

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

Análisis de la variabilidad espacio - temporal de la precipitación y su impacto en la modelación hidrológica: Aplicación del modelo SHIA en la subcuenca del río de Oro.

David Leonardo Abril Sandoval

Ingeniero Ambiental

Trabajo de grado para optar el título de

Magister en Gestión de Cuencas Hidrográficas

Director

Verónica Duque Pardo

Magistra en Hidrosistemas

Universidad Santo Tomás, Bogotá

División de Ingenierías

Facultad de Ciencias Ambientales

2025

Dedicatoria

A la vida, por su complejidad y sus contrastes, por enseñarme que el conocimiento no solo se construye en los libros, sino también en el silencio, en el error y en la resistencia frente a lo incierto.

A Yurani Sandoval y Edwin Abril, cuya presencia cercana y sincera ha sido guía, consuelo y aliento en los momentos de duda y en los días de avance; su apoyo ha sido fundamental en esta travesía.

A quienes me guiaron desde el saber, por sus enseñanzas que sembraron dudas productivas y miradas críticas.

Y a la memoria de los que partieron antes de ver este logro, pero cuya huella permanece en mi voluntad de seguir aprendiendo.

Agradecimientos

Agradezco profundamente al Programa de Maestría en Gestión de Cuencas Hidrográficas de la Universidad Santo Tomás, sede Bogotá, por su compromiso en fortalecer la formación académica. A los docentes, asesores y compañeros que aportaron desde el saber y la experiencia, gracias por enriquecer este camino con sus orientaciones.

Contenido

Introducción	15
1. Análisis de la variabilidad espacio - temporal de la precipitación y su impacto en la modelación hidrológica: Aplicación del modelo SHIA en la subcuenca del río de Oro.	16
4.2 Planteamiento del problema	16
1.1.1. Pregunta de investigación.....	17
4.3 Justificación.....	18
4.4 Objetivos	19
1.3.1 Objetivo general	19
1.3.2 Objetivos específicos.....	19
2. Marco referencial.....	20
4.5 Marco teórico	20
2.1.1. Modelación hidrológica.....	20
2.1.2. Variabilidad Espacial y Temporal de la Precipitación	21
2.1.3. Técnicas de Interpolación Espacial	21
2.1.4. Indicadores estadísticos en Modelos Hidrológicos	22
2.1.5. Eventos Extremos y Cambio Climático	22
2.1.6. Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH).....	23
4.6 Marco conceptual	25
2.2.1. Subcuenca.....	25
2.2.2. Precipitación	25
2.2.3. Modelo SHIA	26
2.2.4. Escorrentía	26
2.2.5. Balance hídrico	27
2.2.6. Uso del suelo y la cobertura vegetal.....	27
2.2.7. Calibración y validación.....	27

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

2.2.8. Cauce	28
2.2.9. Caudal.....	28
2.2.10. Ocupación del cauce.....	29
2.2.11. Obras hidráulicas	29
2.2.12. Modelos Digitales de Elevación (MDE)	29
2.2.13. Curva hipsométrica.....	30
4.7 Estado del arte	30
2.3.1. Vélez Upegui (2001): Desarrollo del Modelo SHIA.....	30
2.3.2.Chen et al., (2017) : Pronóstico de inundaciones en grandes cuencas hidrográficas con un modelo hidrológico distribuido de alta resolución	31
2.3.3. Rendón-Álvarez et al., (2018)Una estrategia para la calibración y el análisis de sensibilidad del modelo hidrológico SHIA en escala intradiaria. XXIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología	31
2.3.4. Li y Heap (2014): Técnicas de Interpolación Espacial	32
2.3.5. Moriasi et al. (2007): Evaluación del Desempeño de Modelos Hidrológicos.....	32
2.3.6. Xia et al. (2020): Ciclo hidrológico y recursos hídricos en un mundo cambiante: una revisión	32
2.3.7. IDEAM (2022): Estudio Nacional del Agua	33
2.3.8. Zapata Atchortúa, E. (2016): Análisis de la capacidad de simulación hidrológica del modelo distribuido SHIA ante la caracterización por tramos de la geometría hidráulica del cauce.....	33
2.3.9. (Patricia & Jiménez, 2020): Efectos de escala espacial y temporal en la modelación hidro-sedimentológica distribuida de una cuenca tropical. Caso de estudio San Lorenzo ...	34
2.3.10. Barrios Peña, M. I. (2011): Estudio del efecto de escala espacial en un modelo hidrológico distribuido	34
4.8 Marco legal.....	35
2.1.1. Construcción de obras hidráulicas	35
2.1.2. Modelación Hidrológica	36
2.1.3. Delimitación de rondas y áreas de protección	37

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

2.4.4. Normativa sobre Cambio Climático y Eventos Extremos.....	37
3. Método.....	37
4.9 Diseño de la investigación.....	38
3.1.1. Caracterización del Área de Estudio	38
3.1.3. Procesamiento de Datos de Precipitación.....	39
3.1.4. Configuración y Calibración del Modelo Hidrológico SHIA	40
3.1.5. Simulación de Escenarios Hidrológicos	41
3.1.6. Recomendación para fortalecer la modelación hidrológica	41
4. Resultados.....	44
4.10 Caracterización del área de estudio	44
4.1.1. Procesamiento de datos SAR - NASA.....	44
4.1.2. Cálculo de Buffer Geoespacial	51
4.11 Recopilación y Validación de Datos	53
4.1.3. Obtención de datos históricos	53
4.1.4. Complemento de información faltante.....	55
4.1.5. Análisis de datos atípicos.....	58
4.1.6. Recopilación de datos geoespaciales	66
4.3 Procesamiento de Datos de Precipitación	69
4.1.7. Procedimiento diario de interpolación	69
4.1.8. Programación del algoritmo Cargue de insumos	70
4.1.9. Cálculo y exportación de precipitación media diaria.....	70
4.4 Configuración y calibración del Modelo hidrológico SHIA	72
4.1.10. Integración de datos al modelo SHIA	72
4.1.11. Ajuste paramétrico mediante la calibración hidrológica	76
4.1.12. Validación del modelo	81
4.5 Simulación de Escenarios hidrológicos.....	83
4.6 Recomendaciones para fortalecer la modelación hidrológica en la Subcuenca	87

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

4.1.13.	Recomendaciones para fortalecer la modelación hidrológica en el marco de los permisos de ocupación de playas, cauces y lechos.....	88
4.1.14.	Recomendaciones para la gestión de la cuenca.....	89
5.	Discusión	92
6.	Conclusiones	96
	Referencias bibliográficas.....	99
	Apéndices.....	105

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Parámetros morfométricos de la cuenca Palogordo</i>	46
Tabla 2. <i>Parámetros generales de la cuenca</i>	47
Tabla 3. <i>Parámetros de red hídrica cuenca Palogordo</i>	51
Tabla 4. <i>Estaciones de precipitación seleccionadas</i>	53
Tabla 5. <i>Nomenclatura asignada a estaciones</i>	54
Tabla 6. <i>Métodos utilizados para la simulación de escenarios</i>	76
Tabla 7. <i>Parámetros calibrados cuenca Palogordo</i>	77
Tabla 8. <i>Parámetros generales calculados del modelo</i>	80
Tabla 9. <i>Estadísticos de prueba de los métodos aplicados</i>	83

Lista de figuras

Figura 1. <i>Estructura grafica del marco teórico</i>	24
Figura 2. <i>Proceso metodológico</i>	43
Figura 3. <i>Cuenca de drenaje Palogordo</i>	45
Figura 4. <i>Mapa de pendiente cuenca Palogordo</i>	50
Figura 5. <i>Área de influencia de la cuenca Palogordo</i>	52
Figura 6. <i>Vecindad de IDW para el punto seleccionado</i>	57
Figura 7. <i>Uso de suelo cuenca Palogordo</i>	67
Figura 8. <i>Tipos de Suelo presente en la cuenca Palogordo</i>	68
Figura 9. <i>Precipitación 11/02/2005 (IDW y Kriging)</i>	69
Figura 10. <i>Precipitación anual multianual cuenca Palogordo</i>	75

Lista de apéndices

Apéndice A. <i>Periodos de datos faltantes</i>	105
Apéndice B. <i>NoteBook en Lenguaje Python ejecutado en Google Colab</i>	107
Apéndice C. <i>Series de precipitación completa por estaciones</i>	109
Apéndice D. <i>Nomenclatura de la USDA por tipo de suelo</i>	110
Apéndice E. <i>Procedimiento para la ejecución del código de interpolación en lenguaje Python</i>	111
Apéndice F. <i>NoteBook en Lenguaje Python ejecutado en Google Colab</i>	112
Apéndice G. <i>Hidrogramas y curvas de duración – Escenarios hidrológicos</i>	117

Resumen

La gestión del recurso hídrico y la prevención de desastres naturales en la subcuenca del río de Oro, ubicada en el área metropolitana de Bucaramanga (AMB) en el departamento de Santander, dependen significativamente de la precisión en la modelación hidrológica, la cual se ve afectada por la variabilidad espacio - temporal de la precipitación. Este estudio evaluó el impacto de dicha variabilidad en la modelación hidrológica mediante el uso del modelo SHIA, con el propósito de optimizar la toma de decisiones en la planificación y construcción de infraestructura en el cauce. Se empleo un enfoque cuantitativo - explicativo que incluye la caracterización del área de estudio, la recopilación y validación de datos hidrometeorológicos y geoespaciales, la configuración y calibración del modelo SHIA, y la simulación de escenarios hidrológicos utilizando técnicas de interpolación espacial como Kriging e IDW.

Los resultados permitieron identificar cómo diferentes escalas espaciales de datos de precipitación afectan la precisión de las simulaciones de caudal, proporcionando recomendaciones como es la implementación de técnicas de interpolación y geoestadística adecuadas al contexto topográfico y pluviométrico de la cuenca, evaluadas a partir de indicadores estadísticos para mejorar la calidad de los estudios hidrológicos presentados en especial a la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB). Este análisis contribuye a una gestión más eficiente y sostenible del recurso hídrico en la región, reduciendo la incertidumbre en la toma de decisiones y fortaleciendo los procesos de planificación ambiental.

Palabras clave: modelación hidrológica, variabilidad espacial, precipitación, SHIA, gestión del agua

Abstract

Water resource management and natural disaster prevention in the Río de Oro sub-basin rely significantly on the accuracy of hydrological modeling, which is affected by the spatio-temporal variability of precipitation. This study assessed the impact of such variability on hydrological modeling with the SHIA model, with the aim of optimizing decision-making in the planning and construction of infrastructure along the river channel. A quantitative-explanatory approach was employed, which included the characterization of the study area, the collection and validation of hydrometeorological and geospatial data, the configuration and calibration of the SHIA model, and the simulation of hydrological scenarios using spatial interpolation techniques such as Kriging and IDW.

The results revealed how different spatial scales of precipitation data influence the accuracy of streamflow simulations, providing recommendations to improve the quality of hydrological studies, particularly those submitted to the Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB). This analysis contributes to more efficient and sustainable water resource management in the region, reducing uncertainty in decision-making and strengthening environmental planning processes.

Keywords: hydrological modeling, spatial variability, precipitation, SHIA, water management.

Glosario

Afluente: Corrientes de agua, cuyo flujo contribuye a aumentar el volumen de otro cuerpo de agua (MADS, 2023)

Aforo de caudales: Proceso mediante el cual se determina el volumen del agua que circula por una sección en la unidad de tiempo (MADS, 2023).

Aguas lluvias: Aquellas recolectadas y almacenadas en los momentos y períodos de lluvias por cualquier mecanismo para su uso (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012, Resolución 955, Anexo 2)

Agua superficial: Aquellas que existen sobre la superficie de la Tierra (MADS, 2023).

Agua subterránea: Se entiende por aguas subterráneas las subálveas y las ocultas debajo de la superficie del suelo o del fondo marino que brota de forma natural como las fuentes y manantiales captados en el sitio de afloramiento o las que requieren para su alumbramiento obras como pozos, galerías filtrantes u otras similares (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012, Resolución 955, Anexo 2)

Cauce natural: Faja de terreno que ocupan las aguas de una corriente al alcanzar sus niveles máximos por efecto de las crecientes ordinarias (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018, Decreto 050, Artículo 2)

Caudal: Volumen de agua que pasa a través de una sección transversal de un cuerpo de agua en una unidad de tiempo (MADS, 2023)

Cuenca hidrográfica: Es una unidad de territorio donde las aguas fluyen naturalmente en un sistema interconectado y en la cual interactúan uno o varios elementos biofísicos,

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

socioeconómicos y culturales (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2003, Resolución 104, Artículo 2)

Drenaje: Extracción del agua superficial o subterránea de una zona determinada por medios naturales o artificiales (MADS, 2023).

Infiltración: Movimiento del agua o gases procedentes de la atmósfera a través del suelo (MADS, 2023).

Permiso de ocupación de cauce: Permiso otorgado por la autoridad ambiental competente, para la construcción de obras que ocupen el cauce de una corriente o depósito de agua (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, Decreto 1077, Artículo 2.2.3.2.12.1).

Rio: Corriente de agua de grandes dimensiones que sirve de canal natural en una cuenca de drenaje (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012, Resolución 955, Anexo 2)

SHIA (Simulación Hidrológica Abierta): Modelo distribuido que simula procesos hidrológicos según propiedades físicas de la cuenca y datos meteorológicos de entrada (Rendón-Álvarez et al., 2018).

Estadísticas zonales: Operaciones espaciales que permiten calcular estadísticas (media, máximo, mínimo, etc.) de un ráster sobre una unidad poligonal definida, como una cuenca, habitualmente mediante herramientas SIG (ESRI, 2021).

Introducción

El uso de modelos hidrológicos es fundamental para la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico. Sin embargo, uno de los mayores desafíos en este ámbito es la variabilidad espacio - temporal de la precipitación, ya que la forma en que se representan estos datos en los modelos puede afectar significativamente la exactitud de las simulaciones de caudal. Esto genera incertidumbre en la toma de decisiones relacionadas con la planificación de infraestructura y la gestión del agua, especialmente en los trámites de permisos ocupación de playas, cauce y lechos regulados por la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB).

Diversos estudios previos resaltaron la importancia de representar adecuadamente la distribución espacial de la precipitación en modelos hidrológicos. Investigaciones como las de Rendón-Álvarez et al.,(2018) demostraron que la resolución de los datos influye en los resultados modelados, mientras que técnicas de interpolación como Kriging e IDW han mostrado ser eficaces para capturar la variabilidad en cuencas con topografía compleja (Alzate et al., 2017). En este contexto, el presente estudio evaluó el efecto de dicha variabilidad sobre la precisión del modelo SHIA en la subcuenca del río de Oro, identificando su sensibilidad ante distintos esquemas de distribución pluviométrica.

La investigación aportó tanto a la comprensión teórica del comportamiento de los modelos ante diferentes escalas espaciales, como a la gestión práctica del recurso hídrico. Sus resultados pueden fortalecer la toma de decisiones en planificación y el diseño de infraestructura hidráulica, beneficiando a las autoridades ambientales y a las comunidades expuestas a eventos hidrometeorológicos extremos. .

1. Análisis de la variabilidad espacio - temporal de la precipitación y su impacto en la modelación hidrológica: Aplicación del modelo SHIA en la subcuenca del río de Oro.

4.2 Planteamiento del problema

La gestión eficiente del recurso hídrico y la prevención de desastres asociados a eventos hidrometeorológicos extremos requieren de herramientas de modelación hidrológica precisas, que permitan simular el comportamiento de las cuencas con un alto grado de fiabilidad. En Colombia, eventos como inundaciones y sequías han incrementado su frecuencia e intensidad en las últimas décadas, afectando no solo la seguridad hídrica, sino también el desarrollo económico y social. Según el IDEAM (2022) para el periodo comprendido entre el 2000 y 2021 se registraron un total de 13.577 eventos de inundación a nivel nacional, de estos la mayor cantidad se presentaron en el año 2011, representando un 13% del total reportado. Estas cifras evidencian la necesidad de mejorar los modelos que soportan la planificación y gestión del recurso hídrico a nivel nacional.

A nivel regional, el departamento de Santander presenta condiciones hidrológicas variables y complejas. En particular, la subcuenca del río de Oro cumple una función estratégica en el abastecimiento de agua para los municipios del Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB): Floridablanca, Girón, Bucaramanga y Piedecuesta, que concentran el 55,7% de la población departamental (DNP, 2018). No obstante, esta subcuenca ha sido objeto de crecientes presiones por expansión urbana, cambios en el uso del suelo y eventos de precipitación intensa, lo cual aumenta la vulnerabilidad del territorio ante fenómenos como inundaciones. La correcta estimación de caudales mediante modelos hidrológicos es clave para sustentar la toma de decisiones en la planificación de obras civiles, el diseño de sistemas de drenaje y, particularmente,

en la evaluación de solicitudes de ocupación de cauce por parte de la autoridad ambiental regional (CDMB).

Uno de los principales problemas en la modelación hidrológica en Colombia, y en particular en el departamento de Santander, es la baja representatividad espacial de los datos de precipitación. En la subcuenca del río de Oro, la cobertura de estaciones pluviométricas activas es limitada, lo que impide captar con precisión la heterogeneidad espacial de los eventos de lluvia. Esta limitación metodológica es especialmente evidente en los trámites relacionados con permisos de ocupación de playas, cauces y lechos, en los que, por falta de datos específicos, se recurre frecuentemente a asemejar el comportamiento hidrológico de la cuenca de interés a la estación más cercana ubicada dentro o fuera del área de drenaje evaluada, lo que introduce márgenes de error significativos en las simulaciones.

Ahora bien, a pesar de que existen modelos hidrológicos disponibles para simular el comportamiento de cuencas, su implementación en estudios técnicos de carácter regional sigue siendo limitada, o no se realiza con el nivel de detalle necesario para soportar decisiones críticas, como los trámites de ocupación de playas, cauces y lechos. En muchos casos, se recurre al uso de datos pluviométricos sin aplicar técnicas de interpolación espacial, lo cual reduce la confiabilidad de las simulaciones. Esta situación compromete la precisión de los modelos distribuidos, como el SHIA, que requieren entradas adecuadamente representadas en el espacio para ofrecer resultados útiles en términos de caudal.

1.1.1. Pregunta de investigación

La pregunta de investigación que guía este proyecto es: ¿Cómo influye la variabilidad espacio - temporal de la precipitación en la precisión de las simulaciones de caudal con el modelo

SHIA en la subcuenca del río de Oro? Esta pregunta es de gran relevancia, ya que demanda la integración de enfoques multidisciplinarios, como la hidrología, la climatología y la gestión ambiental, el análisis de datos con diversas resoluciones espaciales y la formulación de recomendaciones prácticas que contribuyan a mejorar la precisión de los modelos hidrológicos.

