelitales históricas registradas en Google Earth, identificando los usos del suelo y agrupándolos en coberturas asignadas como: Calles sin Pavimentar, Vías Pavimentadas, Suelo Pastizal, y límites de Manzana o Zona Residencial, para el año 2005, y las coberturas para el año 2024 difieren ya que para el año 2005 habían vías sin pavimentar en el barrio San José de los Campanos y no se presentaba suelo de zona industrial. Por lo tanto, las coberturas para el año 2024 son: Canal, Calles, Suelo Industrial, Suelo Pastizal y Zona residencial.

La Figura 5 muestra la distribución de las coberturas para el año 2005, mientras que la Figura 6 muestra la distribución de las coberturas para el año 2024.

Figura 5. Información geográfica asociada a coberturas de la cuenca - año 2005.

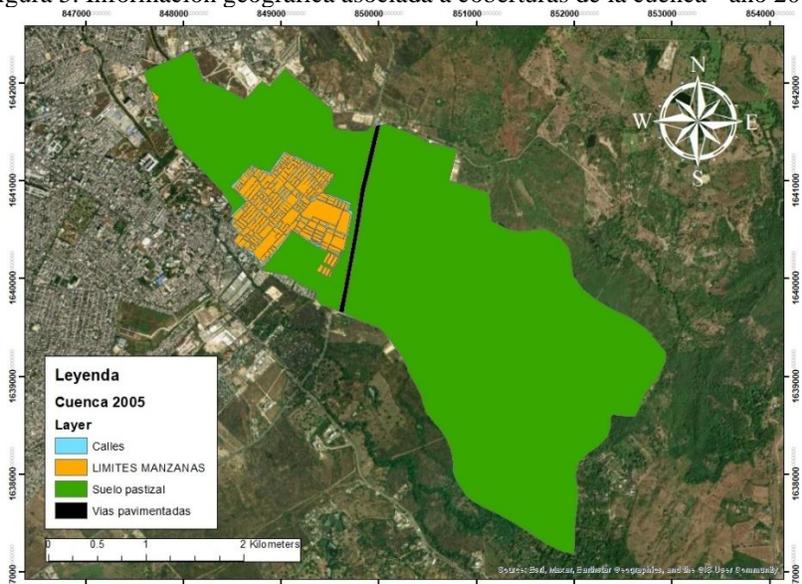
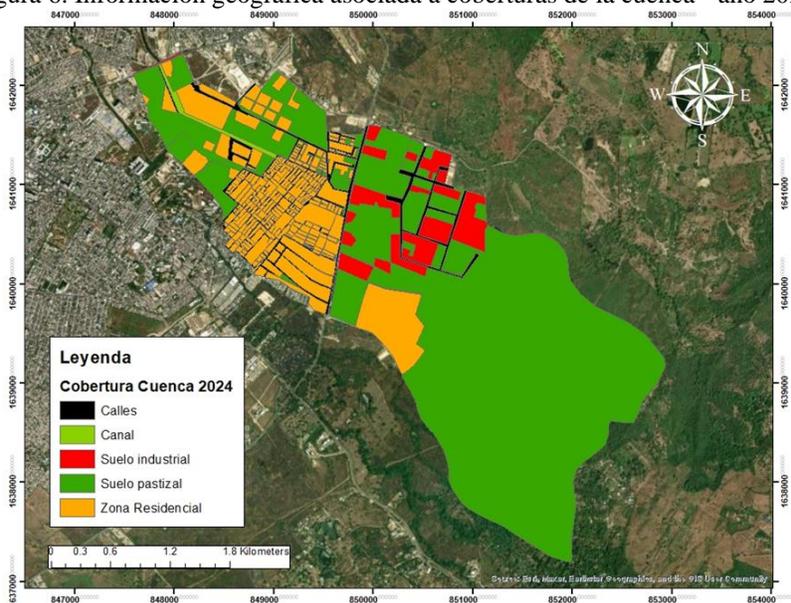


Figura 6. Información geográfica asociada a coberturas de la cuenca - año 2024.



Esta distribución de coberturas nos permite hallar el número de curva CN_{II} , son obtenidas mediante sistemas de información geográfica identificando cada proporción de área A_i y la siguiente ecuación;

$$CN_{II,p} = \frac{\sum CN_{II,i} A_i}{\sum A_i}$$

La Tabla 3 muestra los números de curva obtenidos para cada cobertura en el año 2005, mientras que la Tabla 4 los muestra para el año 2024, Con la Tabla 1, podemos hacer la comparación de los valores ponderado de CN.

Tabla 3. CNII Ponderado, año 2005.

| Cuenca | Cobertura | Suelo Hidrológico | Área (km ²) | Proporción | CNII | CNII ponderado |
|-----------------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------------|------------|------|----------------|
| Cuenca Calicanto – Escenario 2005 | Calles sin pavimentar | D | 0.190 | 1.83% | 87 | 65.84 |
| | Vías residenciales | | 0.083 | 0.80% | 90 | |
| | Zona residencial | | 0.752 | 7.22% | 92 | |
| | Suelo Pastizal | | 9.418 | 90.31% | 63 | |

Tabla 4. CNII Ponderado, año 2024.

| Cuenca | Cobertura | Suelo Hidrológico | Área (km ²) | Proporción | CNII | CNII ponderado |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------------|------------|------|----------------|
| Cuenca Calicanto – Escenario 2024 | Canal | D | 0.059 | 0.57% | 89 | 76.81 |
| | Vías residenciales | | 0.505 | 4.85% | 90 | |
| | Suelo industrial | | 0.646 | 6.19% | 94 | |
| | Zona residencial | | 2.015 | 19.32% | 92 | |
| | Suelo Pastizal | | 7.203 | 69.07% | 70 | |

7.3 Análisis De Precipitaciones

Para este análisis de precipitación se recopila información extraída de la página web del DHIME, esta es una dependencia del IDEAM que nos permite ver los datos de precipitación históricos almacenados por año en distintas estaciones alrededor del país, identificadas con

un código único, para este caso específico usamos las estaciones descritas en la Tabla 5, teniendo en cuenta su cercanía con el área de estudio y que esta quedara ubicada en el centro, de esta manera notaremos cual tiene más influencia en la cuenca:

Tabla 5. Estaciones IDEAM y Clasificación

| Estación | Código | Municipio | Tipo | Altura | Años de Reg. |
|-------------------------|----------|-----------|----------------|--------|--------------|
| Aeropuerto Rafael Núñez | 14015080 | Cartagena | Sinóptica Ppal | 2m | 58 |
| Arjona | 29030040 | Arjona | Pluviométrica | 60 | 31 |
| Cañaveral | 14010050 | Turbaco | Pluviométrica | 75m | 31 |
| Escuela Naval CIOH | 14015030 | Cartagena | Climática Ppal | 1m | 20 |

7.3.1 Análisis de Frecuencia de Precipitaciones Máximas en 24hrs.

Para las estaciones recopiladas, se realiza un análisis de frecuencia, mediante la distribución estadística de Gumbel ya que es el método más utilizado a nivel Costa Caribe.

Con base a la información de análisis de frecuencia de precipitaciones máximas, aplicando la distribución tipo Gumbel, se estiman los valores de precipitaciones máximas en 24 horas para diferentes periodos de retorno, tal como se muestra en la siguiente Tabla:

Tabla 6, Pmax24h por Estación y Periodo de Retorno.

| T (años) | Precipitación Máxima en 24hrs (mm) | | | |
|----------|------------------------------------|---------------|-----------|--------|
| | Aeropuerto | Escuela Naval | Cañaveral | Arjona |
| 100 | 248.61 | 199.32 | 184.42 | 165.88 |
| 50 | 223.90 | 181.68 | 168.49 | 152.00 |
| 10 | 165.46 | 139.98 | 130.81 | 119.15 |
| 5 | 138.90 | 121.04 | 113.69 | 104.22 |
| 2 | 98.79 | 92.423 | 87.84 | 81.67 |

7.3.2 Distribución Espacial de Precipitaciones

Realizamos un proceso de interpolación de tipo IDW (Inverse Distance Weighting), el cual se basa en la premisa de que los valores de una variable en puntos desconocidos pueden ser estimados a partir de los valores de puntos conocidos, con un mayor peso asignado a los puntos más cercanos. Esto con el fin de unificar la información obtenida de nuestras cuatro estaciones pluviométricas, Este proceso de interpolación se lleva a cabo utilizando un Sistema de Información Geográfica donde estimamos la distribución espacial de la precipitación en la cuenca mediante el uso de isoyetas. Para el presente estudio los periodos de retorno seleccionados fueron; dos, cinco, diez, cincuenta y 100 años.