4.3 Justificación

Como parte de las competencias de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), la evaluación de los estudios hidrológicos para los trámites de ocupación de playas, cauces y lechos requiere información precisa sobre el comportamiento del caudal. Sin embargo, uno de los principales desafíos en la modelación hidrológica radica en la adecuada representación de la precipitación, que es el principal insumo para la generación de caudales. La variabilidad espacial de la precipitación puede no estar adecuadamente capturada si los datos se promedian a nivel de cuenca o se limitan a puntos específicos, lo que genera incertidumbre en los resultados del modelo hidrológico y, en consecuencia, en la toma de decisiones basadas en estos.

Este estudio aborda esta problemática mediante el análisis del modelo hidrológico SHIA (Simulación Hidrológica Abierta), propuesto inicialmente por Vélez Upegui (2001), evaluando cómo diferentes configuraciones de datos de precipitación (centroide geométrico y estaciones) en comparación con métodos como IDW y Kriging afectan las simulaciones del caudal en la subcuenca del río de Oro y minimizan la incertidumbre. La comparación de estos escenarios permitió identificar la sensibilidad del modelo a la escala espacial estudiada.

En este sentido, los resultados obtenidos tendrán un impacto directo en la mejora de la calidad técnica de los estudios hidrológicos presentados ante la Corporación Autónoma Regional

para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDBM), al proporcionar una base metodológica robusta y validada para sustentar trámites de ocupación de playas, cauces y lechos. Esta contribución será especialmente relevante en la toma de decisiones relacionadas con la planificación y construcción de infraestructura en el cauce del río de Oro. Adicionalmente, la metodología evaluada podrá ser replicada en otras cuencas con características hidrológicas similares, lo que amplía su aplicabilidad y utilidad en estudios técnicos a nivel regional y nacional.

4.4 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el impacto de la variabilidad espacio - temporal de la precipitación en la modelación hidrológica mediante el uso del modelo SHIA en el área de drenaje aferente a la estación limnimétrica Palogordo (Subcuenca Rio de Oro), con el propósito de optimizar la toma de decisiones en la planificación y construcción de infraestructura en el cauce.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la variabilidad espacio - temporal de la precipitación del área aferente a la estación utilizando técnicas de geoestadística para interpolar y analizar la distribución espacial.
- Simular el comportamiento del caudal en la cuenca, analizando el impacto de las configuraciones de datos de precipitación en los resultados hidrológicos, mediante la aplicación del modelo hidrológico SHIA.
- Cuantificar el impacto de la variabilidad de la precipitación en los resultados del modelo, con énfasis en la simulación de caudales, almacenamiento de agua y eventos extremos.

- Establecer recomendaciones para fortalecer la modelación hidrológica y su integración en la gestión de la subcuenca, con énfasis en el diseño de infraestructura en el cauce, considerando la variabilidad espacio - temporal de la precipitación.

2. Marco referencial

4.5 Marco teórico

El presente estudio, abordó la modelación hidrológica y su relación con la variabilidad espacial y temporal de la precipitación, utilizando el modelo SHIA (Simulación Hidrológica Abierta). A continuación, se presentan los principales conceptos y teorías que fundamentan la investigación:

2.1.1. Modelación hidrológica

La modelación hidrológica es una herramienta esencial para entender y predecir el comportamiento de los sistemas hídricos. De acuerdo con Maidment (1993), los modelos hidrológicos permiten simular procesos como la precipitación, la escorrentía, la infiltración y el almacenamiento de agua en una cuenca.

La modelación hidrológica comprende el uso de diferentes modelos, por su parte los modelos conceptuales representan los procesos hidrológicos mediante ecuaciones matemáticas fundamentadas en principios físicos como es el caso del modelo SHIA. Estas herramientas se aplican en la predicción de caudales para la gestión de embalses, el diseño de infraestructura y la prevención de inundaciones; en la evaluación de impactos ambientales ante cambios en el uso del suelo o el clima; y en la planificación eficiente del recurso hídrico, especialmente en cuencas con alta presión por la demanda.

2.1.2. Variabilidad Espacial y Temporal de la Precipitación

La precipitación es uno de los principales factores que influyen en la generación de caudales en una cuenca. Sin embargo, su variabilidad espacial y temporal presenta desafíos significativos para la modelación hidrológica. Conforme a lo propuesto por (Eregno et al., 2013), la resolución espacial de los datos de precipitación puede afectar la precisión de las simulaciones hidrológicas. Por ello, es fundamental utilizar técnicas de interpolación espacial, como Kriging y IDW (Inverse Distance Weighting), para mejorar la representación de la precipitación en el modelo.

- **Variabilidad Espacial:** La precipitación no se distribuye uniformemente en una cuenca. Factores como la topografía, la altitud, y la proximidad a cuerpos de agua influyen en su distribución.
- **Variabilidad Temporal:** La precipitación varía a lo largo del tiempo, con patrones estacionales, interanuales, y eventos extremos (lluvias intensas o sequías). Estos patrones deben ser capturados adecuadamente en los modelos hidrológicos para mejorar su precisión.

2.1.3. Técnicas de Interpolación Espacial

Las técnicas de interpolación espacial son herramientas clave para estimar valores de precipitación en zonas donde no hay estaciones meteorológicas. El método Kriging, por ejemplo, utiliza modelos de variogramas para estimar valores no medidos con mayor precisión, mientras que el IDW se basa en la distancia entre puntos conocidos y desconocidos (Rasheed et al., 2024). Estas técnicas son esenciales para mejorar la calidad de los datos de entrada en los modelos hidrológicos.

El Kriging es un método ampliamente utilizado en hidrología debido a su capacidad para capturar la variabilidad espacial de la precipitación, por su parte, el IDW (Inverse Distance Weighting) es un método más simple y rápido, pero puede ser menos preciso en áreas con alta variabilidad espacial. Sin embargo, es útil en áreas con datos dispersos y cuando se requiere una solución rápida (Rasheed et al., 2024). En el caso del Co-Kriging es útil cuando se dispone de variables auxiliares, como la altitud, que están correlacionadas con la precipitación, de esta manera permite mejorar la precisión de las estimaciones al incorporar información adicional.

2.1.4. Indicadores estadísticos en Modelos Hidrológicos

La evaluación del desempeño de los modelos hidrológicos se realiza mediante métricas estadísticas como el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), error porcentual en el balance (EB) y el coeficiente de determinación (R^2). Según Moriasi et al., (2007), estas métricas permiten cuantificar la precisión de las simulaciones y comparar diferentes configuraciones de modelos. En el caso del NSE, mide la calidad de las predicciones comparadas con los datos observados. Un valor de 1 indica un ajuste perfecto, mientras que valores cercanos a 0 indican un bajo desempeño. Por su parte, EB evalúa la diferencia relativa acumulada entre los caudales simulados y observados donde 0.0 es considerado un valor optimo (Velásquez et al., 2018). En este sentido, R^2 evalúa la correlación entre las predicciones y los datos reales. Un valor cercano a 1 indica una alta correlación (Rendón-Álvarez et al., 2018).

2.1.5. Eventos Extremos y Cambio Climático

Los eventos extremos, como inundaciones y sequías, son cada vez más frecuentes debido al cambio climático. Tal como indica el (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios

Ambientales, 2022), Colombia ha experimentado un aumento en la frecuencia e intensidad de estos eventos, lo que hace necesario mejorar la capacidad de predicción de los modelos hidrológicos.

En el caso de las inundaciones, episodios de precipitación intensa pueden generar caudales que superan la capacidad hidráulica de los cauces, provocando desbordamientos y afectaciones a infraestructura, bienes y personas. Por tanto, los modelos hidrológicos deben ser capaces de simular adecuadamente estos escenarios extremos, para servir como herramienta en la gestión del riesgo y la planificación territorial. Por otro lado, las sequías caracterizadas por periodos prolongados de déficit pluviométrico reducen la disponibilidad hídrica y afectan sectores clave como la agricultura, el abastecimiento de agua potable y la integridad de los ecosistemas. En este contexto, la modelación hidrológica debe incorporar mecanismos de sensibilidad a la disminución de precipitaciones, a fin de apoyar la formulación de estrategias de uso eficiente y planificación sostenible del recurso hídrico.

2.1.6. Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH)

La Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) es un enfoque que busca gestionar los recursos hídricos de manera sostenible, considerando aspectos sociales, económicos y ambientales. Conforme lo establece el (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010), la GIRH promueve la participación de todos los actores involucrados en la gestión del agua, incluyendo autoridades locales, comunidades, y sectores productivos.

Principios de la GIRH:

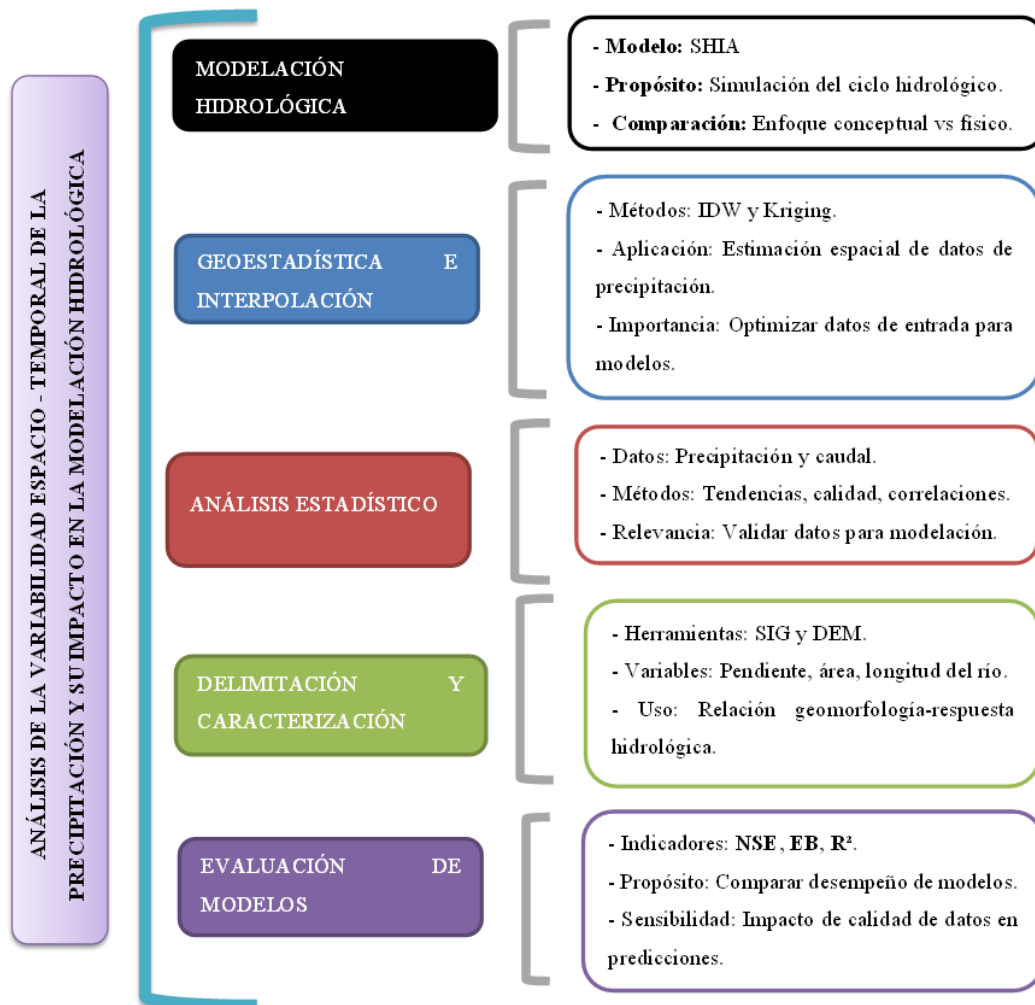
- **Sostenibilidad:** Garantizar que el uso del agua no comprometa su disponibilidad para futuras generaciones.

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

- Equidad: Asegurar que todos los usuarios tengan acceso equitativo al recurso hídrico.
- Participación: Involucrar a todos los actores en la toma de decisiones relacionadas con la gestión del agua.

El enfoque del GIRH es relevante para este estudio, ya que los resultados de la modelación hidrológica pueden apoyar la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico en la subcuenca y servir de modelo para su utilización en otros territorios.

Figura 1. Estructura grafica del marco teórico



Nota: Elaboración propia (2025).

4.6 Marco conceptual

A continuación, se presentan los conceptos principales de la investigación.

2.2.1. Subcuenca

Una subcuenca es una división de una cuenca hidrográfica que drena hacia un punto específico. La delimitación de la subcuenca se realiza utilizando herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) y modelos digitales de elevación (MDE). Las subcuencas se clasifican en alta, media y baja, dependiendo de su posición en la cuenca principal. La subcuenca alta es la zona donde se originan los principales cursos de agua, generalmente en áreas montañosas con pendientes pronunciadas. La subcuenca media es la zona intermedia donde los cursos de agua comienzan a converger, con pendientes moderadas y mayor acumulación de sedimentos. La subcuenca baja es la zona final de la cuenca, donde los cursos de agua desembocan en un cuerpo de agua principal, con pendientes suaves y mayor acumulación de sedimentos.

2.2.2. Precipitación

Es el proceso por el cual el agua cae desde la atmósfera a la superficie terrestre en forma de lluvia, nieve o granizo. Es el principal insumo para la generación de caudales en una cuenca. La precipitación puede ser de varios tipos: precipitación convectiva, causada por el calentamiento local de la superficie terrestre y común en zonas tropicales; precipitación orográfica, que ocurre cuando el aire húmedo asciende sobre una montaña, enfriándose y condensándose; y precipitación frontal, resultado del encuentro de masas de aire cálido y frío, común en zonas templadas. La variabilidad espacial y temporal de la precipitación es un factor crítico en la modelación hidrológica, ya que afecta directamente la generación de caudales y la precisión de las simulaciones.

2.2.3. Modelo SHIA

Es un sistema hidrológico distribuido que simula los procesos hidrológicos en una cuenca. Se basa en la división de la cuenca en celdas o unidades hidrológicas, lo que permite capturar la variabilidad espacial de la precipitación y otros procesos. El modelo SHIA es distribuido, lo que significa que considera la variabilidad espacial de los procesos hidrológicos, y conceptual, ya que simplifica los procesos hidrológicos en ecuaciones matemáticas. Entre los procesos que simula se encuentran la infiltración, que es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo; la escorrentía, que es el flujo de agua que se produce cuando la precipitación supera la capacidad de infiltración del suelo; y el almacenamiento, que se refiere a la acumulación de agua en el suelo, acuíferos y cuerpos de agua. La calibración del modelo es un proceso esencial para ajustar los parámetros y mejorar la concordancia entre los caudales simulados y observados.

2.2.4. Escorrentía

La escorrentía es el flujo de agua que se produce cuando la precipitación supera la capacidad de infiltración del suelo. Es un proceso clave en la generación de caudales y está influenciado por factores como la topografía, el uso del suelo y la cobertura vegetal. Existen diferentes tipos de escorrentía: la escorrentía superficial, que es el flujo de agua sobre la superficie del suelo; la escorrentía subsuperficial, que es el flujo de agua a través de las capas superficiales del suelo; y la escorrentía base, que es el flujo de agua que proviene de acuíferos y contribuye al caudal de los ríos durante periodos secos. La infiltración, por otro lado, es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo y es un factor crítico en la modelación hidrológica. La capacidad de

infiltración depende de factores como el tipo de suelo (suelos arenosos tienen mayor capacidad de infiltración que suelos arcillosos), la cobertura vegetal (la vegetación reduce la velocidad de escorrentía y aumenta la infiltración), y el uso del suelo (actividades humanas como la urbanización y la agricultura pueden reducir la capacidad de infiltración).

2.2.5. Balance hídrico

Es un concepto fundamental en hidrología que describe el equilibrio entre las entradas y salidas de agua en una cuenca. Los componentes del balance hídrico incluyen las entradas, como la precipitación y los flujos de agua subterránea; las salidas, como la evapotranspiración, la escorrentía y la infiltración; y el almacenamiento, que se refiere al agua almacenada en el suelo, acuíferos y cuerpos de agua. El balance hídrico es utilizado para validar los resultados de los modelos hidrológicos, asegurando que las entradas y salidas de agua estén correctamente representadas.

2.2.6. Uso del suelo y la cobertura vegetal

Son factores clave que influyen en los procesos hidrológicos, como la infiltración, la escorrentía y la evapotranspiración. El uso del suelo puede ser urbano, caracterizado por áreas con alta impermeabilización que reducen la infiltración y aumentan la escorrentía; agrícola, donde las prácticas agrícolas pueden aumentar o reducir la infiltración dependiendo del manejo del suelo; o forestal, con alta cobertura vegetal que aumenta la infiltración y reduce la escorrentía. Los cambios en el uso del suelo y la cobertura vegetal deben ser considerados en los modelos hidrológicos para mejorar la precisión de las simulaciones.

2.2.7. Calibración y validación

Dentro de la modelación hidrológica, se hace indispensable conocer cuál es el grado de precisión que posee desde la comparación entre los resultados arrojados por la simulación y los medidos en el fenómeno real. Dicha comparación, en la mayoría de los casos, evidencia algún grado de diferencia entre estos resultados, lo que conlleva a una reasignación o ajuste de los valores de las variables con las cuales se alimenta el modelo, seleccionando el valor óptimo de cada variable, para la reducción de la incertidumbre de la modelación. Este proceso es conocido como calibración, el cual permite el ajuste de los resultados simulados con respecto a las medidas in situ, a partir del cambio de valores de los parámetros de mayor influencia a las variables respuesta; principalmente, haciendo referencia al caudal, al ser la variable respuesta más implementada en los modelos hidrológicos para ser eje del proceso de calibración (Andrés et al., 2017, p. 129). Por su parte la validación permite comprobar la capacidad del modelo para replicar la dinámica hidrológica bajo condiciones distintas a las de calibración, lo que constituye una etapa fundamental para verificar la estabilidad del modelo frente a distintos conjuntos de datos (Andrés et al., 2017, p. 131).

2.2.8. Cauce

El cauce es la faja de terreno que ocupan las aguas de una corriente al alcanzar sus niveles máximos por efecto de las crecientes. El cauce es un elemento fundamental en la dinámica hidrológica, ya que define el espacio físico por donde circula el agua durante eventos de precipitación intensa. La morfología del cauce, incluyendo su ancho, profundidad y pendiente, influye directamente en la capacidad de transporte de agua y sedimentos.

2.2.9. Caudal

Es la cantidad de agua que circula por el cauce en una unidad de tiempo, generalmente expresado en metros cúbicos por segundo (m^3/s). El caudal es una variable clave en la hidrología, ya que representa la respuesta integrada de la cuenca a los procesos de precipitación, infiltración, escorrentía y almacenamiento. La medición del caudal es esencial para la calibración y validación de modelos hidrológicos, ya que permite comparar los caudales simulados con los observados en estaciones limnimétricas.

2.2.10. Ocupación del cauce

Permiso otorgado por la autoridad ambiental competente, para la construcción de obras que ocupen el cauce de una corriente o depósito de agua. La ocupación del cauce puede incluir la construcción de infraestructuras como puentes, diques, presas y otras obras que modifican el flujo natural del agua.

2.2.11. Obras hidráulicas

Las obras hidráulicas son las diversas estructuras construidas con el objeto de manejar el agua, cualquiera que sea su origen, con fines de aprovechamiento o de defensa. Estas obras incluyen presas, embalses, canales, diques, sistemas de drenaje y otras infraestructuras diseñadas para controlar el flujo de agua, almacenarla, o proteger áreas vulnerables de inundaciones.

2.2.12. Modelos Digitales de Elevación (MDE)

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) surgieron en la década de 1950, cuando investigadores del MIT los definieron como representaciones estadísticas de la superficie terrestre basadas en puntos con coordenadas conocidas (Miller, 1958). Entre las fuentes actuales para obtener MDE de alta resolución, destacan los datos SAR del sensor ALOS PALSAR, que ofrecen

resoluciones de 12.5 y 30 m, cobertura global y capacidad multitemporal, aunque su archivo histórico se limita al periodo 2006–2011.

2.2.13. Curva hipsométrica

Según lo establece Racca (2007) la curva hipsométrica es una herramienta gráfica utilizada en la geomorfometría para representar la relación entre la altitud y el área acumulada de una cuenca hidrográfica. Esta curva permite analizar la distribución del relieve y evaluar el estado evolutivo de la cuenca, así como su potencial erosivo o de sedimentación

4.7 Estado del arte

El estudio de los procesos hidro-sedimentológicos en cuencas ha cobrado relevancia debido a su impacto en la degradación del suelo y la gestión de recursos hídricos. A nivel global, se han desarrollado diversos modelos empíricos y físicos, como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y sus variantes, para estimar la erosión y transporte de sedimentos. Sin embargo, la mayoría de estos estudios se han centrado en regiones extra -tropicales, con climas y condiciones topográficas diferentes a las de las cuencas andinas. En Colombia, la falta de consenso sobre las escalas espaciales y temporales adecuadas para modelar estos procesos ha generado incertidumbre en los resultados. Este trabajo busca contribuir al estudio de la influencia de estas escalas en la modelación de una cuenca. Considerando lo anterior, se exponen las investigaciones revisadas que fundamentan el desarrollo del presente documento.

2.3.1. Vélez Upegui (2001): Desarrollo del Modelo SHIA

Vélez Upegui, (2001) desarrolló el modelo SHIA, un modelo distribuido que permite simular procesos hidrológicos en cuencas con datos limitados. Este estudio demostró la

aplicabilidad del modelo SHIA en cuencas de pequeña y mediana escala, destacando su capacidad para capturar la variabilidad espacial de la precipitación y otros procesos hidrológicos.

2.3.2. Chen et al., (2017) : Pronóstico de inundaciones en grandes cuencas hidrográficas con un modelo hidrológico distribuido de alta resolución

(Chen et al., 2017) investigaron cómo la resolución espacial de los datos de precipitación afecta la precisión de las simulaciones hidrológicas en diferentes zonas climáticas. Los autores encontraron que la precisión de los modelos hidrológicos mejora significativamente cuando se utilizan datos de precipitación con mayor resolución espacial, especialmente en cuencas con topografía compleja. Este estudio es relevante para la presente investigación, ya que resalta la importancia de utilizar técnicas de interpolación espacial para mejorar la representación de la precipitación en los modelos. Además, los autores demostraron que la interpolación basada en métodos geoestadísticos, como el Kriging, es más efectiva en áreas con alta variabilidad espacial.

2.3.3. Rendón-Álvarez et al., (2018) Una estrategia para la calibración y el análisis de sensibilidad del modelo hidrológico SHIA en escala intradiaria. XXIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología

Rendón-Álvarez et al., (2018) proponen una estrategia metodológica innovadora para la calibración y análisis de sensibilidad del modelo hidrológico SHIA, adaptado para simulaciones a escala intradiaria. Esta estrategia estructura el proceso de calibración en etapas que priorizan parámetros asociados a respuestas lentas y luego rápidas, empleando un algoritmo metaheurístico supervisado. Los resultados muestran una mejora en los indicadores de eficiencia, ajuste a la curva de duración de caudales y reducción del tiempo requerido en comparación con enfoques tradicionales. También se destaca la integración del modelo con esquemas detallados de

discretización espacial, balance hídrico, y estimaciones óptimas de precipitación mediante cokriging.

2.3.4. Li y Heap (2014): Técnicas de Interpolación Espacial

Li & Heap, (2014) realizaron una revisión exhaustiva de los métodos de interpolación espacial utilizados en ciencias ambientales, incluyendo el Kriging, IDW (Inverse Distance Weighting), y Co-Kriging. Los autores destacaron que el Kriging es particularmente útil en áreas con alta variabilidad espacial, como las cuencas montañosas, debido a su capacidad para capturar patrones complejos de precipitación. Este estudio es fundamental para la presente investigación, ya que proporciona una base teórica para la selección de técnicas de interpolación. Además, los autores resaltaron que la elección del método de interpolación debe basarse en las características específicas de la cuenca y la disponibilidad de datos.

2.3.5. Moriasi et al. (2007): Evaluación del Desempeño de Modelos Hidrológicos

Moriasi et al., (2007b) propusieron directrices para la evaluación sistemática de la precisión de los modelos hidrológicos, utilizando métricas como el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), el error cuadrático medio (RMSE), y el coeficiente de determinación (R^2). Este estudio es relevante para la presente investigación, ya que proporciona un marco metodológico para evaluar el desempeño del modelo SHIA en la subcuenca del río de Oro.

2.3.6. Xia et al. (2020): Ciclo hidrológico y recursos hídricos en un mundo cambiante: una revisión

Yang et al., (2021) investigaron cómo la calidad de los datos de entrada afecta el desempeño de los modelos hidrológicos, utilizando el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Los autores encontraron que la precisión de las simulaciones hidrológicas depende en gran

medida de la calidad y resolución de los datos de precipitación. Este estudio resalta la importancia de utilizar datos de alta calidad y técnicas de interpolación para mejorar la precisión de los modelos. Además, los autores demostraron que la falta de datos precisos puede llevar a errores significativos en las simulaciones, especialmente en cuencas con alta variabilidad espacial.

2.3.7. IDEAM (2022): Estudio Nacional del Agua

El (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, 2022), publicó el Estudio Nacional del Agua que proporciona información detallada sobre la disponibilidad y calidad del agua en Colombia. Este estudio incluye un análisis de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en diferentes regiones del país, lo que es relevante para la presente investigación, ya que proporciona datos de referencia para la subcuenca del río de Oro. Además, el estudio destaca la importancia de utilizar datos de alta resolución para mejorar la precisión de los modelos hidrológicos en el contexto colombiano.

2.3.8. Zapata Atchortúa, E. (2016): Análisis de la capacidad de simulación hidrológica del modelo distribuido SHIA ante la caracterización por tramos de la geometría hidráulica del cauce.

Zapata Atehortua, (2016), buscó mejorar el componente hidráulico del modelo hidrológico SHIA mediante la caracterización de tramos de cauces y la simulación de flujos hiperconcentrados, como los flujos de escombros. Se propusieron dos versiones del modelo: una distribuida por celdas y otra por laderas, aplicadas en las cuencas de Río Grande y La Liboriana en Antioquia, Colombia. Las principales conclusiones incluyen la validación de las metodologías propuestas para la

estimación de resistencia al flujo, condiciones fuera de la banca llena y modelación de flujos de escombros, destacando la importancia de la no linealidad en las variables hidráulicas y la necesidad de considerar la geometría hidráulica en la simulación hidrológica.

2.3.9. (Patricia & Jiménez, 2020): Efectos de escala espacial y temporal en la modelación hidro-sedimentológica distribuida de una cuenca tropical. Caso de estudio San Lorenzo

El proyecto analizó los efectos de la escala espacial y temporal en la modelación hidro-sedimentológica de la cuenca del río Nare, afluente del embalse San Lorenzo en Colombia. Se utilizaron los modelos RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) y CASC2D-SED para evaluar la erosión, transporte y deposición de sedimentos en una cuenca tropical. Los resultados mostraron que las escalas espaciales finas (menores a 100 m) son esenciales para identificar zonas de alta producción de sedimentos, mientras que las escalas temporales finas (horarias) permiten capturar con mayor precisión los picos de caudal sólido durante eventos de tormenta, identificando caudales 10% mayores que en escalas más gruesas. Además, se evidenció que la selección de la escala adecuada depende del objetivo del análisis: escalas espaciales finas son ideales para identificar zonas de erosión, mientras que escalas temporales gruesas son necesarias para modelar el transporte de sedimentos en puntos específicos. Estos hallazgos son relevantes para la gestión de recursos hídricos y la planificación de infraestructuras en cuencas tropicales, especialmente para empresas de generación eléctrica (Patricia & Jiménez, 2020).

2.3.10. Barrios Peña, M. I. (2011): Estudio del efecto de escala espacial en un modelo hidrológico distribuido

Barrios Peña, (2011) investigó el efecto de la escala espacial en modelos hidrológicos distribuidos, centrándose en cómo la heterogeneidad de parámetros del suelo influye en la agregación de procesos desde la microescala a la mesoescala. Utilizó el modelo TETIS y experimentos sintéticos con campos de parámetros correlacionados espacialmente para analizar la relación entre el tamaño de celda óptimo y el concepto de área elemental representativa (REA). Además, desarrolló ecuaciones de escalado no estacionarias para transferir información de la microescala a la mesoescala, validándolas en la cuenca experimental Goodwin Creek (EE. UU.). Los resultados mostraron que la varianza de parámetros efectivos disminuye al aumentar la relación/tamaño de celda/longitud de correlación, identificando REA como clave para reducir incertidumbres. La aplicación en Goodwin Creek evidenció mejoras en la eficiencia del modelo al incorporar variabilidad subcelda, especialmente en eventos de baja precipitación y subcuencas pequeñas. Se concluyó que los parámetros no estacionarios mejoran la representación hidrológica y que la longitud de correlación espacial es determinante para definir escalas óptimas.

4.8 Marco legal

La normativa referente a la modelación hidrológica en Colombia es muy escasa, la modelación es abordada con mayor precisión en algunas guías técnicas del ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), el Instituto Nacional de vías (INVIAS) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). A continuación, se presentan las normas más relevantes para el presente estudio:

2.1.1. Construcción de obras hidráulicas

Decreto 1076 de 2015: en su artículo 2.2.3.2.2.12.1 resalta que: “La construcción de obras que ocupen el cauce de una corriente o depósito de agua requiere autorización, que se otorgara en

las condiciones que establezca la Autoridad Ambiental Competente. Igualmente se requerirá permiso cuando se trate de la ocupación permanente o transitoria de playas”.

Decreto 2811 de 1974: establece en su artículo 102 que “Quien pretenda construir obras que ocupen el cauce de una corriente o depósito de agua, deberá solicita autorización.

2.1.2. Modelación Hidrológica

Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico para aguas Superficiales Continentales – MADS (2018): Integra los resultados de modelación hidrológica con la estimación de caudales a partir de series de precipitación en la modelación de calidad de agua.

Protocolo de Modelación Hidrológica e Hidráulica – IDEAM (2018): Presenta aspectos conceptuales aplicación y consideraciones técnicas que se deben tener en cuenta en el desarrollo de modelos hidrológicos hidráulicos.

Resoluciones 751 y 958 de 2018: Mediante las cuales se adopta y se incorpora la Guía Técnica para la Formulación de Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico Continental Superficial (PORH).

Guía para el Ordenamiento del Recurso Hídrico Continental Superficial – MADS (2018): contiene los lineamientos básicos con los que las autoridades ambientales competentes llegarán a consolidar la propuesta programática y el plan de monitoreo y seguimiento con horizonte mínimo de diez años a lo largo de los cuales se buscará mejorar la disponibilidad y la calidad del recurso, de igual forma, propone el uso de modelos de calidad de agua e hidrológicos a una escala regional

Resolución 00024 del 07 de enero de 2011 (Ministerio de Transporte): Por la cual se adopta el Manual de Drenaje para Carreteras.

Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico - MADS (2010): establece los objetivos, estrategias, metas, indicadores y líneas de acción para el manejo del agua en Colombia, con el objetivo de garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico

Manual de Drenaje para Carreteras – INVIAS (2009): Contempla una metodología para la construcción de diferentes obras de drenajes y subdrenaje en las carreteras nacionales, de igual forma, permite la selección de los parámetros hidrológicos e hidráulicos a emplearse en el diseño de obras de control, protección y mantenimiento de vías.

2.1.3. Delimitación de rondas y áreas de protección

Decreto 2245 de 2017 y Resolución 957 de 2018: Establecen los lineamientos técnicos para el acotamiento de rondas hídricas y la protección de zonas ribereñas. Incluyen metodologías de modelación y análisis morfométrico para determinar zonas de conservación.

2.4.4. Normativa sobre Cambio Climático y Eventos Extremos

Ley 1931 de 2018: Obliga la incorporación de escenarios de cambio climático en la modelación hidrológica, promoviendo la adaptación y mitigación de sus impactos en la gestión del agua. Establece lineamientos para la gestión de riesgos climáticos.

3. Método

El enfoque metodológico adoptado fue de tipo cuantitativo-explicativo, orientado a evaluar cómo distintas escalas espaciales de precipitación afectan las simulaciones hidrológicas realizadas con el modelo SHIA. Se aplicaron técnicas de modelación, análisis geoespacial y estadística, lo cual permitió identificar relaciones entre la variabilidad espacial de la precipitación y la precisión

del modelo en términos de caudal simulado para el periodo 2002 a 2019. Para ello, se utilizaron métricas de desempeño como coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), error porcentual en el balance (EB) y el coeficiente de determinación (R^2), apoyados por herramientas como QGIS, ArcGIS y Python.

El diseño metodológico incluyó una fase práctica orientada a generar resultados replicables y aplicables a otras cuencas. Se emplearon métodos de interpolación espacial (Kriging e IDW) para mejorar la representación de la precipitación en áreas con baja densidad de estaciones. La calibración y validación del modelo se realizaron con registros observados en la estación limnimétrica Palogordo, permitiendo construir simulaciones hidrológicas realistas bajo distintas configuraciones de entrada. Este enfoque aportó un marco técnico replicable que fortalece la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico y en la evaluación de trámites ambientales en especial los permisos de ocupación de lechos, cauces y playas, en línea con los criterios establecidos por entidades como la CDMB.

4.9 Diseño de la investigación

3.1.1. Caracterización del Área de Estudio

Se inició con la descarga del Modelo Digital de Elevación (MDE) ALOS PALSAR desde la plataforma NASA Data Search Vertex¹. Dicho modelo, corregido en ArcGIS Pro mediante la herramienta Fill del módulo Spatial Analyst Tools, fue la base para generar los mapas de dirección y acumulación de flujo, que a su vez permitieron delimitar la cuenca vertiente hacia la estación

¹[https://search.asf.alaska.edu/#/?dataset=ALOS&zoom=8.933¢er=73.516,6.228&polygon=POLYGON\(\(73.0824%206.9885,-73.0433%206.9885,-73.0433%207.0134,-73.0824%207.0134,73.0824%206.9885\)\)&resultsLoaded=true&granule=ALPSRP268850120-KMZ](https://search.asf.alaska.edu/#/?dataset=ALOS&zoom=8.933¢er=73.516,6.228&polygon=POLYGON((73.0824%206.9885,-73.0433%206.9885,-73.0433%207.0134,-73.0824%207.0134,73.0824%206.9885))&resultsLoaded=true&granule=ALPSRP268850120-KMZ)

limnimétrica Palogordo. A partir de estos datos, se calculó la red de drenaje utilizando el método de Strahler², se segmentaron los cauces principales y se definieron las cuencas de captación mediante las herramientas Basin y Watershed. También se derivaron indicadores morfométricos y se delimitó un buffer de 25 km alrededor del perímetro de la cuenca, lo que permitió identificar estaciones meteorológicas activas con mejor cobertura y calidad de datos.

3.1.2. Recopilación y Validación de Datos

Se recopilaron series históricas de precipitación y caudal de estaciones seleccionadas a partir del sistema DHIME del IDEAM. Los registros incompletos fueron tratados mediante un algoritmo de interpolación desarrollado en Python y ejecutado en Google Colab, aplicando el método Inverse Distance Weighting (IDW) con un parámetro de potencia $\beta = 2$. Adicionalmente, se obtuvieron y procesaron coberturas de uso y cobertura del suelo mediante la plataforma Land Cover Explorer (ESRI) y características edáficas desde SoilGrids (ISRIC), estandarizando los tipos de suelo conforme al sistema textural USDA.

3.1.3. Procesamiento de Datos de Precipitación

El procesamiento de los datos de precipitación se realizó a partir de registros diarios para el período 2002–2019, aplicando técnicas de interpolación espacial tanto determinísticas (IDW) como geoestadísticas (Kriging). En un entorno SIG (ArcGIS Pro), se prepararon las capas de estaciones y sus valores diarios, y se generaron rásteres interpolados por cada día. Para optimizar

² Este método se asigna de 1 a todos los arroyos sin afluentes, conocidos como arroyos de primer orden cuando dos arroyos del mismo orden interceptan, su clasificación aumenta; así el arroyo que se forma por unión de dos afluentes de primer orden será un arroyo de segundo orden, la intersección de dos arroyos de Segundo orden creará un arroyo de tercer orden, y así sucesivamente.

el proceso, se desarrolló un algoritmo en lenguaje Python y se ejecutó en Google Colab, lo que permitió automatizar la interpolación y el cálculo estadístico mediante la herramienta Zonal Statistics. Esta automatización facilitó la generación eficiente de 6.574 mapas diarios de precipitación y el cálculo de valores mínimos, máximos y medios por día sobre la cuenca para cada una de las configuraciones de entrada, consolidando una base de datos lista para su integración al modelo hidrológico SHIA.

3.1.4. Configuración y Calibración del Modelo Hidrológico SHIA

En esta etapa, se integraron al modelo variables climáticas provenientes de la plataforma NASA POWER, incluyendo la temperatura media diaria y la radiación solar global, además de la precipitación de referencia anual multianual, estimada mediante interpolaciones espaciales (IDW y Kriging) aplicadas a registros históricos del período 2002–2019. El modelo SHIA fue configurado incorporando parámetros morfométricos extraídos del análisis espacial, así como información climática previamente procesada.