A continuación, se muestran los mapas de isoyetas, de la distribución espacial de las precipitaciones para los diferentes periodos de retorno, en estas podemos notar que la zona de estudio se encuentra influenciada principalmente por las precipitaciones registradas en la estación Escuela Naval CIOH.

Figura 7, Precipitación Máxima en 24h, TR2

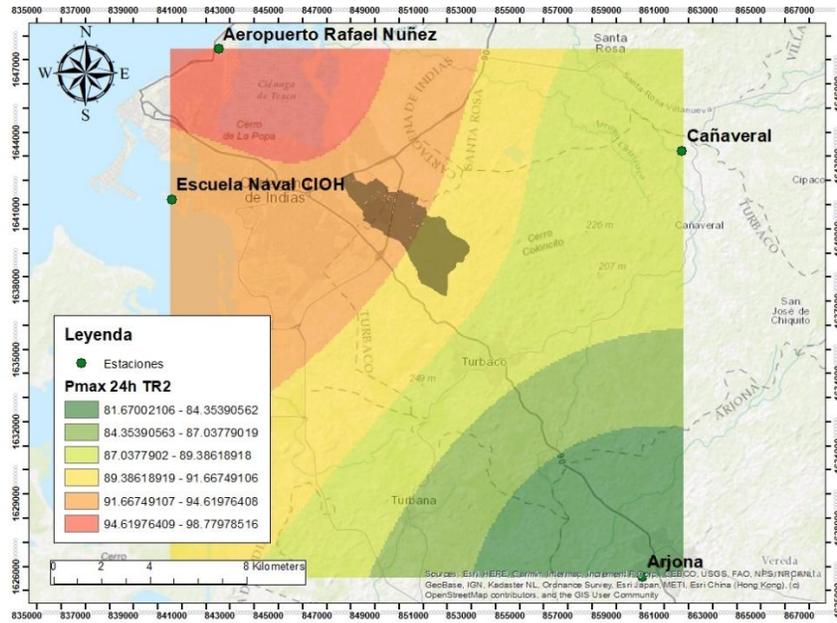


Figura 8, Precipitación Máxima en 24hrs, TR5

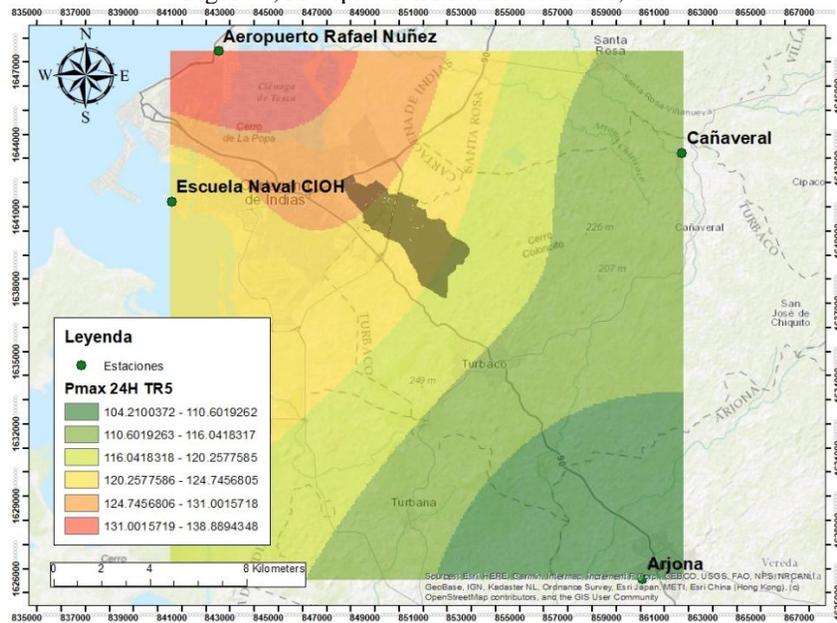


Figura 9, Precipitación Máxima en 24hrs, TR10

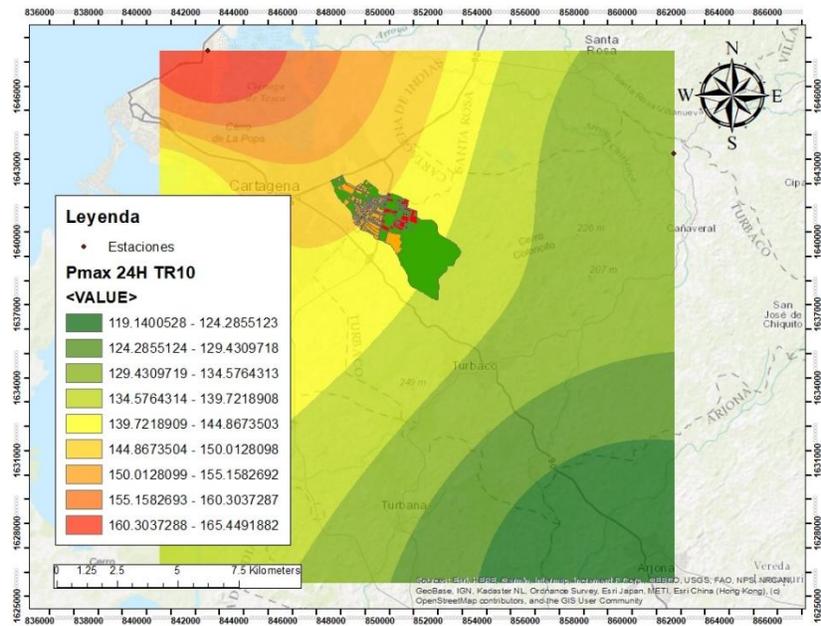


Figura 10, Precipitación Máxima en 24hrs, TR50

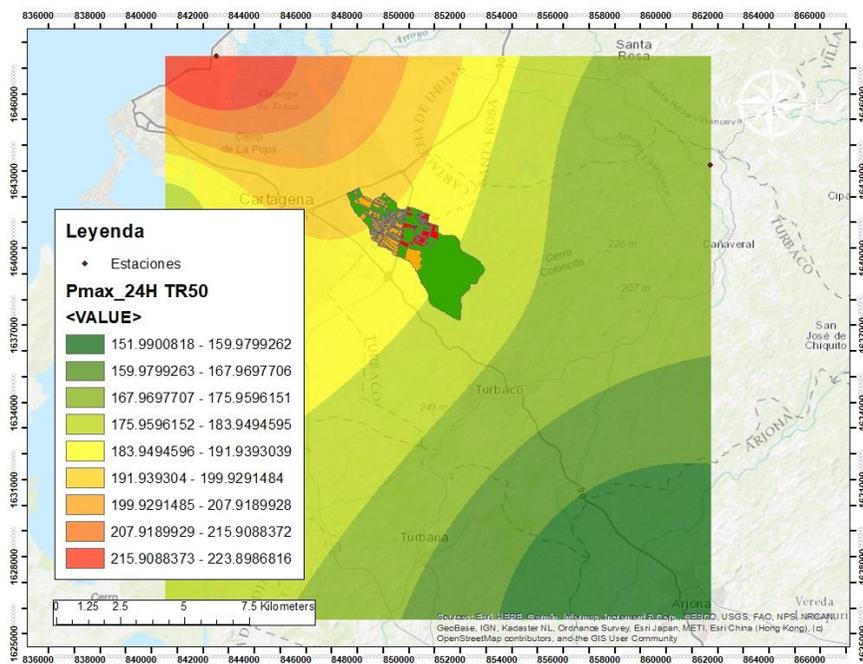
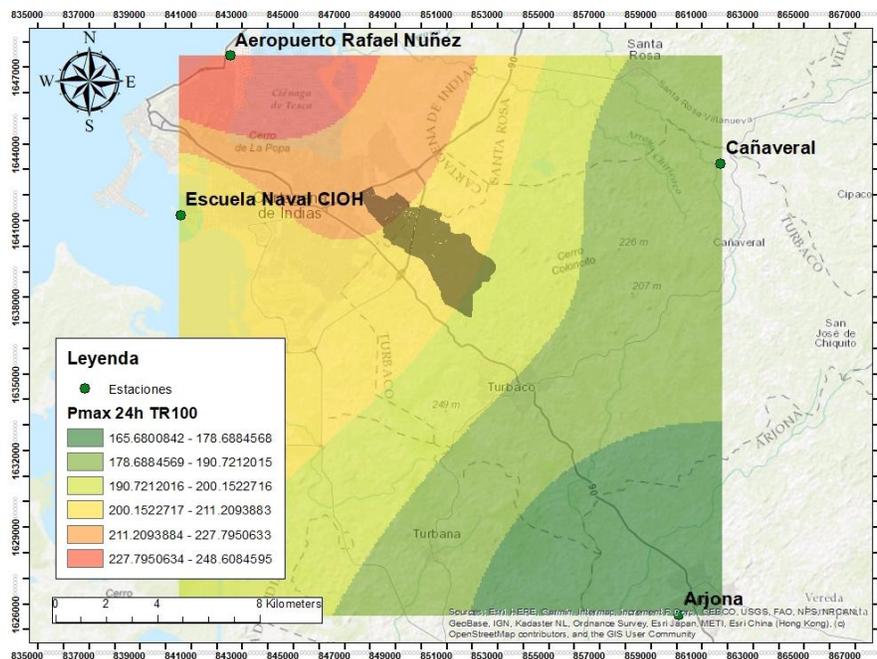