La calibración del modelo se llevó a cabo con registros observados de caudal correspondientes a la estación Palogordo, comprendidos entre el 1 de enero de 2002 y el 31 de diciembre de 2012 con diferentes configuraciones de entrada de datos de precipitación, para ello, se aplicó el algoritmo iterativo de optimización Montecarlo, incluido por defecto en la estructura del modelo lo que permitió ajustar parámetros sensibles y mejorar la correspondencia entre los caudales observados y simulados. Posteriormente, la validación se realizó para el período comprendido entre el 01 de enero de 2015 y el 31 de diciembre de 2019. En concordancia con lo anterior, tanto en la etapa de calibración como de validación se utilizaron como métricas de

desempeño el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y el error porcentual en el balance (EB), los cuales evidenciaron la capacidad del modelo para representar adecuadamente la dinámica hidrológica de la cuenca.

3.1.5. Simulación de Escenarios Hidrológicos

Posterior a la calibración y validación del modelo, se implementaron cuatro escenarios de entrada de precipitación: (I) interpolación mediante IDW siguiendo los criterios propuestos por (Velásquez et al., 2018) mediante un análisis automatizado desarrollado en Python, se evaluó el desempeño del modelo frente a los diferentes valores de β (0.5, 1.3, 2.0, 3.5 y 5.0), (II) interpolación geoestadística mediante Kriging ordinario con semivariograma gaussian, (III) uso del valor interpolado en el centroide geométrico de la cuenca, y (IV) asignación de valores medidos por una estación representativa para las zonas alta (Estación 3), media (Estación 1) y baja (Estación 2) de la cuenca. Los escenarios fueron evaluados bajo una misma estructura de calibración para permitir su comparabilidad. En esta etapa, se incluyó el coeficiente de determinación (R^2), además de los indicadores estadísticos propios del modelo (NSE, EB) con el fin de analizar su sensibilidad frente a la variabilidad espacial de la precipitación. Este análisis se complementó con representaciones gráficas como las curvas de duración y los hidrogramas simulados

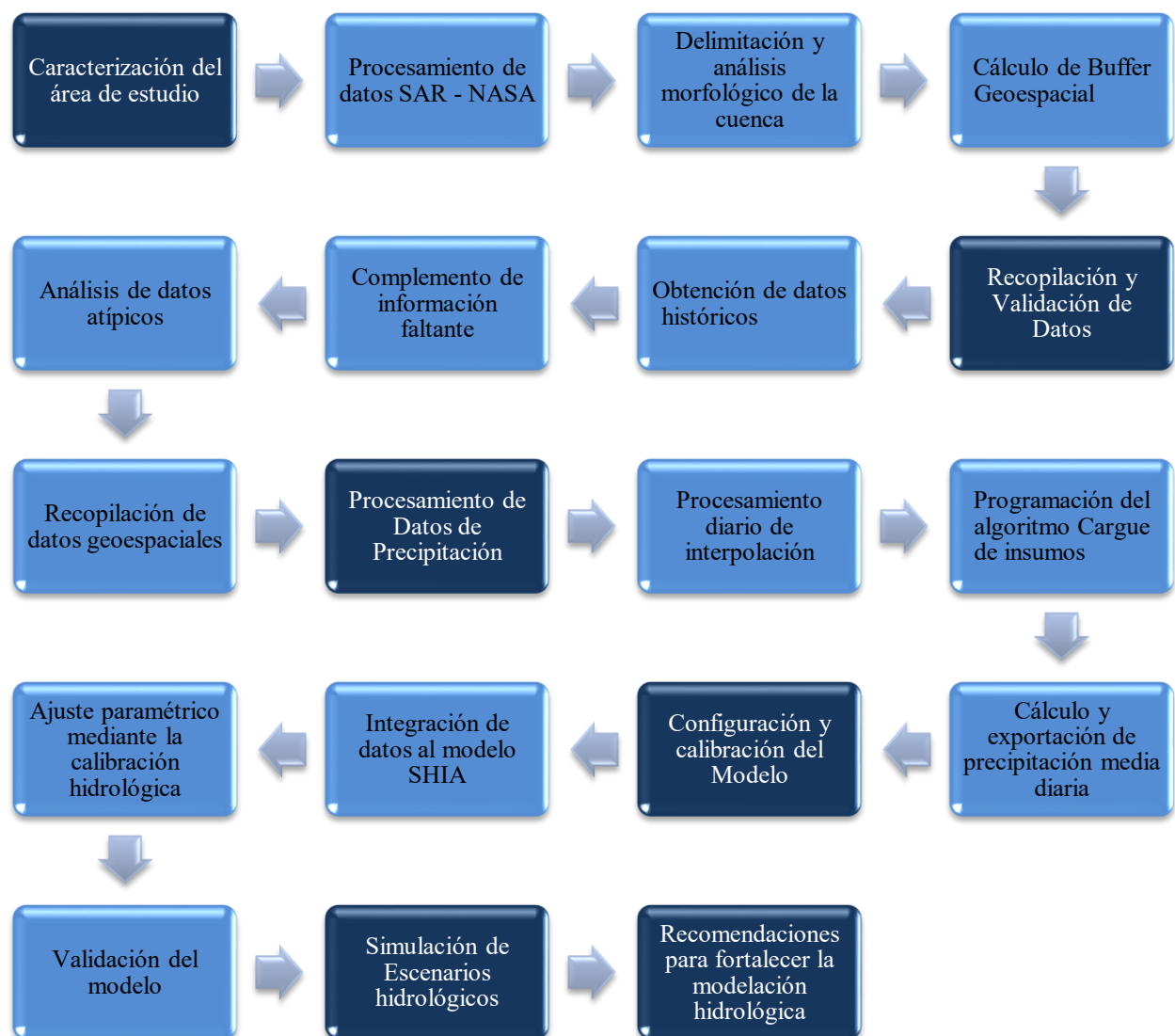
3.1.6. Recomendación para fortalecer la modelación hidrológica

Esta etapa metodológica tuvo como propósito derivar recomendaciones técnicas a partir de los resultados del modelo y los escenarios simulados. Se enfocó en identificar mejoras en la representación espacial de la precipitación, el uso de indicadores de validación y la escala de aplicación del modelo, con el fin de fortalecer su uso en la evaluación de proyectos hidráulicos. Las recomendaciones se orientan principalmente a guiar a las autoridades ambientales en la

evaluación técnica de estudios presentados para los tramites de ocupación de playas, cauces y lechos.

En conjunto, el diseño metodológico adoptado integró herramientas de análisis espacial, programación automatizada, y evaluación estadística para asegurar la representatividad de los resultados hidrológicos obtenidos. En concordancia con lo anterior, la **Figura 2** presenta de forma secuencial las etapas implementadas.

Figura 2. Proceso metodológico



Nota: Elaboración propia (2025).

4. Resultados

El análisis de la variabilidad espacio - temporal de la precipitación en el contexto de la modelación hidrológica se aplicó a la cuenca delimitada por la estación limnigráfica Palogordo del IDEAM, ubicada sobre el cauce del río de Oro, en jurisdicción del municipio de Girón, perteneciente al Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB), en la zona nororiental del departamento de Santander. Hidrográficamente, el área de estudio se localiza en la cuenca Alta del río Lebrija, subcuenca río de Oro, y se superpone parcialmente en las microcuencas Oro Alto y Oro Medio.

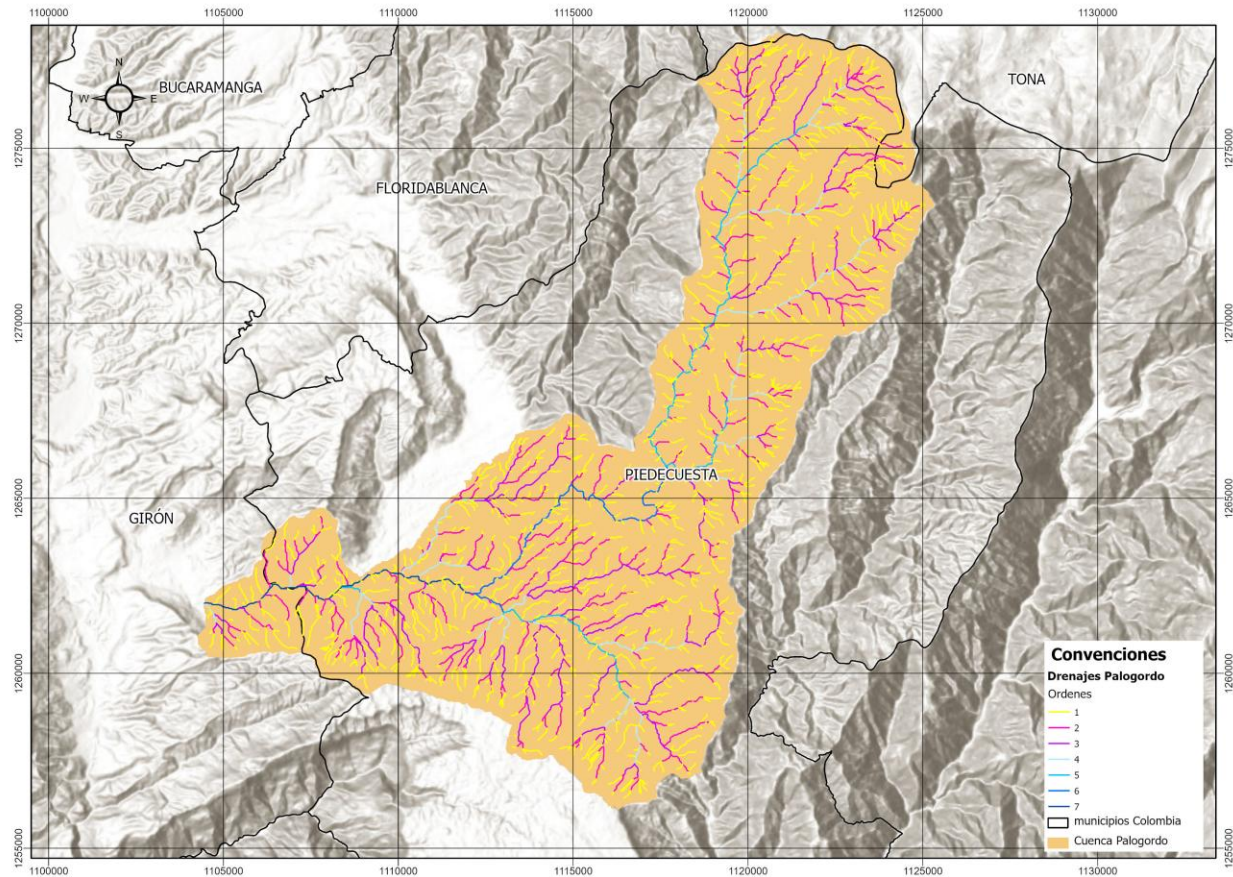
4.10 Caracterización del área de estudio

4.1.1. *Procesamiento de datos SAR - NASA*

A partir de la escena ALPSRP262140120 descargada desde la plataforma Data Search Vertex, se delimitó el área aferente estación limnigráfica Palogordo. El área delimitada abarca parcialmente los municipios de Tona, Girón y Piedecuesta, siendo este último el que concentra la mayor proporción del área de drenaje, incluyendo la totalidad de su perímetro urbano.

Del procesamiento del Modelo Digital del Terreno (MDT) se derivó la jerarquía de la red de drenaje, identificando un total de siete (7) órdenes según la clasificación de Strahler. En este sistema, los cauces de primer orden corresponden a tributarios sin afluentes, mientras que el cauce principal del río de Oro fue clasificado como de séptimo orden, reflejando su mayor capacidad de acumulación y conectividad hídrica dentro de la red hídrica (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Figura 3. Cuenca de drenaje Palogordo



Nota: Procesado en ARCGIS PRO -ESRI

4.1.1.1. Parámetros morfométricos de la cuenca

La morfometría se refiere al análisis cuantitativo de las características geométricas de una cuenca, tales como su forma, relieve y red de drenaje. Entre los parámetros morfométricos comúnmente analizados se encuentran el área de la cuenca, la longitud y pendiente del cauce principal, la densidad de drenaje, el coeficiente de compacidad y la curva hipsométrica, los cuales son esenciales para la planificación y gestión sostenible de los recursos hídricos (Cardona, 2020).

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

Teniendo en cuenta lo anterior, la **Tabla 1. *Parámetros morfométricos de la cuenca Palogordo***1 compila los parámetros morfométricos calculados para la cuenca Palogordo.

Tabla 1. *Parámetros morfométricos de la cuenca Palogordo*

Parámetro	Unidades	Detalle
Generales	km ²	✓ Área de la cuenca
	km	✓ Perímetro
	msnm	✓ Desnivel altitudinal
	m	✓ Centroide: X,Y,Z
Forma	Adimensional	✓ Índice de Compacidad (Gravelius)
	msnm	✓ Curva hipsométrica
Relieve	msnm	✓ Altitud media
	Grados (°)	✓ Pendiente promedio de la cuenca
	Grados (°)	✓ Pendiente promedio de la red hídrica
	Grados (°)	✓ Pendiente promedio del cauce principal
Red hídrica	km	✓ Longitud del cauce principal
	km	✓ Orden de la red hídrica
	km	✓ Longitud de cada orden de la red hídrica
	Adimensional	✓ Longitud de la red hídrica
		✓ Densidad de drenajes

Nota: Elaboración propia (2025).

Parámetros generales

Los parámetros generales constituyen los elementos básicos para caracterizar el comportamiento hidrológico de una cuenca, proporcionando una primera aproximación sobre su

dinámica física. De esta manera, la **Tabla 2** presenta los valores obtenidos para los parámetros generales de la cuenca Palogordo.

Tabla 2. *Parámetros generales de la cuenca*

Parámetro	Unidades	Valor
Área	km ²	162,195
Perímetro	km	103,980
Desnivel Altitudinal	msnm	2739
Cota máxima	msnm	3597
Cota mínima	msnm	858
Centroide X	m	1116685,68
Centroide Y	m	1266021,35

Nota: Elaboración propia (2025)

Parámetros de Forma

La forma de una cuenca es una característica importante pues se relaciona con el tiempo de concentración (TC), el cual es el tiempo necesario desde el inicio de la precipitación para que toda la cuenca contribuya al cauce principal en estudio. Es decir, el tiempo que tarda el agua precipitada en los límites más extremos de la cuenca en llegar al punto de salida de esta.

El índice de compacidad Gravelius (Cg) se utiliza para estimar la relación entre el ancho promedio del área de captación y la longitud de la cuenca (longitud que abarca desde la salida hasta el punto topográficamente más alejado de ésta) ya que relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de una cuenca teórica circular de igual área. A continuación, se presenta la aplicación de la fórmula del índice de Gravelius a la cuenca Palogordo:

$$C_g = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = \frac{103,980}{2\sqrt{\pi \cdot 162,195}} = 2,30$$

De acuerdo con Hussain et al., (2018) un valor de C_g igual a uno (1) indica una cuenca perfectamente circular, mientras que valores circulares reflejan formas más alargadas o irregulares. De esta manera, para el caso de la cuenca Palogordo, el valor de C_g sugiere que la cuenca presenta una forma moderadamente alargada, lo cual puede influir en la respuesta hidrológica, como un mayor tiempo de concentración y una menor propensión a inundaciones repentinas.

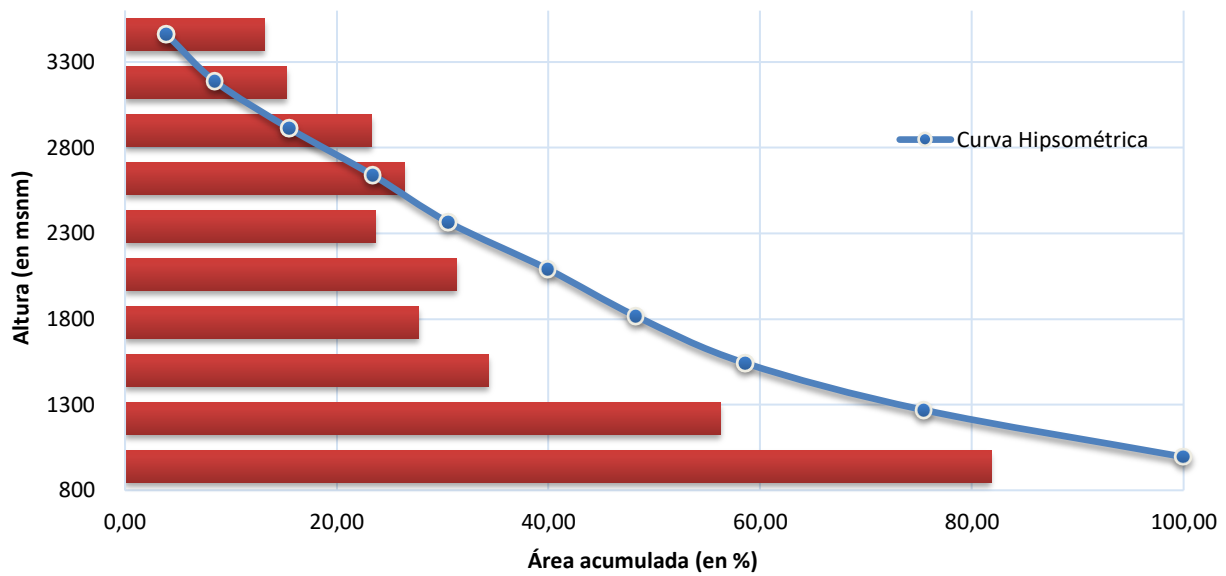
Parámetros de Relieve

Estos parámetros son de gran importancia puesto que el relieve de una cuenca tiene más influencia sobre la respuesta hidrológica que su forma. Con carácter general podemos decir que a mayor relieve (o pendiente), la generación de escorrentía se produce en lapsos de tiempo menores.

Curva hipsométrica: la cuenca Palogordo presenta un rango altitudinal que oscila entre una cota máxima de 3.597 metros sobre el nivel del mar (msnm) y una cota mínima de 858 msnm. En concordancia con lo anterior, el **Gráfico 1** presenta la relación entre la curva hipsométrica y la frecuencia de altitudes en la cuenca de estudio con una altura de intervalo de 273.9.

Gráfico 1. *Curva Hipsométrica y frecuencia de altitudes*

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN



Nota: Elaboración propia (2025).