Figura 11, Precipitación Máxima en 24H, TR100



Luego de recopilar toda esta información, se procede a estimar un promedio de precipitaciones máximas en veinticuatro horas, teniendo en cuenta la distribución espacial entre estaciones. Estos se describen en la Tabla 7;

Tabla 7, Precipitaciones promedio sobre la Cuenca.

| Precipitaciones Sobre la Cuenca | |
|--|----------------------|
| Periodo de Retorno | Pmax 24h (mm) |
| 2 años | 91.83 |
| 5 años | 122.35 |
| 10 años | 142.56 |
| 50 años | 187.04 |
| 100 años | 205.82 |

7.3.2.1 Factores de mayoración y reducción de precipitaciones

Con la información de los datos de precipitación máxima sobre la cuenca para diferentes periodos de retorno, se asume que este fenómeno es homogéneo, pero, lo cual no es certero en cuencas de grandes dimensiones. Para considerar los efectos de la heterogeneidad de las precipitaciones sobre la cuenca, se usa un factor de reducción que permite representar una distribución de la lluvia sectorizada sobre la cuenca, siendo esta condición más realista, teniendo en cuenta que la lluvia tiende a cambiar en intensidad durante el periodo de la precipitación.

Se aplica este factor de reducción, utilizando la fórmula basada en el manual de drenaje para carreteras de (INVIAS, 2009):

$$F(a) = 1.0 - 0.0268 * t_c^{-0.261} * A^{0.387}$$

Donde t_c corresponde al tiempo de concentración en horas y A al área de la cuenca en km^2 .

Basado en los datos de tiempo de concentración y área de este estudio, obtenemos un valor de 0.87 como factor de reducción.

Por otro lado, la duración típica de una lluvia en Cartagena de indias es de 3h, esto corresponde al 85% de la P_{\max} 24h. Esta fracción de la precipitación fue estimada con análisis probabilístico multianual de registros pluviográficos de la estación AEROPUERTO RAFAEL NÚÑEZ. Por otro lado, Gonzalez-Alvarez, Coronado-Hernández, Fuertes-Miquel,

& Ramos (2017) mencionan que para simular los efectos del cambio climático de deben multiplicar las precipitaciones máximas por un factor de 1.1.

Por lo tanto, las precipitaciones máximas de tres horas con efectos de cambio climático y en un área de 10.43 km² se calculará así;

$$P_{max6h} = (0.87)(1.1)(0.85)P_{max24h}$$

Finalmente, el uso de esta ecuación nos permite obtener los siguientes resultados para precipitaciones en tres horas, teniendo en cuenta los efectos del cambio climático y reducción por área, la cual se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8, Precipitaciones sobre la Cuenca

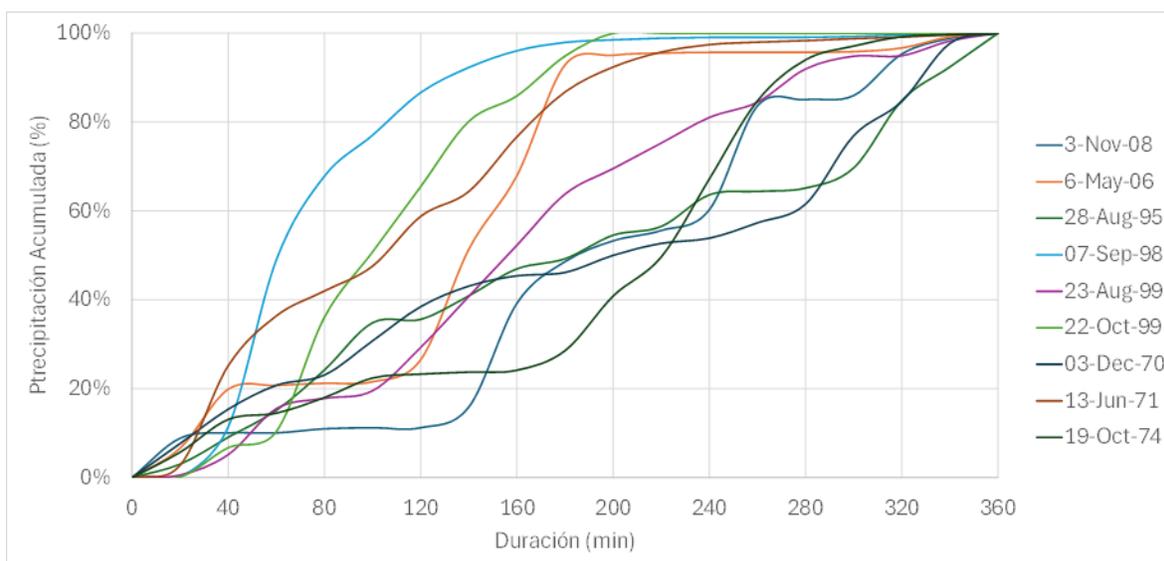
| Precipitaciones sobre la Cuenca | |
|--|---------|
| Periodo de Retorno | Pmax 6h |
| 2 años | 60.76 |
| 5 años | 99.52 |
| 10 años | 115.96 |
| 50 años | 152.15 |
| 100 años | 167.42 |

7.3.3 Análisis temporal de la precipitación en tres horas.

Para determinar cómo se distribuyen las precipitaciones en Cartagena y sus alrededores, se realizó un análisis de los registros pluviográficos de varias tormentas capturadas por la estación AEROPUERTO RAFAEL NÚÑEZ. Estas tormentas ocurrieron en las siguientes

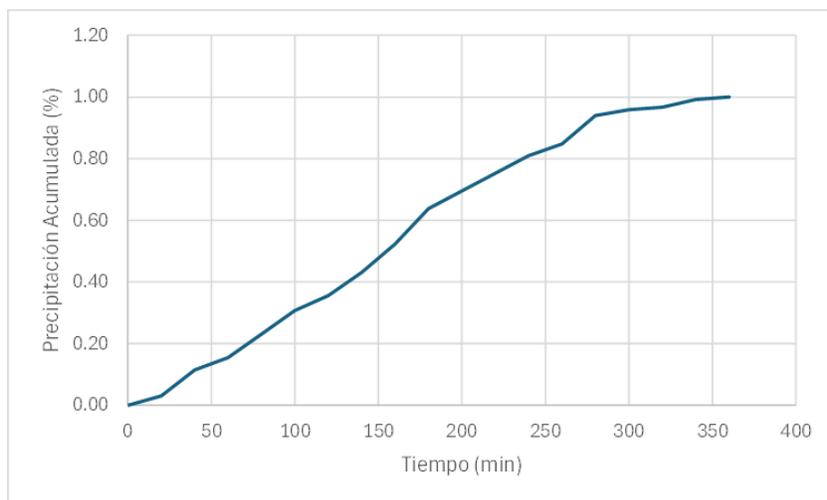
fechas: 14 de noviembre de 2020, 4 de noviembre de 2008, 6 de mayo de 2006, 7 de septiembre de 1998, 22 de octubre de 1999, 23 de agosto de 1999, 28 de agosto de 1995, 19 de octubre de 1974, 13 de junio de 1971 y el 3 de diciembre de 1970. La elección de estas tormentas se fundamenta en dos motivos: (i) todas presentan lluvias con una duración representativa de tres horas; y (ii) se registró la presencia del fenómeno La Niña durante esos períodos. Los registros pluviográficos están ilustrados en la Figura 12.

Figura 12, Registros pluviográficos de tormentas con duración de 6 horas.



A partir de las tormentas previas, se determinó la acumulación de la lluvia a través de un análisis de un percentil con una probabilidad de excedencia del 50% considerando la agrupación de las curvas de distribución a lo largo del tiempo. La probabilidad de excedencia del 50% es utilizada debido a que es ampliamente utilizada, de acuerdo con Terstriep & Stall (1974). La curva correspondiente al percentil 50% está representada en la Figura 13.

Figura 13, Distribuciones temporales de lluvia de 6 horas para el percentil 50%.



Se asumió un patrón crítico de tormentas que podrían ocurrir en la ciudad de Cartagena y sus alrededores, considerándose esta distribución como adecuada para el análisis hidrológico.

Esta distribución se presenta en la Tabla 9:

Tabla 9, Distribución temporal de la precipitación acumulada en 6 horas

| t (min) | P50 |
|----------------|------------|
| 0 | 0.00% |
| 20 | 3.03% |
| 40 | 11.47% |
| 60 | 15.52% |
| 80 | 23.08% |
| 100 | 30.77% |
| 120 | 35.61% |
| 140 | 43.08% |
| 160 | 52.30% |
| 180 | 63.79% |
| 200 | 69.54% |
| 220 | 75.29% |
| 240 | 81.03% |
| 260 | 84.80% |

| t (min) | P50 |
|---------|---------|
| 280 | 94.02% |
| 300 | 95.85% |
| 320 | 96.68% |
| 340 | 99.17% |
| 360 | 100.00% |

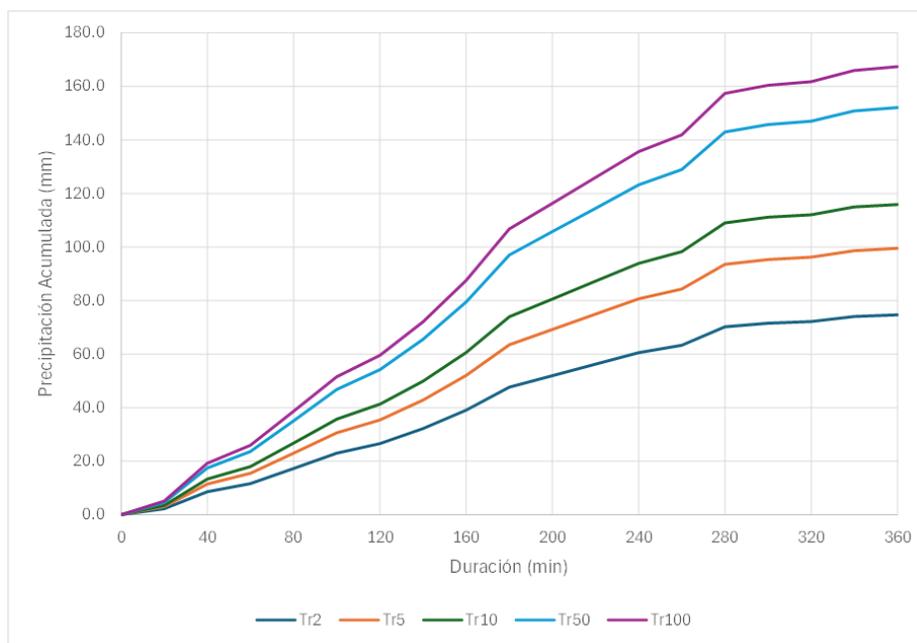
Al tener la distribución de la precipitación acumulada para un percentil del 50%, se procede a establecer las distribuciones de lluvia, comenzando con las precipitaciones máximas en un período de 6 horas para distintos períodos de retorno, que se definen en la Tabla 10.

Tabla 10, Precipitaciones acumuladas para una tormenta de 6 horas y diferentes periodos de retorno.

| Distribuciones de lluvias adoptadas para el proyecto | | | | | |
|---|------|------|-------|-------|-------|
| t (min) | Tr2 | Tr5 | Tr10 | Tr50 | Tr100 |
| 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 20 | 2.3 | 3.0 | 3.5 | 4.6 | 5.1 |
| 40 | 8.6 | 11.4 | 13.3 | 17.4 | 19.2 |
| 60 | 11.6 | 15.4 | 18.0 | 23.6 | 26.0 |
| 80 | 17.2 | 23.0 | 26.7 | 35.1 | 38.6 |
| 100 | 23.0 | 30.6 | 35.7 | 46.8 | 51.5 |
| 120 | 26.6 | 35.4 | 41.3 | 54.1 | 59.6 |
| 140 | 32.2 | 42.9 | 49.9 | 65.5 | 72.1 |
| 160 | 39.0 | 52.0 | 60.6 | 79.5 | 87.5 |
| 180 | 47.6 | 63.5 | 73.9 | 97.0 | 106.8 |
| 200 | 51.9 | 69.2 | 80.6 | 105.8 | 116.4 |
| 220 | 56.2 | 74.9 | 87.3 | 114.5 | 126.0 |
| 240 | 60.5 | 80.6 | 93.9 | 123.2 | 135.6 |
| 260 | 63.3 | 84.4 | 98.3 | 129.0 | 141.9 |
| 280 | 70.2 | 93.5 | 109.0 | 143.0 | 157.4 |
| 300 | 71.6 | 95.4 | 111.1 | 145.8 | 160.4 |
| 320 | 72.2 | 96.2 | 112.1 | 147.0 | 161.8 |
| 340 | 74.0 | 98.7 | 115.0 | 150.8 | 166.0 |
| 360 | 74.7 | 99.5 | 115.9 | 152.1 | 167.4 |

A continuación, estas precipitaciones acumuladas para los diferentes periodos de retorno tabuladas en la tabla anterior son graficadas en la Figura 14.

Figura 14, Distribución temporal de las lluvias para diferentes periodos de retorno – 6 horas (P50%).



7.4 Modelación Hidrológica

7.4.1 Desarrollo del modelo hidrológico

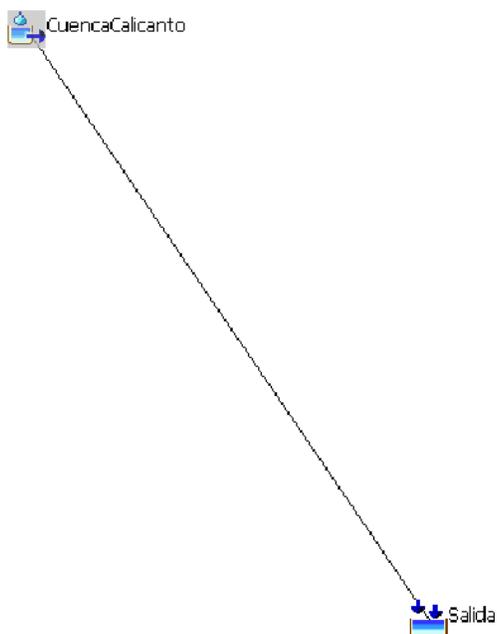
El evento hidrológico del área de drenaje fue modelado en el software HEC-HMS, el cual permite seleccionar modelos que relacionan eventos de lluvia y la escorrentía resultante, considerando la distribución temporal como método de discretización de la precipitación en un día lluvioso para periodos de retorno de 2, 5, 10, 50 y 100 años. Los métodos empleados en la definición del escenario fueron los siguientes:

- **Transformación lluvia-escorrentía:** Hidrograma Unitario del SCS.
- **Pérdidas por infiltración:** Método del Número de Curva del SCS.
- **Distribución de la precipitación:** Modelo de lluvias sintéticas del SCS.

La cuenca se integró al software, y el esquema resultante se presenta en el modelo de la

Figura 15

Figura 15, Esquema del modelo Hidrológico



Como datos de entrada al modelo, se ingresaron los siguientes datos:

- Número de curva para ambos escenarios (65.83 para 2005 y 76.81 para 2024)

- Lag-time asociado al tiempo de concentración es el mismo para ambos casos ya que en el lapso no ha habido un cambio significativo en el cauce principal,
- Series de precipitación, son similares puesto que son lluvias típicas de la ciudad de Cartagena.

Con base en los resultados del modelo hidrológico, se estimaron los caudales máximos para diferentes períodos de retorno, considerando las condiciones de infiltración de cada escenario. Los datos revelan un incremento significativo en los caudales entre 2005 y 2024. Para un período de retorno de 2 años, el caudal máximo aumentó en un 35.75%, pasando de 19.3 m³/s en 2005 a 26.2 m³/s en 2024. En el caso de un período de retorno de 5 años, el incremento fue del 31.8%, con valores de 30.5 m³/s en 2005 y 40.2 m³/s en 2024. Para eventos menos frecuentes, el aumento fue más moderado: 28.9% en 10 años (de 39.0 m³/s a 50.3 m³/s), 24% en 50 años (de 58.6 m³/s a 72.7 m³/s) y 22.5% en 100 años (de 67.5 m³/s a 82.7 m³/s). Estos resultados, resumidos en la Tabla 11, evidencian cómo la urbanización ha reducido la capacidad de infiltración de la cuenca, incrementando el escurrimiento y, en consecuencia, los caudales pico.