La morfología cóncava observada en la curva hipsométrica de la cuenca Palogordo sugiere un sistema hidrológico en estado de madurez, caracterizado por un relieve suavizado como resultado de procesos prolongados de erosión, lo que implica una mayor estabilidad topográfica y menor susceptibilidad a procesos erosivos intensos (Gelvez, 2018). A partir del análisis de dicha curva, se estimó una altitud promedio de 2.227,50 msnm, valor representativo de las condiciones altitudinales predominantes en la cuenca.

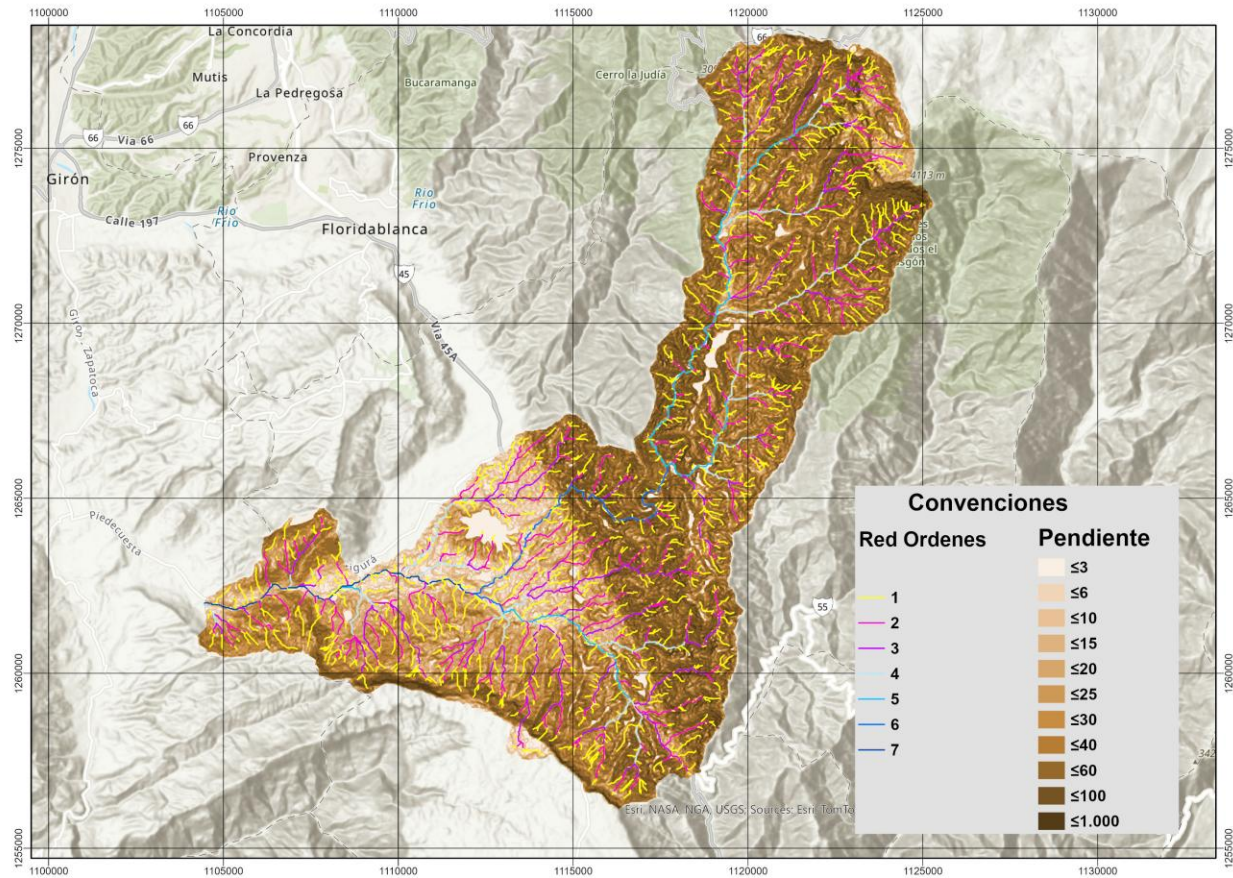
Pendiente promedio de la cuenca y red hídrica: En el caso de la cuenca Palogordo, la pendiente media calculada fue de 38,02 %, lo que indica un relieve abrupto característico de zonas montañosas. Este valor es representativo de una alta energía potencial del flujo superficial, lo cual influye directamente en la velocidad de escurrimiento, la capacidad erosiva del agua y el tiempo de concentración de la cuenca, aspectos clave en la dinámica hidrológica (Materano, 2015). Asimismo, la pendiente promedio de la red hídrica fue estimada en 22,63 %, reflejando una red de

drenaje empinada que favorece flujos concentrados y de rápida respuesta ante eventos de precipitación intensa (Materano, 2015). Ahora bien, la

Figura 4. *Mapa de pendiente cuenca Palogordo*

presenta el ráster de pendientes calculado a partir del MDT corregido. Haga clic o pulse aquí para escribir texto.

Figura 4. Mapa de pendiente cuenca Palogordo



Nota: Procesado en ARCGIS PRO -ESRI

Parámetros de red hídrica

Entre los parámetros generales de la red hídrica analizados se destacan la longitud del cauce principal, longitud de cada orden de la red hídrica y densidad de drenajes. De los siete (7) órdenes identificados la mayor longitud acumulada corresponde a los cauces de primer y segundo orden (304,56 km y 147,03 km, respectivamente), lo que indica una red densa de tributarios menores que alimentan progresivamente los cauces de orden superior. La longitud total de la red hídrica alcanzó los 606,87 km.

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

La densidad de drenaje, calculada en 3,74 km/km², sugiere una red bien desarrollada, con alto potencial de generación de escorrentía superficial. Por su parte, la densidad de corrientes, con un valor de 16,82, indica una fragmentación significativa del flujo, asociada a una red hidrológica activa en condiciones de pendiente elevada (Zambrano et al., 2011). En concordancia con lo anterior, la **Tabla 3** compila los parámetros de la red hídrica previamente descritos.

Tabla 3. *Parámetros de red hídrica cuenca Palogordo*

Parámetros	Unidad	Valor
Longitud orden 1	km	304,56
Longitud orden 2	km	147,03
Longitud orden 3	km	73,56
Longitud orden 4	km	37,89
Longitud orden 5	km	23,12
Longitud orden 6	km	11,47
Longitud orden 7	km	9,25
Longitud red hídrica	km	606,87
Densidad de drenaje	km/km ²	3,74
Densidad de corrientes		16,82

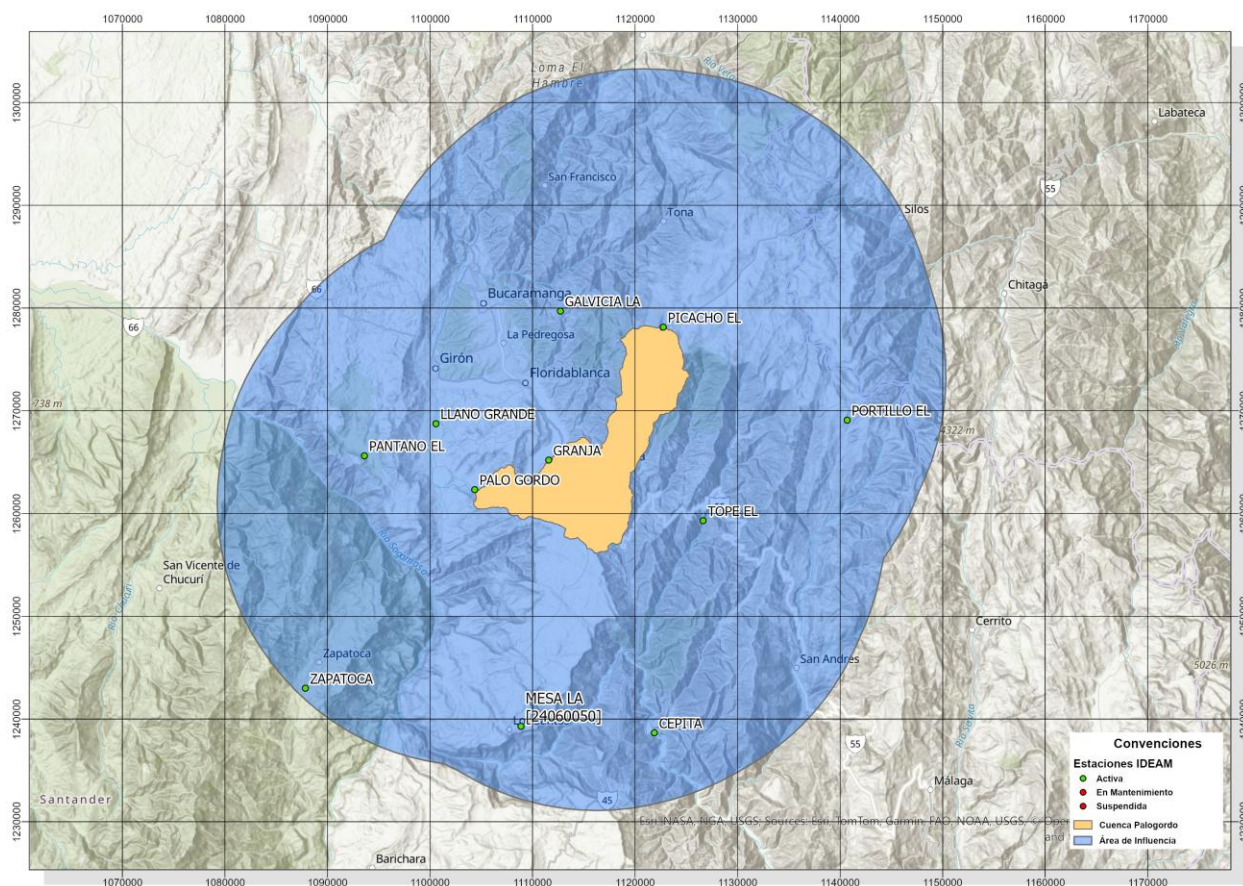
Nota: Elaboración propia (2025).

4.1.2. Cálculo de Buffer Geoespacial

El caso del Buffer geoespacial corresponde a una de las actividades claves en la identificación de estaciones pluviométricas y pluviográficas del IDEAM. Para ello se generó un área de influencia de 25 km alrededor del perímetro de la cuenca (ver **Figura 5**). Esta zona de análisis fue cruzada con la capa vectorial, correspondiente al Catálogo Nacional de Estaciones del

IDEAM, obtenida desde la plataforma Datos Abiertos Colombia³, lo que permitió identificar las estaciones activas, en mantenimiento y/o suspendidas dentro del área de influencia definida.

Figura 5. Área de influencia de la cuenca Palogordo



Nota: Procesado en ARCGIS PRO -ESRI

Conforme a lo representado en la **Figura 5** se identificaron un total de once (11) estaciones pluviométricas y pluviográficas activas en el área de influencia definida para la cuenca Palogordo. La selección de estas estaciones se realizó con base en criterios de representatividad espacial y

³ https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Cat-logo-Nacional-de-Estaciones-del-IDEAM/hp9r-jxu/about_data

consistencia de las series de precipitación correspondientes al periodo 2002–2019, el cual abarca un total de 18 años. Teniendo en cuenta lo anterior, la

Tabla 4 compila los datos específicos de cada una de las estaciones seleccionadas.

Tabla 4. *Estaciones de precipitación seleccionadas*

Código	Estación	Inicio registro
23190400	Galvicia La	15/01/1968
23190300	Picacho El	15/07/1967
37010060	Portillo El	15/12/1976
24030330	Tope El	15/09/1958
24030300	Cepita	15/08/1958
24060050	Mesa La	15/11/1973
24055030	Zapatoca	15/06/1973
23190600	Pantano El	15/11/1967
23190280	Palogordo	15/06/1967
23195110	Llano Grande	14/07/1971
23190700	Piedecuesta Granja	14/07/1970

Nota: Elaborado a partir de información del Catálogo Nacional de Estaciones del IDEAM (2025).

4.11 Recopilación y Validación de Datos

4.1.3. Obtención de datos históricos

Una vez definidas las estaciones de interés, se procedió a la descarga de los datos históricos de precipitación desde la plataforma DHIME del IDEAM, utilizando el código oficial correspondiente a cada una de las estaciones seleccionadas. Para efectos de organización y trazabilidad del análisis, las estaciones fueron enumeradas consecutivamente del 1 al 11. La **Tabla**

5 presenta la nomenclatura asignada, junto con la identificación oficial y demás atributos relevantes de cada estación.

Tabla 5. *Nomenclatura asignada a estaciones*

Nomenclatura	Código	Estación
Estación 1	23190700	Piedecuesta Granja
Estación 2	23190280	Palogordo
Estación 3	23190300	Picacho El
Estación 4	24030330	Tope El
Estación 5	24060050	Mesa La
Estación 6	23190600	Pantano El
Estación 7	24030300	Cepita
Estación 8	23190400	Galvicia La
Estación 9	23195110	Llano Grande
Estación 10	37010060	Portillo El
Estación 11	24055030	Zapatoca

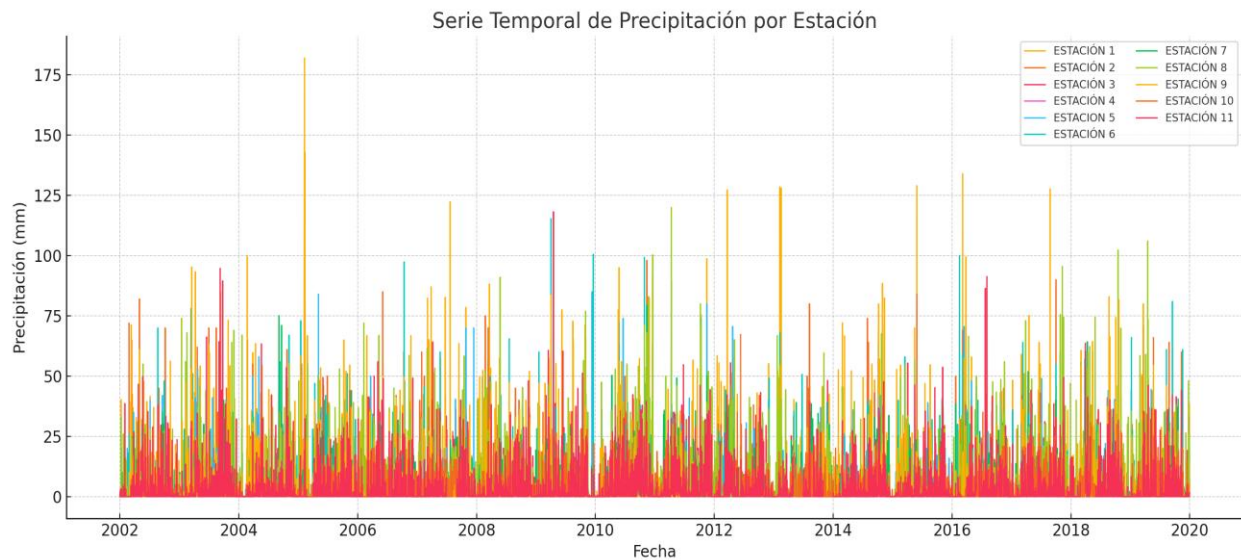
Nota: Elaborado a partir de información del Catálogo Nacional de Estaciones del IDEAM (2025).

En el análisis preliminar de los datos históricos de precipitación descargados para cada una de las estaciones seleccionadas, se evidenció una marcada heterogeneidad espacial en la distribución pluviométrica dentro del área de estudio. Este análisis se obtuvo a partir del cálculo de la precipitación total acumulada durante el periodo 2002–2019, donde se identificaron diferencias significativas entre estaciones. La Estación 8 registró el mayor valor acumulado con 32.211,5 mm, seguida por la Estación 1 con 29.764,3 mm y la Estación 3 con 24.440,5 mm. Estos valores sugieren la posible influencia de condiciones orográficas o micro climáticas específicas que favorecen una mayor pluviosidad en dichas zonas.

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

En contraste, las Estaciones 9 y 5 presentaron los menores registros acumulados, con 14.902,3 mm y 14.342,1 mm respectivamente, lo que podría asociarse a condiciones locales más secas, diferencias de altitud y exposición topográfica (ver **Gráfico 2**).

Gráfico 2. *Precipitación diaria por estación periodo 2000-2019*



Nota: Elaborado en Google Colab en lenguaje Python (2025).

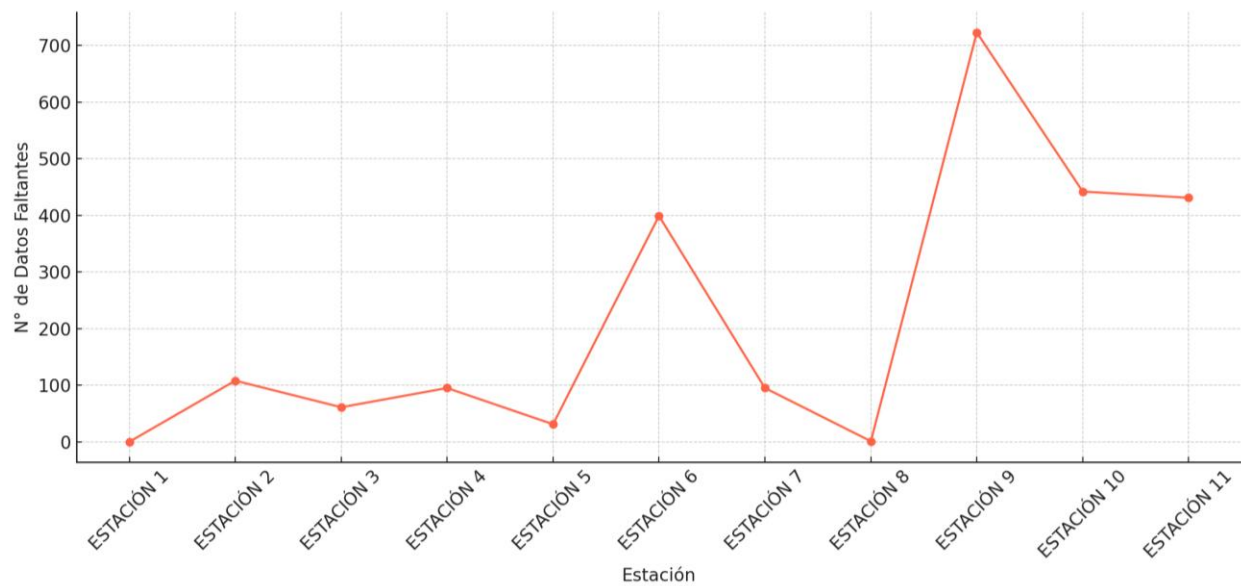
4.1.4. Complemento de información faltante

Como parte del procesamiento de datos de entrada, se desarrolló la identificación y tratamiento de la información faltante en las series de precipitación diaria de cada una de las estaciones. En este sentido, se identificaron un total de 2386 datos faltantes, el mayor porcentaje de datos faltantes se concentra en las Estaciones 9,10 y 11 con el 66,89% del total de los datos identificados (ver no se comportó de forma lineal ni sistemática, lo que sugiere la existencia de problemas operativos, interrupciones intermitentes o fallas técnicas diferenciadas en la operación de las estaciones, posiblemente vinculadas a su ubicación, accesibilidad o estado de mantenimiento).