Tabla 11, Caudales máximos estimados para diferentes periodos de retorno.

| Caudal máximo (m3/s) | | | | | |
|-----------------------------|------------|------------|-------------|-------------|--------------|
| Cuenca Calicanto | Tr2 | Tr5 | Tr10 | Tr50 | Tr100 |
| 2005 | 19.3 | 30.5 | 39.0 | 58.6 | 67.5 |
| 2024 | 26.2 | 40.2 | 50.3 | 72.7 | 82.7 |
| Porcentaje de Aumento | 35.75% | 31.8% | 28.9% | 24% | 22.5% |

Los hidrogramas presentados a continuación corresponden a períodos de retorno de 2 años en la Figura 16 y 100 años en la Figura 17, evidenciando variaciones en la magnitud y respuesta hidrológica de la cuenca ante eventos de precipitación de distinta recurrencia. En el caso del período de retorno de 2 años, el caudal pico es menor, alcanzando aproximadamente $19.3 \text{ m}^3/\text{s}$, con un tiempo de formación del pico del caudal cercano a 4:24 horas, lo que indica una respuesta hidrológica más moderada ante eventos de menor intensidad. Por otro lado, el hidrograma correspondiente al período de retorno de 100 años muestra un incremento significativo en el caudal máximo, superando los $67.5 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que refleja un evento extremo con mayor volumen de escorrentía y una respuesta hidrológica más pronunciada. Además, se observa que, aunque el tiempo de respuesta al pico es similar en ambos casos, la magnitud del caudal generado en el evento de 100 años es considerablemente mayor, lo que incrementa el riesgo de inundaciones y posibles impactos en la infraestructura y asentamientos aguas abajo.

En cada figura observamos el respectivo hietograma en la parte superior, en donde la lluvia que escurre se representa con el color azul oscuro, mientras que la parte de esta lluvia que fue infiltrada se representa con el color rojo, mostrando que hay mayor capacidad de infiltración para el periodo de retorno de 2 años.

Figura 16, Hietograma (Superior) e Hidrograma del Caudal (inferior) Tr2.

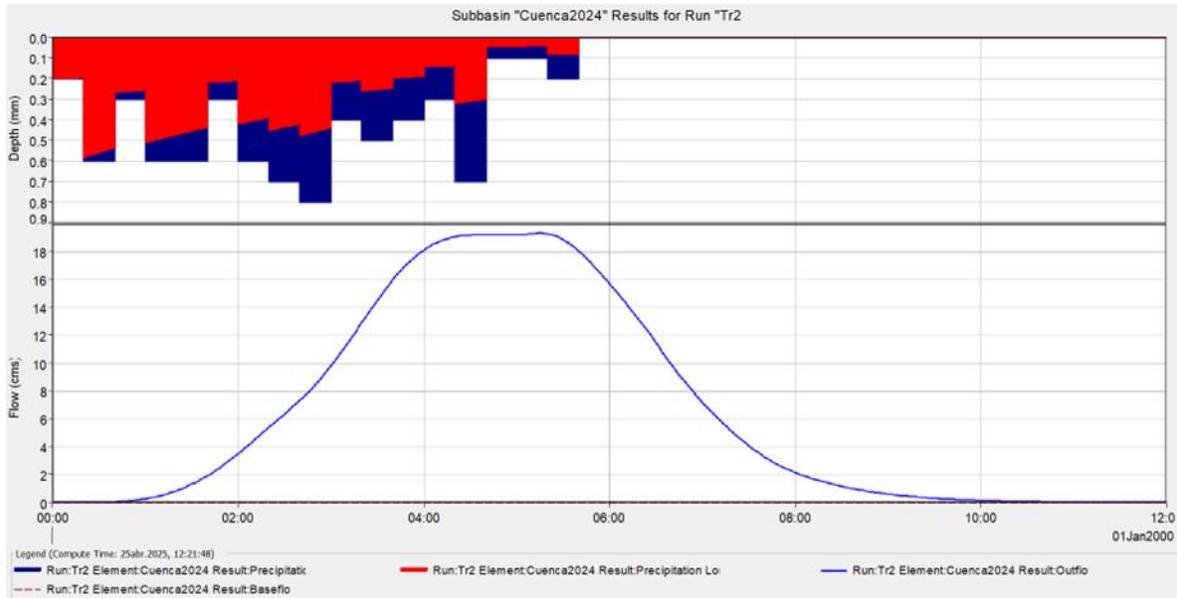
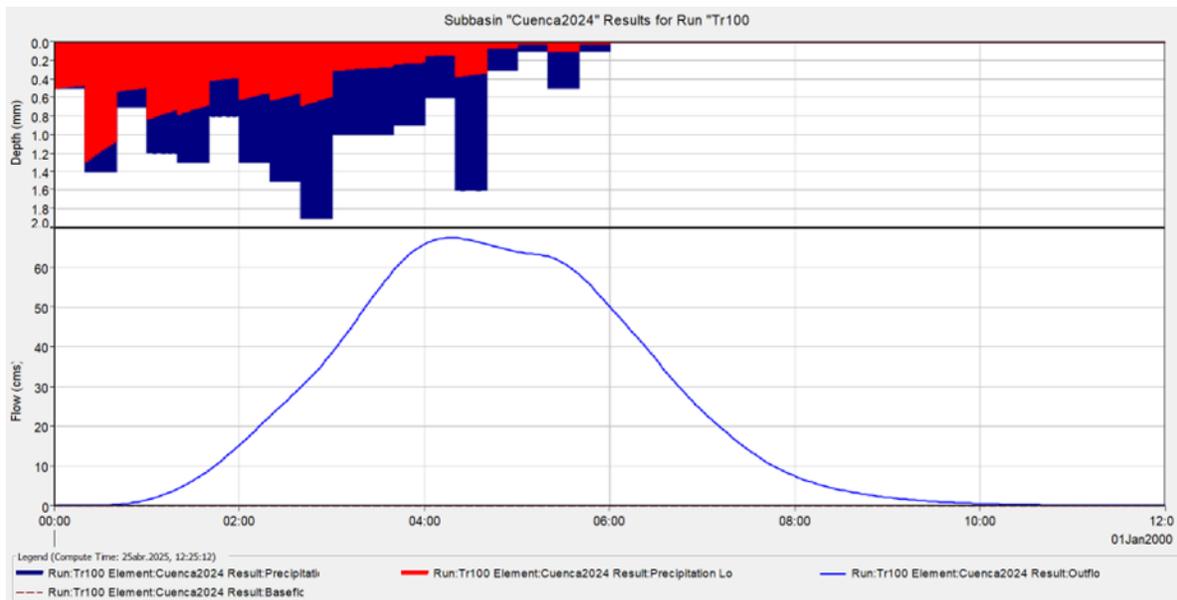


Figura 17, Hietograma (Superior) e Hidrograma del Caudal (inferior) Tr100.



7.4.2 Validación del modelo hidrológico con encuestas

En la modelación hidrológica realizada, se empleó el software HEC-HMS, en el cual se integró la información geomorfológica y climatológica de la cuenca para simular distintos escenarios hidrológicos bajo diferentes períodos de retorno. Para ello, se incorporaron datos históricos de precipitación registrados en cuatro estaciones pluviométricas, permitiendo la estimación de caudales máximos para los escenarios correspondientes a los años 2005 y 2024. A pesar de la información de la modelación hidrológica, el protocolo de modelación hidrológica e hidráulica del IDEAM, se establece que los modelos deben ser validados con información recopilada en campo, relacionada a niveles de inundación, testimonios y reportes de las personas que viven las zonas involucradas.

Para la validación del modelo hidrológico, se realizó una verificación en campo enfocada en evaluar el impacto de las inundaciones en las últimas dos décadas. Se seleccionó como zona de estudio el barrio San José de los Campanos, debido a que por esta área atraviesa el canal principal de drenaje de la cuenca Calicanto, siendo una de las más afectadas por inundaciones ante eventos de precipitación intensa y prolongada. Adicionalmente, el barrio San José de los Campanos, se considera el único centro urbano que ha estado presente en los dos periodos de estudio, en comparación a los demás barrios que surgieron durante este periodo, esto se puede evidenciar en las imágenes satelitales Figura 18 y Figura 19.