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

Gráfico 3). Por su parte, las Estaciones 1 y 8 presentaron una cobertura prácticamente completa de sus registros, lo cual las posiciona como series de referencia para la reconstrucción o validación de datos faltantes en estaciones vecinas. Teniendo en cuenta que el patrón de datos no se comportó de forma lineal ni sistemática, lo que sugiere la existencia de problemas operativos, interrupciones intermitentes o fallas técnicas diferenciadas en la operación de las estaciones, posiblemente vinculadas a su ubicación, accesibilidad o estado de mantenimiento.

Gráfico 3. *Información faltante por estación*



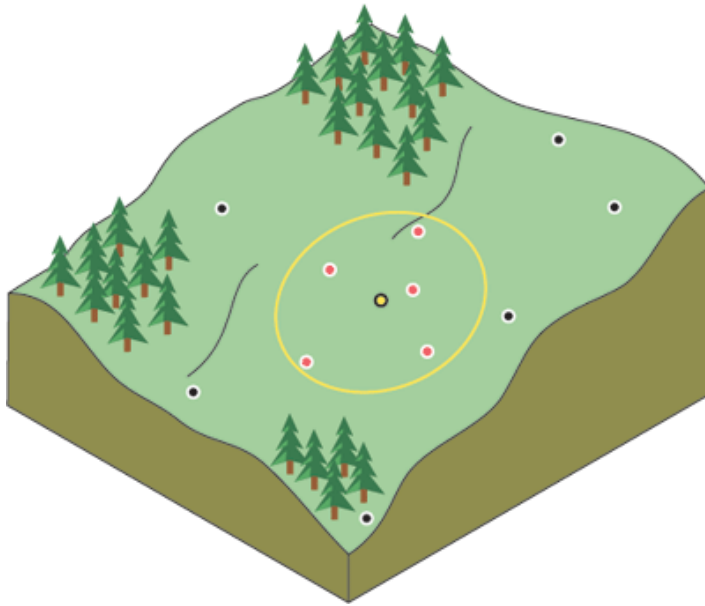
Nota: Elaborado en Google Colab en lenguaje Python (2025).

Ahora bien, el **Apéndice A** presenta de manera detallada los días específicos y los intervalos de fechas en los que se identificaron registros ausentes en cada una de las estaciones analizadas.

Una vez fueron identificados los datos faltantes, se procedió a estimar cada uno de estos datos para lo cual se empleó el método Inverso de la Distancia Ponderada (IDW por su sigla en

inglés), El IDW determina los valores de celda mediante una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. La ponderación es una función de la distancia inversa. La superficie interpolada debe ser la de una variable dependiente de la localización (ESRI, 2021).

Figura 6. *Vecindad de IDW para el punto seleccionado*



Nota: Tomado del sitio web oficial de ESRI

Desde el punto de vista técnico, la identificación y tratamiento de información faltante en las series de precipitación diaria puede abordarse mediante herramientas como Microsoft Excel o utilizando lenguaje de programación Python en la plataforma Google Colab, dependiendo del enfoque de análisis y la disponibilidad de recursos.

En el caso de Excel, el procedimiento requiere contar previamente con los datos de precipitación organizados cronológicamente por estación y por día, así como con los valores de distancia entre estaciones, calculados previamente a partir de un Sistema de Información

Geográfica (SIG). Con esta información, es posible aplicar el método de IDW, mediante la siguiente fórmula:

$$Px = \frac{\sum_i^n = 1 Pi \frac{1}{d_i^\beta}}{\sum_i^n = 1 \frac{1}{d_i^\beta}} \quad [1]$$

De la ecuación 1, Px es el dato a estimar, Pi la precipitación conocida, β parámetro de potencia⁴ y di la distancia entre la estación conocida y la desconocida.

Ahora bien, el **Apéndice B** compila el script de código desarrollado, incluyendo los módulos utilizados, la estructura de los datos de entrada, el cálculo de distancias entre estaciones y la aplicación del algoritmo de imputación día a día para el complemento de información faltante. Esta automatización permitió reducir significativamente el tiempo de procesamiento y asegurar la homogeneidad del tratamiento en todas las estaciones evaluadas.

En concordancia con lo anterior, se realizó el complemento de los 2.386 registros faltantes identificados en las series diarias de precipitación, permitiendo así la reconstrucción completa del conjunto de datos. Como resultado, se consolidó una serie continua de 6.574 registros diarios de precipitación para cada una de las once estaciones, correspondiente al periodo de estudio comprendido entre los años 2002 y 2019. El **Apéndice C** presenta de forma gráfica los datos continuos de precipitación de cada estación.

4.1.5. *Análisis de datos atípicos*

⁴ Es un valor numérico que controla la influencia de la distancia entre los puntos conocidos y el punto a interpolar

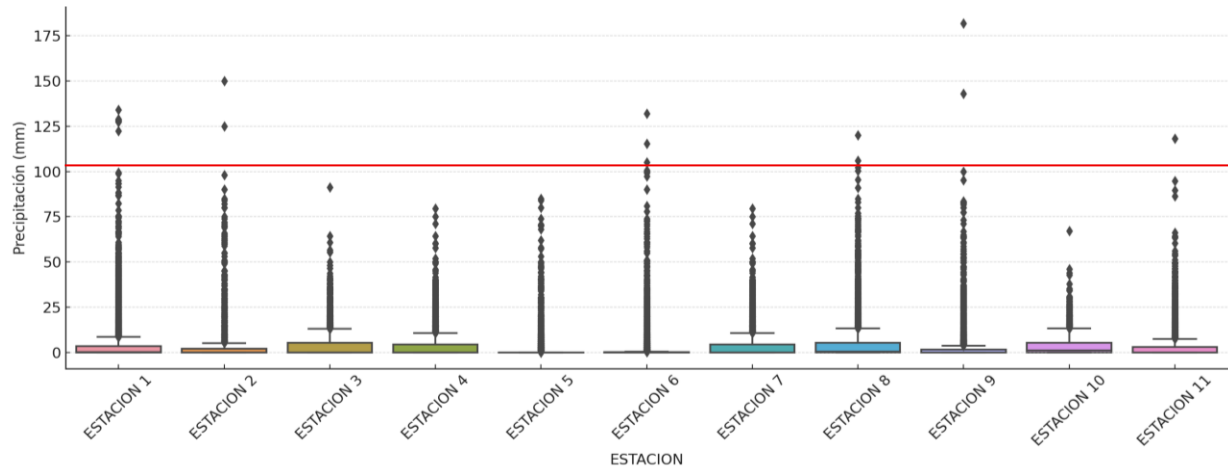
ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

Una vez completada la información faltante en las series diarias de precipitación, se procedió con un análisis de datos atípicos (outliers), los valores atípicos son puntos que se desvían significativamente de la tendencia de los datos restantes. La retención, modificación o eliminación de estos valores atípicos puede afectar significativamente los parámetros estadísticos calculados a partir de los datos (U.S. Department of the Interior, 1982, p. 17). La metodología empleada para la identificación de este tipo de valores se fundamenta en el uso del diagrama de caja o boxplot, el cual permite representar estadísticamente la distribución de los datos de precipitación diaria por estación. Este método se basa en el análisis del rango intercuartílico (IQR), que comprende el intervalo entre el primer cuartil (Q1) y el tercer cuartil (Q3), representando el 50% central de los datos. El gráfico delimita además los valores esperados mediante los “bigotes”, los cuales se extienden hasta 1.5 veces el IQR desde los cuartiles. En estadística de datos normales, cualquier valor que se ubique por fuera de este rango se identifica como un posible dato atípico, para el caso en particular de los datos de precipitación se tuvo en cuenta los puntos identificados gráficamente como un punto individual que se alejan del conjunto de datos.

Este enfoque resulta altamente útil con datos de precipitación, dado que permite identificar de manera visual y eficiente los registros de precipitación que presentan una desviación significativa con respecto al comportamiento general de cada estación. Al aplicar esta metodología de forma comparativa entre estaciones, fue posible evidenciar irregularidades en los datos, posibles errores de medición o eventos extremos localizados. Es preciso mencionar que cada dato atípico identificado fue comparado con los datos de precipitación de la misma fecha de cada estación

Gráfico 4. *Detección grafica de Outliers por estación mediante Boxplot*

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

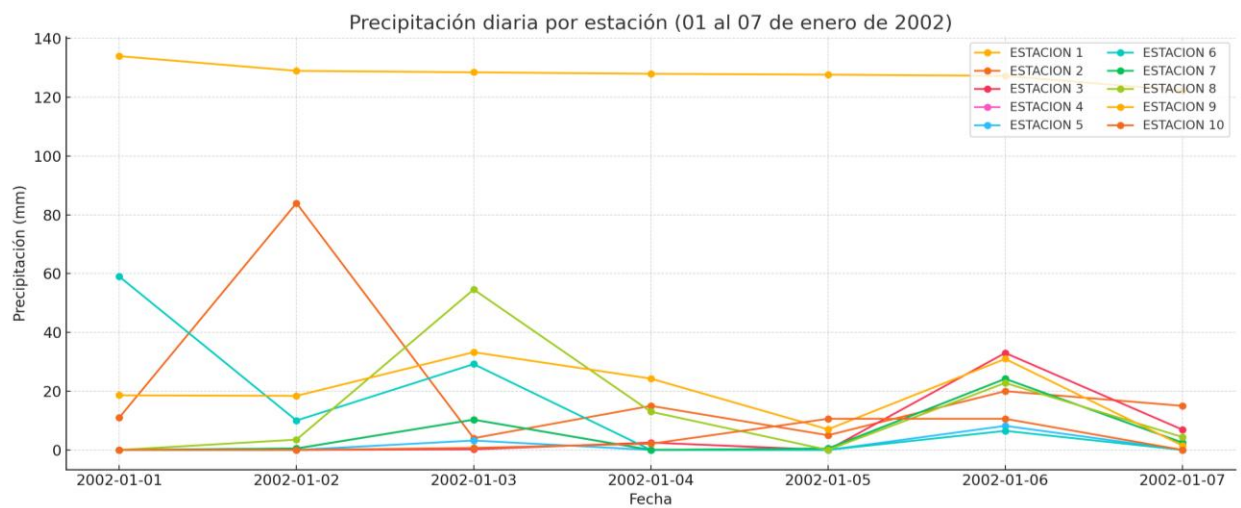


Nota: Elaborado en Google Colab en lenguaje Python (2025).

• Estación 1

Durante el periodo del 01/01/2002 al 07/01/200 la **Estación 1** presenta un comportamiento inusualmente alto y constante, con valores superiores a 120 mm/día, lo que podría indicar un sesgo sistemático o una inconsistencia. Otras estaciones, como la **Estación 3, 4 y 5**, reportan valores bajos o nulos durante la mayoría de los días evaluados.

Gráfico 5. Posibles Outliers – Estación 1



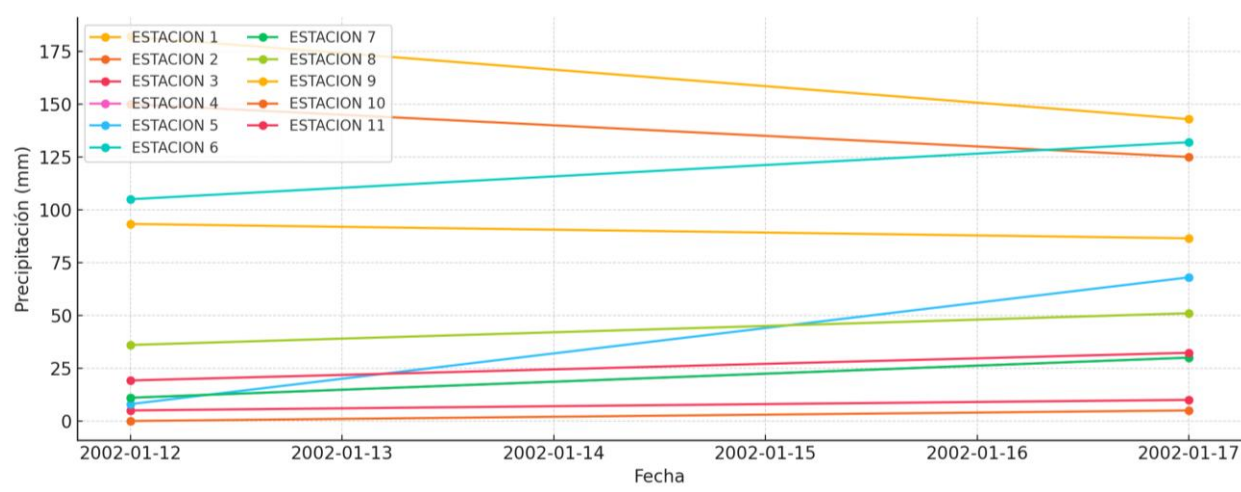
Nota: Elaborado en Google Colab en lenguaje Python (2025).

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

• Estación 2

En el caso de la Estación 2, para los días 12/01/2002 y 17/01/2002 se registran los valores más altos de precipitación, destacándose con valores superiores a 125 mm/día en ambas fechas. Sin embargo, guarda relación con los datos de las **Estaciones 6 y 9**, lo cual puede ser indicativo de eventos localizados. La mayoría de las demás estaciones mantienen valores mucho menores, lo que evidencia una fuerte variabilidad espacial del evento.

Gráfico 6. *Precipitación diaria por estación (12 y 17 de enero de 2002)*



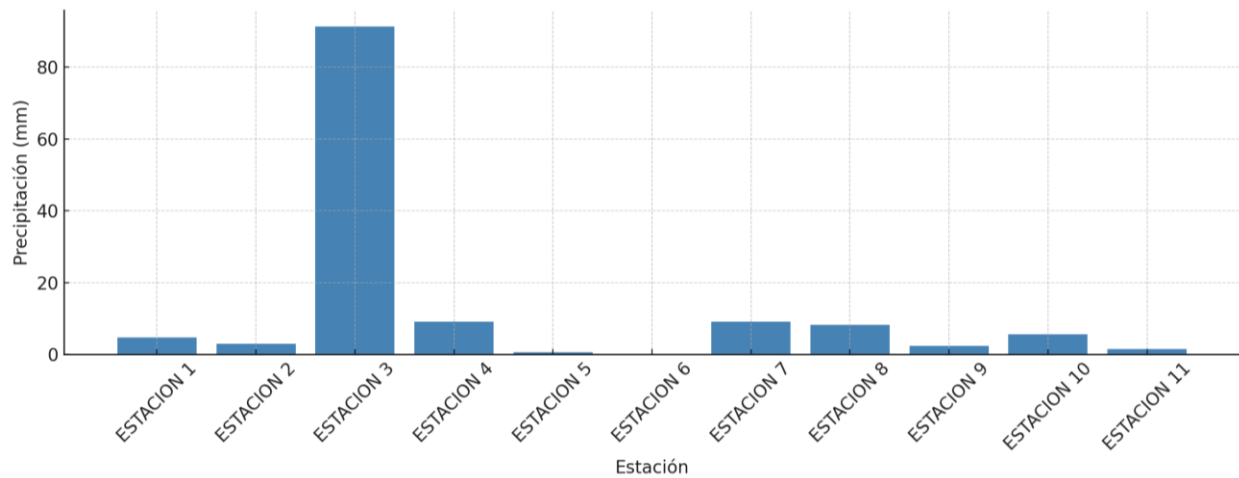
Nota: Elaborado en Google Colab en lenguaje Python (2025).

• Estación 3

Para el día 21/10/2005, la estación 3 registró un valor atípicamente alto (91.3 mm), en contraste con el resto de las estaciones, que reportaron precipitaciones considerablemente menores, la mayoría por debajo de 10 mm. Lo cual sugiere que este valor puede corresponder a un dato inconsistente.

Gráfico 7. *Precipitación por estación 21/10/2005*

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

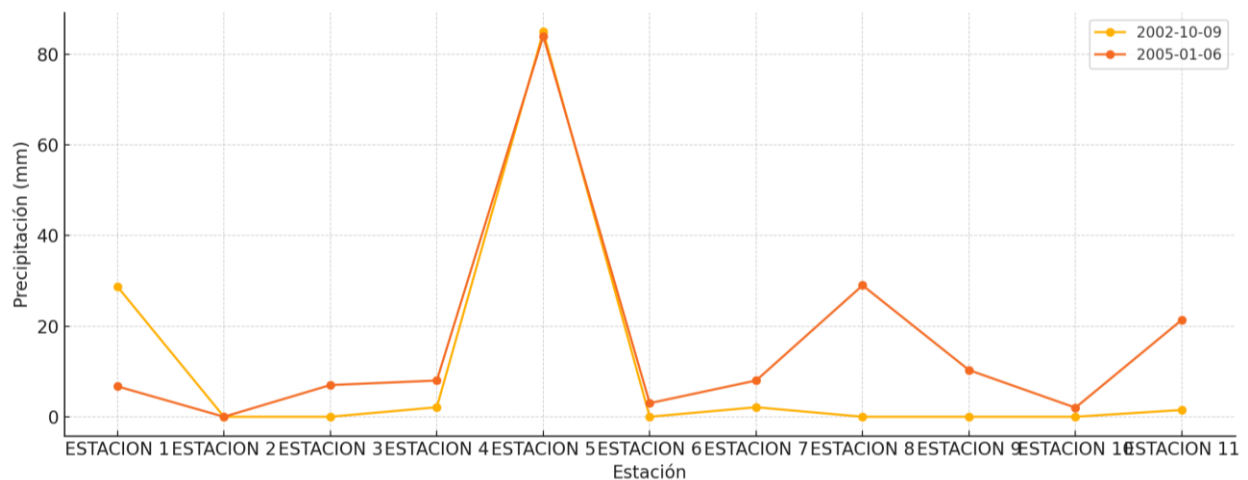


Nota: Elaborado en Google Colab en lenguaje Python (2025).

- **Estación 4:** Para el caso de la Estación 4 no se identificaron datos atípicos
- **Estación 5**

Para los días 09-10-2002 y 06-01-2005 la Estación 5 destaca en ambas fechas con valores cercanos a los 85 mm, mientras el resto de las estaciones registraron precipitaciones mucho menores, lo cual podría indicar un dato atípico.

Gráfico 8. Precipitación por estación 09/10/2002 y 06/01/2005



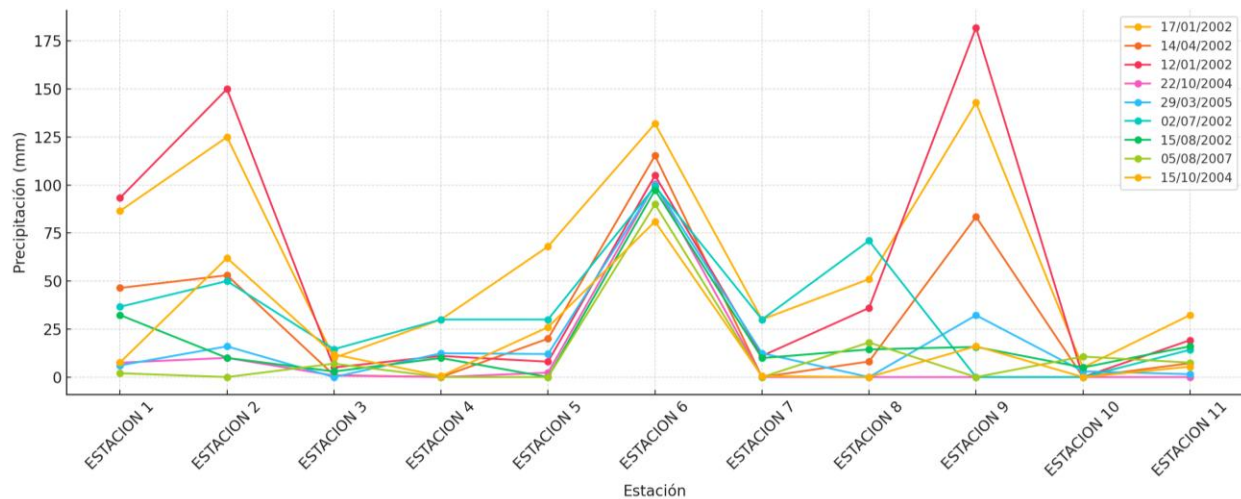
ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

Nota: Elaborado en Google Colab en lenguaje Python (2025).

- **Estación 6**

Los valores identificados como posibles Outliers de la estación presentan homogeneización con los valores de precipitación de las otras de estaciones de interés.

Gráfico 9. *Precipitación por estaciones*



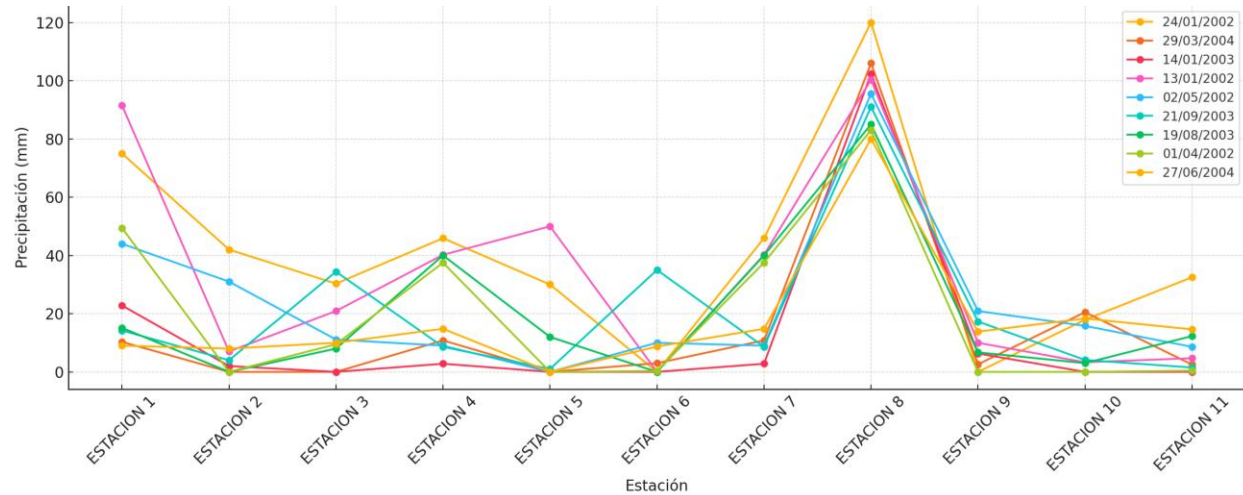
Nota: Elaborado en Google Colab en lenguaje Python (2025).

- **Estación 7:** No se identificaron datos atípicos extremos
- **Estación 8**

La Estación 8 muestra una tendencia dominante con precipitaciones superiores a 80 mm en cada fecha, alcanzando hasta 120 mm, lo que indica un comportamiento significativamente distinto al resto de estaciones. Las demás estaciones presentan valores considerablemente más bajos, lo cual sugiere que la Estación 8 podría estar registrando eventos locales o que existe una inconsistencia sistemática en sus datos.

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

Gráfico 10. Precipitación por estaciones (referencia Estación 8)

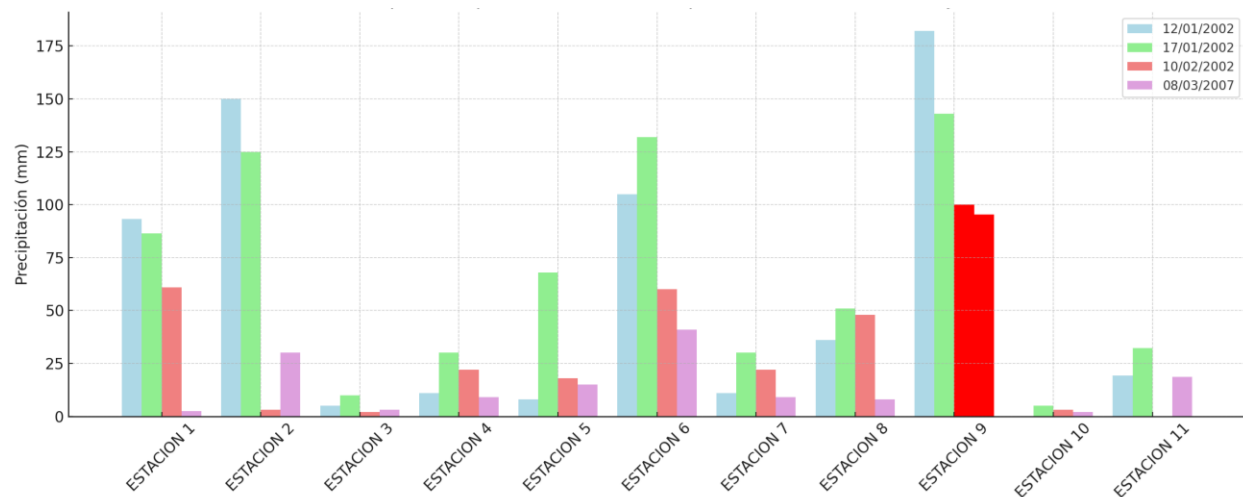


Nota: Elaborado en Google Colab en lenguaje Python (2025).

- **Estación 9**

La Estación 9 presenta registros significativamente elevados en las fechas 10/02/2002 y 08/03/2007, sin embargo, se realizan en datos con estaciones cercanas como es el caso de la Estación 2 y 6 por lo tanto indicaría un evento localizado.

Gráfico 11. Precipitación por estaciones (referencia Estación 9)

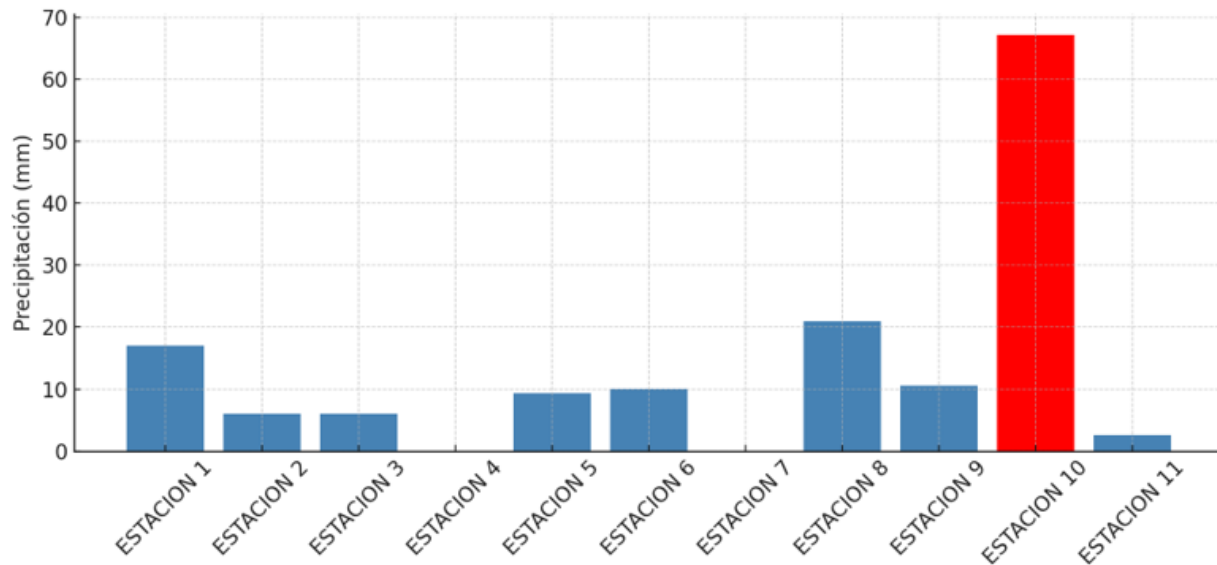


Nota: Elaborado en Google Colab en lenguaje Python (2025).

- **Estación 10**

La desviación de la Estación 10, para el dato de precipitación del día 18-06-2003 con respecto a la media regional sugiere un posible evento extremo local, una inconsistencia en el dato, o una diferencia significativa en la captación de lluvia.

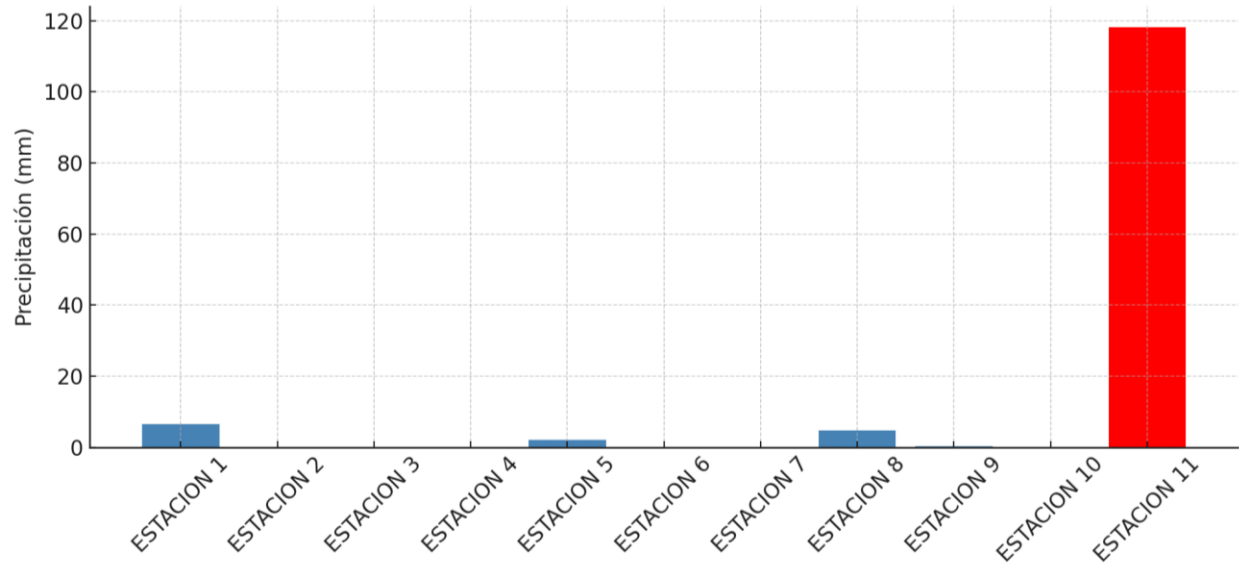
Gráfico 12. *Precipitación por estaciones – 18/06/2003*



Nota: Elaborado en Google Colab en lenguaje Python (2025).

- **Estación 11**

En el caso de la Estación 11 para el día 5 de febrero de 2005, se observa claramente un valor atípico de 118.2 mm. El valor de Estación 11 se encuentra muy por encima del promedio diario regional, mientras que la mayoría de las estaciones reportaron valores cercanos a 0. Este comportamiento indica una inconsistencia potencial, que podría tratarse de un evento localizado de alta intensidad o un error de medición.

Gráfico 13. *Precipitación por estación – 05/02/2005*

Nota: Elaborado en Google Colab en lenguaje Python (2025).

Conforme lo establece U.S. Department of the Interior (1982) todos los procedimientos para tratar los valores atípicos requieren, en última instancia, un juicio que involucre consideraciones tanto matemáticas como hidrológicas, de igual forma, recomienda comparar con los datos históricos de inundaciones y la información sobre inundaciones en sitios cercanos.

De esta manera, los registros identificados como atípicos no fueron reemplazados ni eliminados del conjunto de datos, dado que su presencia podría corresponder a eventos extremos reales o comportamientos hidrológicos relevantes. No obstante, dichos valores fueron marcados y documentados para ser considerados con precaución en las etapas de calibración y validación del modelo.

4.1.6. Recopilación de datos geoespaciales

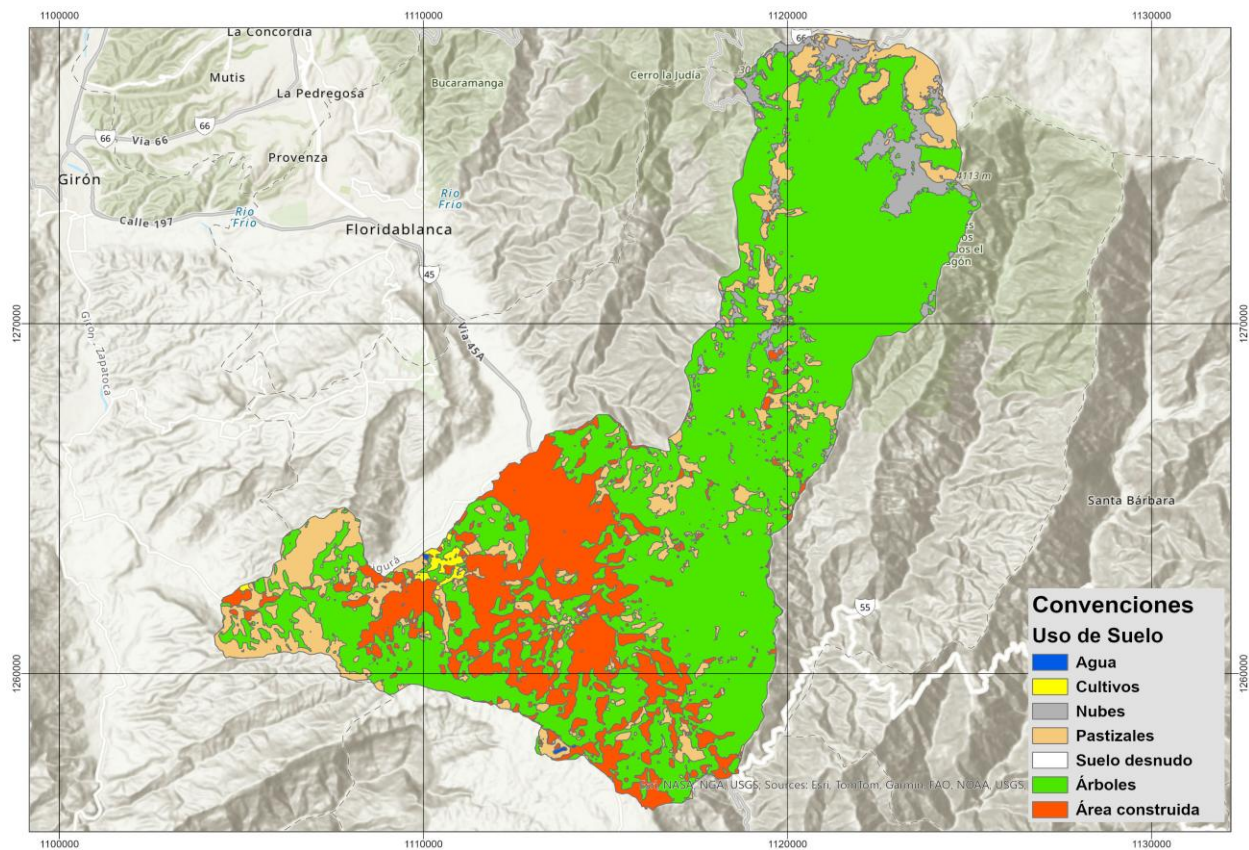
Del análisis de uso y cobertura del suelo obtenido mediante la plataforma Land Cover Explorer para el año 2019, se identificaron siete (7) categorías de cobertura del suelo

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

predominantes en la cuenca. Del total del área de la cuenca, el 63,42 % corresponde a cobertura vegetal tipo arbórea, clasificada en dicha plataforma como árboles. Esta categoría predomina en las zonas altas y medias de la cuenca, representando un importante regulador hidrológico.

Por su parte, un 17,97 % de la superficie corresponde a áreas construidas, concentradas principalmente en los sectores de expansión urbana del municipio de Piedecuesta. Asimismo, el 13,70 % está conformado por pastizales. El 4,88 % restante se distribuye entre coberturas menos representativas como nubes, cuerpos de agua superficiales y cultivos agrícolas.