Con el fin de recopilar información cualitativa sobre la evolución de la magnitud de las inundaciones a causa del aumento de los caudales, se aplicaron encuestas a los habitantes que

residen cerca al canal Calicanto, en calles estratégicas como las carreras 100, 101, 102 y 104. Por otro lado, se estableció como criterio de inclusión que los participantes debieran residir en la zona desde hace más de 10 años. Esto permitió obtener testimonios de personas que han presenciado los cambios hidrológicos a lo largo del período de estudio, facilitando el análisis de la percepción comunitaria sobre el incremento en la frecuencia y magnitud de las inundaciones.

Figura 18, Barrio San Jose de los Campanos en el año 2005, con detalle de los puntos en donde de aplicó la encuesta.



Figura 19, Barrio San Jose de los Campanos en el año 2024, con detalle de los puntos en donde de aplicó la encuesta.



7.4.2.1 Diseño de la Encuesta:

La encuesta recopila información sobre la percepción de los habitantes acerca del aumento de la magnitud de las inundaciones en la zona de estudio y su posible relación con el desarrollo urbano e industrial en el área de la cuenca Calicanto. En esta encuesta se garantizó que las personas participantes tuvieran más de 10 años residiendo en la zona aledaña al canal, no se tuvieron en cuenta personas que viven en condición de arriendo. En esta encuesta se realizaron las siguientes preguntas con sus posibles opciones;

- ¿En qué sector de San José de los Campanos Reside?
 - Calle 100
 - Calle 101

- Calle 102
- Calle 104

- ¿En qué rango de edad se Encuentra?
 - Menos de 30 años
 - Entre 30 y 40 años
 - Entre 41 y 50 años
 - Mas de 51 años.

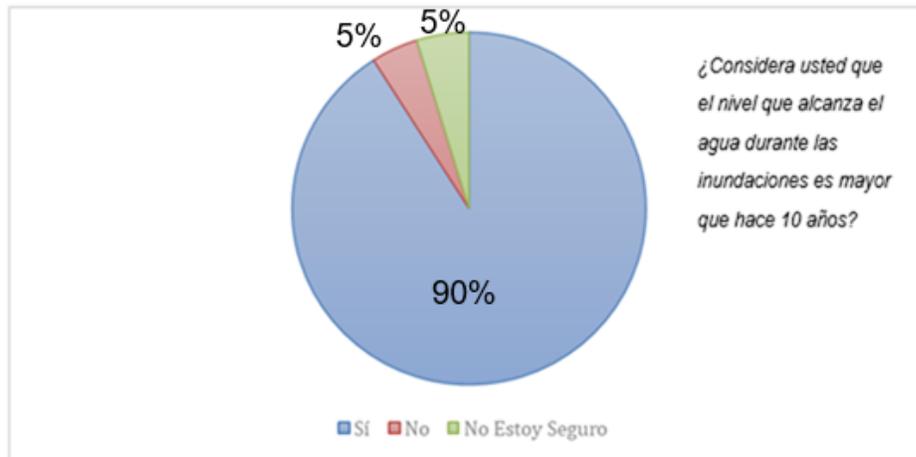
- ¿Considera usted que el nivel que alcanza el agua durante las inundaciones es mayor que hace 10 años?
 - Sí.
 - No.
 - No estoy seguro.

- ¿Cree que las causas del aumento de inundaciones están ligadas a la construcción de urbanizaciones como Villagrande I y II, Bosques de la Cincunvalar, Asturias y otros proyectos industriales cercanos?
 - Sí.
 - No.
 - Soy Indiferente a esas Causalidades.
 - Hay otras causas.

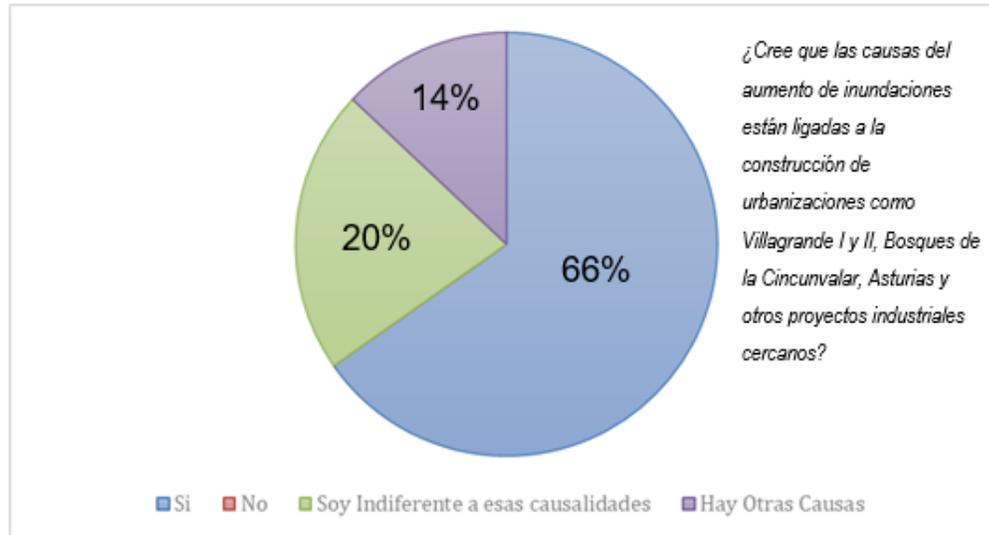
7.4.2.2 Resultados de la Encuesta:

Teniendo en cuenta que las primeras preguntas son sólo de clasificación, en este apartado se mencionan solo las ultimas 2, ya que estas contienen la información correspondiente al estudio.

- ¿Considera usted que el nivel que alcanza el agua durante las inundaciones es mayor que hace 10 años?



- ¿Cree que las causas del aumento de inundaciones están ligadas a la construcción de urbanizaciones como Villagrande I y II, Bosques de la Cincunvalar, Asturias y otros proyectos industriales cercanos?



La mayoría de los encuestados percibe que el desarrollo urbano y la industrialización han aumentado la vulnerabilidad de la zona. Este resultado refuerza la importancia de analizar los cambios en el uso del suelo, los coeficientes de escorrentía y la capacidad de drenaje de la cuenca.

7.4.3 Validación con Plan Maestro de Drenajes Pluviales del Distrito de Cartagena

En el año 2007 se presentó el documento denominado Estudios y Diseños del Plan Maestro de Drenajes Pluviales del Distrito de Cartagena de Indias (PMDP), en el cual se realizó un análisis hidrológico e hidráulico de cuencas urbanas y rurales con influencia en la ciudad de Cartagena. Dentro del estudio hidrológico del PMDP, se realizó un análisis hidrológico de la cuenca Matute (ARMAT). Esta cuenca se forma a partir de varios arroyos que nacen en la zona rural del municipio de Turbaco, entre los que se destacan el arroyo Matute, Juan Ramos y Zuleta. Estas corrientes de agua recorren el territorio hasta llegar a la parte urbana de

Cartagena, donde desembocan en los canales Chapundún y Calicanto (Consortio Consultores Cartageneros, 2007). Esta cuenca está dividida en 7 subcuencas (ARMAT-A1, ARMAT-A2, ARMAT-A3, ARMAT-A4, ARMAT-A5, ARMAT-A6 y ARMAT-A7), donde las subcuencas A4, A5 y A6 corresponden al área de drenaje asociada al canal Calicanto, y que involucra un área total de 10.7 km²

Luego del diagnóstico y revisión de las subcuencas que hacen parte del área de drenaje del Canal Calicanto, se realiza una comparación de los caudales pico del modelo hidrológico en HEC-HMS a través del error relativo, el cual se define como:

$$error = \left| \frac{x_{cal} - x_{PMDP}}{x_{PMDP}} \right| \cdot 100\%$$

Donde x_{cal} corresponde al valor de caudal pico del software HEC-HMS, mientras que x_{PMDP} corresponde al valor de caudal pico del PMDP. Los resultados del error en cada escenario con diferentes periodos de retorno se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Comparación entre valores de caudales pico para diferentes periodos de retorno (PMDP vs. Modelo HEC-HMS).

| Fuente | Caudales pico (m ³ /s) | | | | |
|----------------|-----------------------------------|------|-------|-------|-------|
| | Tr2 | Tr5 | Tr10 | Tr50 | Tr100 |
| Modelo HEC-HMS | 19.3 | 30.5 | 39.0 | 58.6 | 67.5 |
| PMDP | 28.6 | 33.8 | 38.26 | 51.1 | 57.9 |
| Error (%) | 32.0% | 9.8% | 1.9% | 14.7% | 16.6% |

En la tabla anterior se pudo evidenciar que, los caudales en escenarios con periodos de retorno de 5, 10 y 50 años, estuvo por debajo del 15%, garantizando así una confiabilidad del resultado de la modelación en este estudio, comparado con el documento maestro de planeación de la ciudad de Cartagena. En contraste, se muestran errores relativos del 32% y 16.6% en los caudales asociados a periodos de retorno de 2 y 100 años, respectivamente. Las diferencias observadas pueden atribuirse a varios factores. En primer lugar, el modelo HEC-HMS incorpora una representación detallada de procesos hidrológicos como la infiltración, el almacenamiento inicial y la propagación del flujo, mientras que las estimaciones del PMDP se basan en metodologías más simplificadas como el método racional. Además, las discrepancias pueden estar influenciadas por la calidad y resolución de los datos de entrada (precipitación, uso del suelo, tipo de suelo y parámetros de pérdida), así como por diferencias en los supuestos asociados al tiempo de concentración y distribución temporal de la lluvia.

7.4.3.1 Consideraciones Éticas

Se respetaron los derechos de los residentes de la cuenca, asegurando el anonimato en los testimonios recolectados.

8 CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS

La presente investigación ha logrado cumplir con los objetivos planteados, evaluando la evolución de la respuesta hidrológica de la cuenca Calicanto en Cartagena entre los años

2005 y 2024, con base en los cambios en el uso del suelo y la expansión urbana en la zona de estudio.

8.1 Cumplimiento del Objetivo General

Se logró evaluar la evolución de la respuesta hidrológica de la cuenca a partir del análisis comparativo de las condiciones hidrológicas de 2005 y 2024, utilizando herramientas SIG, modelos hidrológicos y registros históricos de precipitaciones. Los resultados indican un incremento significativo en la impermeabilización del suelo, lo que ha reducido la capacidad de infiltración y aumentado los caudales de escorrentía.

8.2 Cumplimiento de los Objetivos Específicos

A continuación, se especifican los objetivos propuestos, su ejecución y los resultados obtenidos.

8.2.1 Delimitación de la cuenca hidrográfica

Se realizó la delimitación de la cuenca del canal Calicanto con base en imágenes satelitales, modelos digitales de elevación (MDE) y herramientas SIG, comparando su configuración en 2005 y 2024. Los análisis evidenciaron que, aunque la extensión de la cuenca no ha cambiado, las coberturas del suelo han sufrido modificaciones significativas.

8.2.2 Comparación de la respuesta hidrológica

Mediante el uso del software HEC-HMS, se modelaron los caudales pico para ambos años de referencia. Los resultados muestran un incremento en los caudales máximos, con un

aumento del 37.75% en eventos con un periodo de retorno de 2 años y un aumento del 22.5% en eventos hidrológicos con un periodo de retorno de 100 años. Estos hallazgos confirman que el crecimiento urbano ha generado un aumento en la escorrentía superficial y un mayor riesgo de inundaciones.

8.2.3 Impacto del crecimiento residencial

La percepción de los habitantes del barrio San José de los Campanos, recopilada mediante encuestas, coincide con los hallazgos del modelo hidrológico. Un 91.3% de los encuestados considera que el nivel de inundaciones ha aumentado en los últimos 10 años, mientras que un 65.2% asocia este fenómeno con el desarrollo urbano.

9 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El incremento del número de curva (CN_{II}) de 65.8 en 2005 a 76.8 en 2024 en la cuenca Calicanto, donde ha habido un aumento en la urbanización, refleja un aumento de la impermeabilización en la zona debido a desarrollos urbanos. Este aumento en el CN_{II} sugiere una reducción en la capacidad de infiltración del suelo, lo cual es un indicador directo de que el área ha perdido permeabilidad y aumentado la escorrentía superficial.

Con el aumento del CN_{II} , el riesgo de inundaciones en eventos de lluvias intensas es mayor, dado que el suelo no absorbe suficiente agua y el exceso contribuye rápidamente al caudal en ríos y arroyos locales. Este cambio tiene un impacto importante en la planificación de

drenajes y en la necesidad de infraestructura adicional para manejar el flujo de aguas pluviales.

Hubo un incremento significativo en los caudales entre 2005 y 2024. Para un período de retorno de 2 años, el caudal máximo aumentó en un 22.5%, pasando de 67.5 m³/s en 2005 a 82.7 m³/s en 2024. Este incremento en el caudal se asemeja al crecimiento presentado en las condiciones hidrológicas de la cuenca del río Chinchiná, donde los cambios en las coberturas del suelo generaron un aumento en los caudales pasando de un 1.0% en 1987 a 26.3% en 2014 (Patiño, 2018)

En cuanto a las coberturas del suelo, relacionadas a la cuenca Calicanto, la proporción de suelo urbano (calles y viviendas) era de 8% y la zona no urbanizada (vías sin pavimentar y zonas vegetales) era de 92% para el año 2005. Esta condición de coberturas cambió en el escenario de cuenca del año 2024, ya que la zona vegetal disminuyó a una proporción de 69.64%, mientras que, la proporción del suelo Urbano (viviendas y calles) aumentó a 24.17%. Por otra parte, en la zona de cuenca surgieron proyectos con funciones industriales, ocupando estos una proporción de 6.19%.

Se podría decir que en 2005 la cuenca estaba un 9.69% urbanizada mientras que para 2024 este porcentaje pasó a 30.93%. Situación similar a la contemplada en el estudio del arroyo Mameyal, donde se evidenció que la cuenca en un lapso de 50 años tuvo una disminución del 15% de la cobertura vegetal y para la fecha de su estudio se encontraba un 37% urbanizada (Arrieta-Gaviria & Zaraza-Caro, 2020).

Por otro lado, en la validación del estudio hidrológico con el documento del PMDP, se presentaron discrepancias en algunos periodos de retorno, que son influidas por criterios de selección de factores como las condiciones de infiltración de la cuenca. Este trabajo y análisis presenta este limitante, que puede ser abordado con información detallada como el uso de infiltrómetros o registros de caudal a lo largo del canal Calicanto. Desde el punto de vista estadístico, es importante tener registros en campo a disposición para un análisis más exhaustivo.

9.1 Limitaciones del Modelo HEC-HMS y del Método del SCS

El uso del modelo HEC-HMS, aunque ampliamente validado y aceptado en estudios hidrológicos, presenta ciertas limitaciones al aplicarse en contextos urbanos tropicales como Cartagena. Una de las principales limitaciones es la simplificación del proceso de infiltración mediante el uso del modelo del número de curva (CN) del SCS, el cual no considera variaciones locales en la humedad antecedente ni las propiedades dinámicas del suelo durante eventos sucesivos de precipitación.

Adicionalmente, el hidrograma unitario del SCS, empleado para la transformación lluvia-escurrimiento, asume una distribución temporal estándar del escurrimiento que puede no representar adecuadamente los eventos de lluvia reales observados en la región Caribe, donde las lluvias pueden presentar comportamientos irregulares y alta intensidad en corto tiempo.

Estas limitaciones introducen incertidumbres significativas en la estimación del caudal pico, especialmente en escenarios donde el uso del suelo ha cambiado drásticamente. Las estimaciones pueden subestimar o sobrestimar la escurrentía, dependiendo del ajuste del número de curva y del patrón de lluvia asumido.

9.2 Incertidumbre en las Infiltraciones y Recomendaciones

La estimación de infiltraciones mediante el CN del SCS depende fuertemente de la clasificación del suelo y de la cobertura vegetal, que en muchos casos es determinada visualmente o mediante imágenes satelitales, sin verificación en campo. Esta simplificación no permite capturar con precisión la variabilidad espacial de la infiltración dentro de una cuenca heterogénea como Calicanto.

En este sentido, se recomienda el uso de infiltómetros de doble anillo o pruebas de infiltración in situ, que pueden proporcionar datos reales sobre la capacidad de absorción del suelo en distintos puntos de la cuenca. Asimismo, el monitoreo de caudales en tiempo real mediante aforos o estaciones temporales permitiría calibrar y validar el modelo hidrológico con mayor precisión, reduciendo la incertidumbre asociada a los parámetros empíricos.

10 CONCLUSIONES

El presente estudio ha permitido evaluar la evolución de la respuesta hidrológica de la cuenca Calicanto en la ciudad Cartagena entre los años 2005 y 2024, destacando cómo el crecimiento urbano ha impactado la dinámica del flujo superficial. A través del análisis comparativo de las coberturas del suelo, la modelación hidrológica con HEC-HMS y la recopilación de testimonios de los habitantes, se ha evidenciado un incremento significativo en la escorrentía superficial debido a la expansión de superficies intervenidas. Este cambio ha generado un aumento en los caudales máximos, incrementando el riesgo de inundaciones en eventos de precipitación intensa.

La modelación hidrológica permitió estimar que, para un período de retorno de 2 años, el caudal máximo aumentó en un 35.75%, mientras que para un período de 100 años el incremento fue del 22.5%. Estos resultados reflejan una disminución en la capacidad de infiltración de la cuenca, lo que sugiere la necesidad de estrategias de gestión del suelo que mitiguen estos efectos. Además, la percepción de los residentes confirma la tendencia identificada en los modelos, pues el 91.3% de los encuestados considera que las inundaciones han aumentado en magnitud en la última década, y el 65.2% atribuye este fenómeno al desarrollo urbano e industrial.

Desde un punto de vista académico, esta investigación enfocada en la cuenca Calicanto, establece un precedente para futuras investigaciones en la gestión de drenajes urbanos y mitigación de riesgos hidrológicos por parte de las entidades gubernamentales y empresas de servicios públicos. El uso de herramientas SIG, modelación hidrológica y validación con información en campo aplicada en este estudio, ofrecen un enfoque integral que puede ser replicado en estudios similares en otras cuencas urbanas de la región.

Desde el punto de vista técnico y acorde a la resolución 0330 de 2017 y su actualización 0799 de 2021, se sugiere para nuevos proyectos urbanísticos aplicar el artículo 153 el cual dice: *“Para nuevos desarrollos urbanos, donde se modifique la cobertura del suelo, se deben generar estrategias con el fin de mitigar el efecto de la impermeabilización de las áreas en el aumento de los caudales de escorrentía”*.

Adicionalmente, se recomienda complementar este estudio con un análisis hidráulico detallado verificando las condiciones hidráulicas del año 2005 y 2024 con información topográfica que permita estudiar el impacto por inundación en zonas aledañas al canal Calicanto, puesto que este estudio se limitó solamente a analizar las condiciones hidrológicas de la cuenca Calicanto hasta la intersección con la vía la cordialidad. También se sugiere un estudio hidrogeológico que permita analizar el impacto del desarrollo urbano en la recarga de acuíferos subterráneos y su relación con el balance hídrico de la región.

11 BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía Distrital de Cartagena. (2023). *Informe de calidad de vida Cartagena*. Cartagena, Colombia: Cartagena Cómo Vamos.
- Alessi, V. F., & Torrero, M. P. (2015). Manejo integrado de cuencas hídricas: cuenca del río Gualjaina, Chubut, Argentina. *Boletín Mexicano De Derecho Comparado*, 143.
- Arrieta-Gaviria, D., & Zaraza-Caro, D. A. (2020). *Efectos de los procesos de urbanización en la cuenca hidrográfica del arroyo Mameyal*. Cartagena, Colombia: Universidad de Cartagena.
- Chow, V. T. (1971). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
- Consortio Consultores Cartageneros. (2007). *Estudios y Diseños del Plan Maestro de Drenajes Pluviales del Distrito de Cartagena de Indias*. Alcaldía de Cartagena, Departamento Administrativo de Valorización Distrital, Cartagena.
- DANE. (2023). *Marco Fiscal de Mediano Plazo (MFMP) 2023 - 2032*. Gobierno de Colombia.
- Del Castillo, L. C., Ortíz, M. A., & Moreno Egel, D. D. (2014). *Evaluación hidrológica e hidráulica de la cuenca hidrográfica del arroyo Policarpa para el control de inundaciones*. Cartagena, Colombia: Universidad de Cartagena.
- Dingman, S. L. (2002). *Physical hydrology*. Waveland Press.

- Feyissa, T. A., Demissie, T. A., Saathoff, F., & Gebissa, A. (2024). Hydrological responses projection to the potential impact of climate change under CMIP6 models scenarios in Omo River Basin, Ethiopia. *Results in Engineering*, 102708.
- Gonzalez-Alvarez, A., Coronado-Hernández, O. E., Fuertes-Miquel, V. S., & Ramos, H. M. (2017). Effect of the non-stationarity of rainfall events on the design of hydraulic structures for runoff management and its applications to a case study at Gordo Creek watershed in Cartagena de Indias, Colombia. *Fluids*, 3(2) 27.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2008). Climate Change and Water. *IPCC Technical Paper VI*.
- INVIAS. (2009). *Manual de Drenaje para Carreteras*. Bogotá: Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías.
- Jam-Jalloh, S. U., Liu, J., Wang, Y., & Liu, Y. (2024). Coupling WRF with HEC-HMS and WRF-Hydro for flood forecasting in typical mountainous catchments of northern China. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24(9), 3155-3171.
- Jean Louis, J. (2024). Effects of urbanization and deforestation on flooding: Case study of Cap-Haïtien City, Haiti. *Journal of Flood Risk Management*, 3155-3171.
- Kimbi, S. B., Onodera, S., Wang, K., Kaihotsu, I., & Shimizu, Y. (2024). Assessing the Impact of Urbanization and Climate Change on Hydrological Processes in a Suburban Catchment. *Environments*, 225, 10, 11.
- Luan, J., & Ma, N. (2025). Responses of seasonal hydrological processes to vegetation restoration in the Yellow River basin. *Journal of Hidrology*.

- Maidment, D. R. (1993). *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill.
- Maidment, D. R. (2002). *Arc Hydro: GIS for Water Resources*. ESRI Press.
- Nené-Preciado, A. J., Sansón, G. G., Mendoza, M. E., & Bátiz., F. d. (2017). Cambio de cobertura y uso de suelo en cuencas tropicales costeras del Pacífico central mexicano. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, Issue 94*, 64-81.
- Novotny, V. (1994). *Water quality: prevention, identification and management of diffuse pollution*. Van Nostrand-Reinhold Publishers.
- Observatorio de Cartagena. (2024). Cartagena, Colombia.
- Özer, B., & Yalçiner Ercoşkun, Ö. (2024). Assessing the Impact of Urbanization on Flood Risk by RS and GIS: A Case Study on Istanbul-Esenyurt. *Journal of Contemporary Urban Affairs*, 1-15.
- Patiño, D. (2018). *Respuesta hidrológica ante los cambios de uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Chinchiná*. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Rey-Valencia, D., & Zambrano, J. (2018). Estudio de la respuesta hidrológica en la cuenca urbana de montaña San Luis-Palogrande. *Revista UIS Ingenierías*, 115-126.
- Senadi, I., Zeroual, A., & Meddi, H. (2025). From urban sprawl to aquifer strain: The hydrological consequences of Land Use/Land Cover Changes in the Mitidja plain, Algeria. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 139.
- Simental-Nájera, J. G., Arreguín-Cortés, F. I., Farfán-Gutiérrez, M., & Cervantes-Jaimes, C. E. (2023). Impacto del cambio de cobertura y uso de suelo y cambio climático en la

- respuesta hidrológica de la cuenca de la presa El Rejón mediante el uso de inteligencia artificial. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 14(4), 456-494.
- Singh, V. P., & Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(4), 270-292.
- US Army Corps of Engineers. (2000). *HEC-HMS Hydrologic Modeling System Technical Reference Manual*. Hydrologic Engineering Center.
- USDA. (1986). *Urban hydrology for small watersheds*. Technical Release 55.
- Vilca-Campana, K., Carrasco-Valencia, L., Iruri-Ramos, C., Cárdenas-Pillco, B., Escudero, A., & Chanove-Manrique, A. (2025). Improving Urban Flood Resilience: Urban Flood Risk Mitigation Assessment Using a Geospatial Model in the Urban Section of a River Corridor. *Water*, 17(7).
- Ward, A. D., & Trimble, S. W. (2003). *Hydrology Environmental*. Crc Press.
- Xu, S., Wang, Q., Yu, J., Zhao, G., Ji, H., Yue, Q., . . . Yao., X. (2025). The impact of the spatiotemporal structure of rainfall on flood response over a piedmont urban basin: An approach coupling machine learning and hydrologic modeling. *Journal of Hidrology*, 659.

ANEXOS



Ilustración 1, Resumen de la Encuesta realizada a los Habitantes del barrio San José de los Campanos



Ilustración 2, Residentes encuestados.