Figura 7. *Uso de suelo cuenca Palogordo*

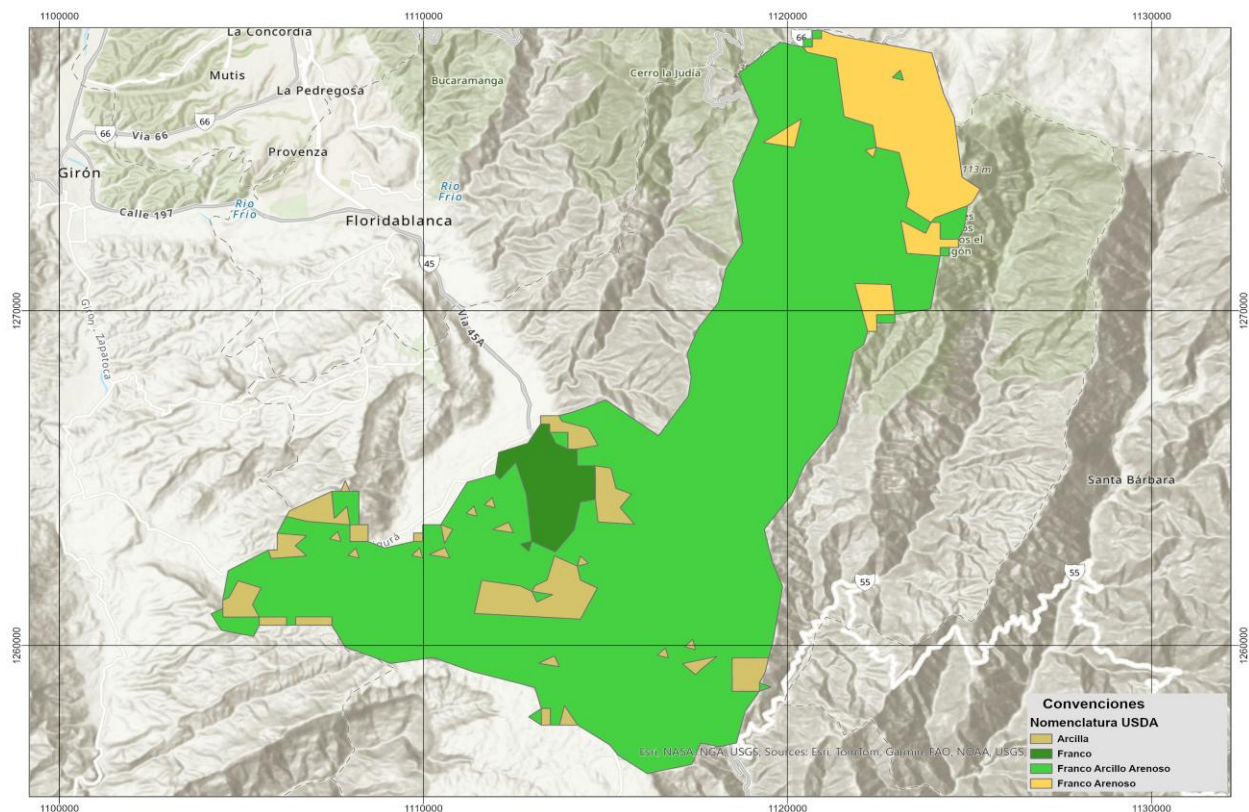


Nota: Elaborado en ArcGIS Pro a partir de información de la plataforma Land Cover Explorer (2019)

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

Conforme a la clasificación textural del suelo propuesta por el USDA (2007) (ver **Apéndice D**), el análisis de la capa edáfica procesada para la cuenca evidenció que el 81,47 % del área corresponde a suelos de tipo Franco Arcillo Arenoso, los cuales presentan características intermedias de retención de humedad y drenaje. Esta categoría domina en las zonas medias y bajas de la cuenca. En segundo lugar, se identificó un 8,84 % de suelos Franco Arenosos, típicos de áreas con mayor permeabilidad y menores tasas de escorrentía superficial. Le siguen los suelos de textura Arcillosa (6,35 %), asociados a baja infiltración y alta capacidad de retención hídrica, y finalmente, los suelos Francos, que ocupan el 3,34 % del área total, caracterizados por una composición equilibrada de partículas minerales.

Figura 8. *Tipos de Suelo presente en la cuenca Palogordo*



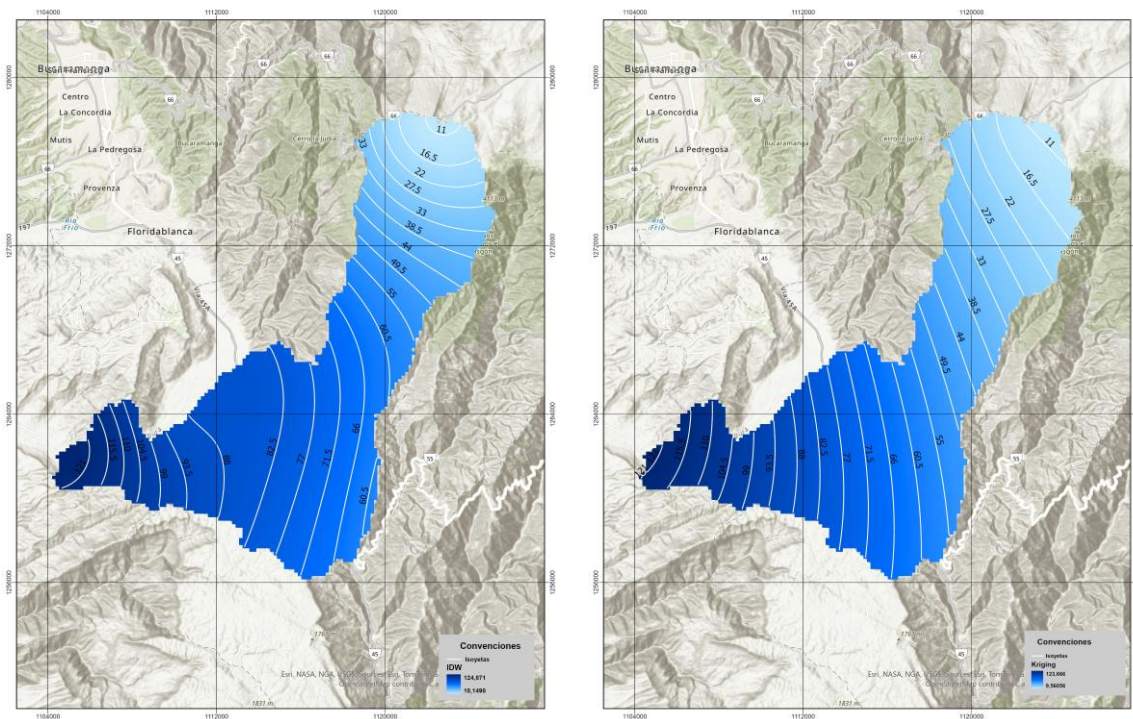
Nota: Elaborado en ArcGIS Pro a partir de información de la plataforma SoilGrids (2025)

4.3 Procesamiento de Datos de Precipitación

4.1.7. Procedimiento diario de interpolación

Con el propósito de ilustrar el comportamiento espacial de los métodos de interpolación aplicados a los datos de precipitación, se seleccionó como ejemplo el evento ocurrido el 11 de febrero de 2005. La **Figura 9** presenta los mapas generados mediante los métodos de interpolación espacial objeto de análisis, procesados en el entorno SIG ArcGIS Pro.

Figura 9. Precipitación 11/02/2005 (IDW y Kriging)



Nota: Elaborado en ArcGIS Pro a partir de información de la plataforma IDHIME del IDEAM (2025)

Para el evento de precipitación del 11 de febrero de 2005, los resultados obtenidos mediante interpolación espacial revelaron una mayor concentración de precipitación en el sector oeste de la cuenca, con una disminución progresiva hacia el noreste, patrón claramente visible en

los ráster generados tanto por el método Kriging como por IDW. Al aplicar la herramienta Zonal Statistics as Table sobre la delimitación hidrológica, se determinó que la precipitación media diaria estimada para toda la cuenca fue de 57,714 mm utilizando el método de Kriging, mientras que el método IDW arrojó un valor superior, de 66,59 mm. Esta diferencia resalta la sensibilidad del modelo ante el método de interpolación empleado.

4.1.8. Programación del algoritmo Cargue de insumos

En esta fase se implementó con éxito un algoritmo en lenguaje Python, ejecutado en Google Colab, que permitió automatizar el procesamiento de los 6.573 días de datos de precipitación diaria para cada estación. Esta automatización transformó un procedimiento altamente operativo en un proceso reproducible, eficiente y escalable, en línea con las directrices recomendadas por organismos como la Organización Meteorológica Mundial ((WMO), 2021).

El código ejecutado integró de forma dinámica los insumos requeridos: los datos diarios de precipitación por estación (en formato .xlsx) y la máscara espacial de la cuenca en formato GeoTIFF. El sistema generó una malla regular sobre la cuenca delimitada, sobre la cual se aplicaron los métodos de interpolación espacial de forma secuencial por cada día del periodo.

En complemento a lo anterior, el **Apéndice E** presenta el diagrama de flujo que resume la secuencia operativa del algoritmo implementado, mientras que el **Apéndice F** contiene el código fuente completo desarrollado en lenguaje Python, estructurado en bloques funcionales para su ejecución en Google Colab.

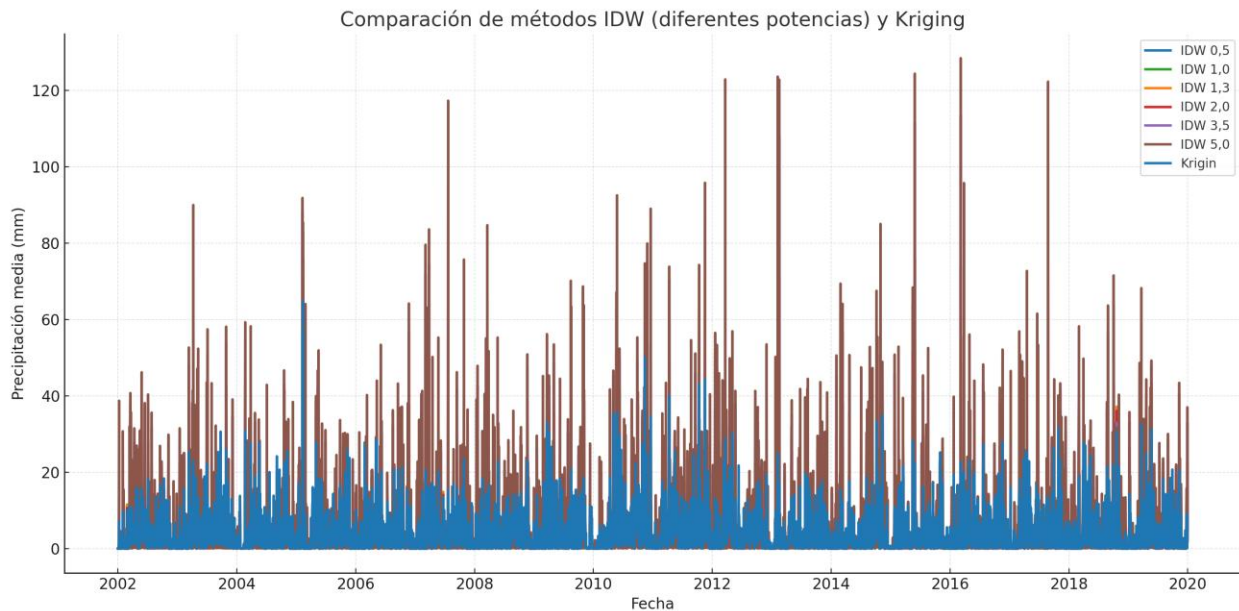
4.1.9. Cálculo y exportación de precipitación media diaria

Como resultado de la implementación del algoritmo, se generaron un total de 46.011 registros de precipitación media diaria para la cuenca Palogordo durante el periodo 2002–2019.

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

De estos, 39.438 correspondieron a series interpoladas mediante el método IDW, aplicando exponentes de potencia $\beta = 0.5, 1.3, 2.0, 3.5$ y 5.0 ; y 6.573 registros adicionales fueron generados por el método de Kriging Ordinario (ver **Gráfico 14**).

Gráfico 14. *Datos medios diarios de precipitación por método*



El gráfico comparativo de las series muestra una superposición ordenada de las curvas, lo que permite observar el efecto del parámetro de potencia sobre los resultados de IDW. Se evidenció que al aumentar la potencia ($\beta = 5.0$), el método asigna mayor peso a los valores más cercanos, generando picos más pronunciados y fluctuaciones abruptas. Por su parte, el método Kriging ofreció una representación más suavizada de la distribución espacial, ubicándose consistentemente entre las curvas IDW $\beta = 2.0$ y $\beta = 2.5$.

4.4 Configuración y calibración del Modelo hidrológico SHIA

4.1.10. Integración de datos al modelo SHIA

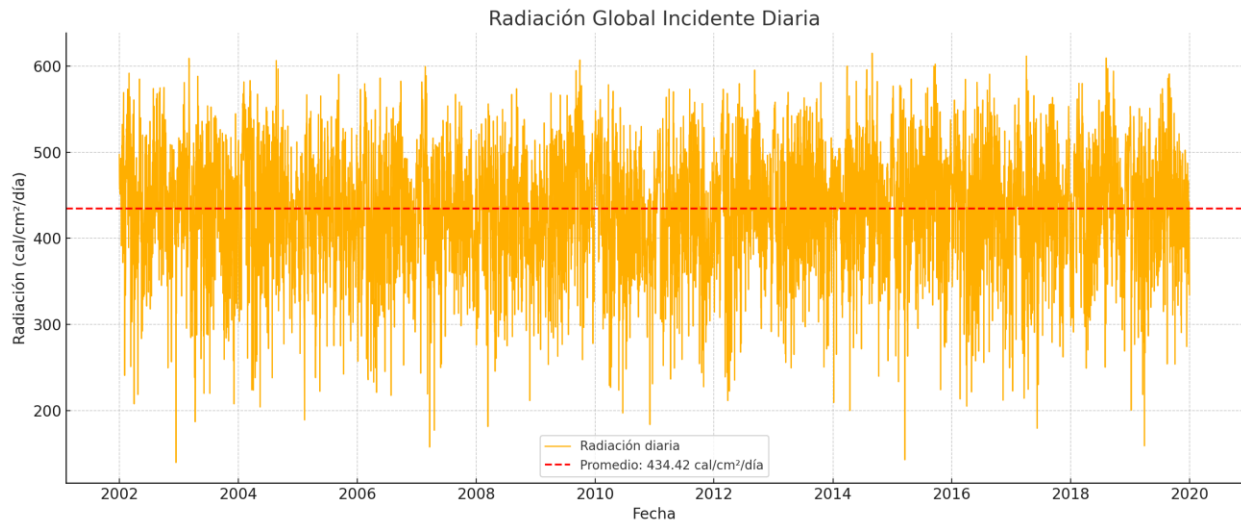
En esta etapa se integraron los datos previamente calculados requeridos para la configuración del modelo hidrológico, entre ellos, los parámetros morfométricos de la cuenca, tales como el área de drenaje y la cota media. Adicionalmente, se incorporaron las variables climáticas obtenidas a partir de la plataforma NASA POWER, incluyendo la radiación global incidente promedio (expresada en $\text{cal}/\text{cm}^2/\text{día}$) y la temperatura media diaria ($^{\circ}\text{C}$) para el área de estudio. En el caso de la precipitación de referencia, esta fue calculada a partir de los valores multianuales diarios interpolados y procesados en SIG, garantizando su representatividad espacial sobre la cuenca Palogordo.

Radiación global incidente promedio

La obtención de datos de radiación global incidente promedio en la cuenca, fue obtenida [Haga clic o pulse aquí para escribir texto](#). desde la plataforma NASA POWER, a una resolución temporal diaria y expresados en unidades de W/m^2 .

Dado que el modelo hidrológico SHIA requiere este parámetro en unidades de $\text{cal}/\text{cm}^2/\text{día}$, se aplicó la conversión correspondiente utilizando el factor $1 \text{ W}/\text{m}^2/\text{día} = 2.064 \text{ cal}/\text{cm}^2/\text{día}$. Como resultado, se determinó que la radiación global incidente promedio en la cuenca Palogordo durante el periodo analizado fue del orden de $434,42 \text{ cal}/\text{cm}^2/\text{día}$, valor que fue incorporado como insumo climático fundamental en la configuración del modelo.

Gráfico 15. *Radiación Global Incidente (2022-2019)*

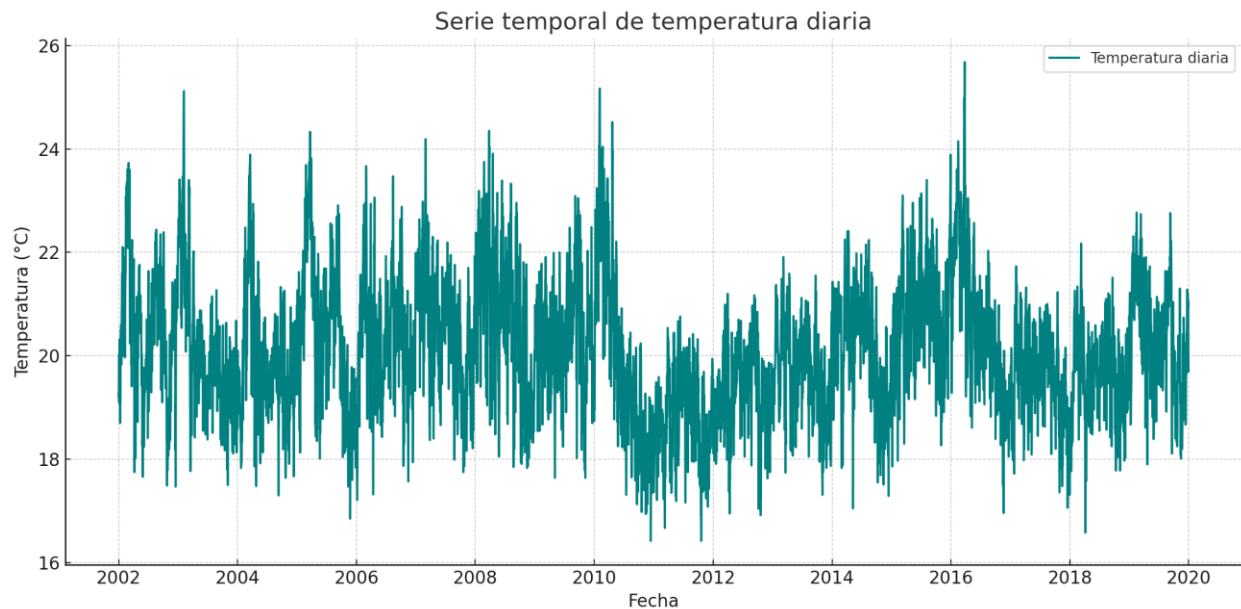


Nota: Elaborado en lenguaje Python en Google Colab a partir de información de la plataforma NASA POWER (2025)

Temperatura media diaria (°C)

A partir de la descarga de datos registrados de temperatura media diaria desde la plataforma NASA POWER en grados Celsius (°C), se procesaron los registros correspondientes al periodo de estudio. Como resultado, se estimó que la temperatura media diaria promedio de la cuenca durante el periodo analizado fue del orden de los 20.12 °C.

Gráfico 16. *Temperatura media diaria (2002-2019)*



Nota: Elaborado en lenguaje Python en Google Colab a partir de información de la plataforma NASA POWER (2025)

Precipitación de referencia (mm)

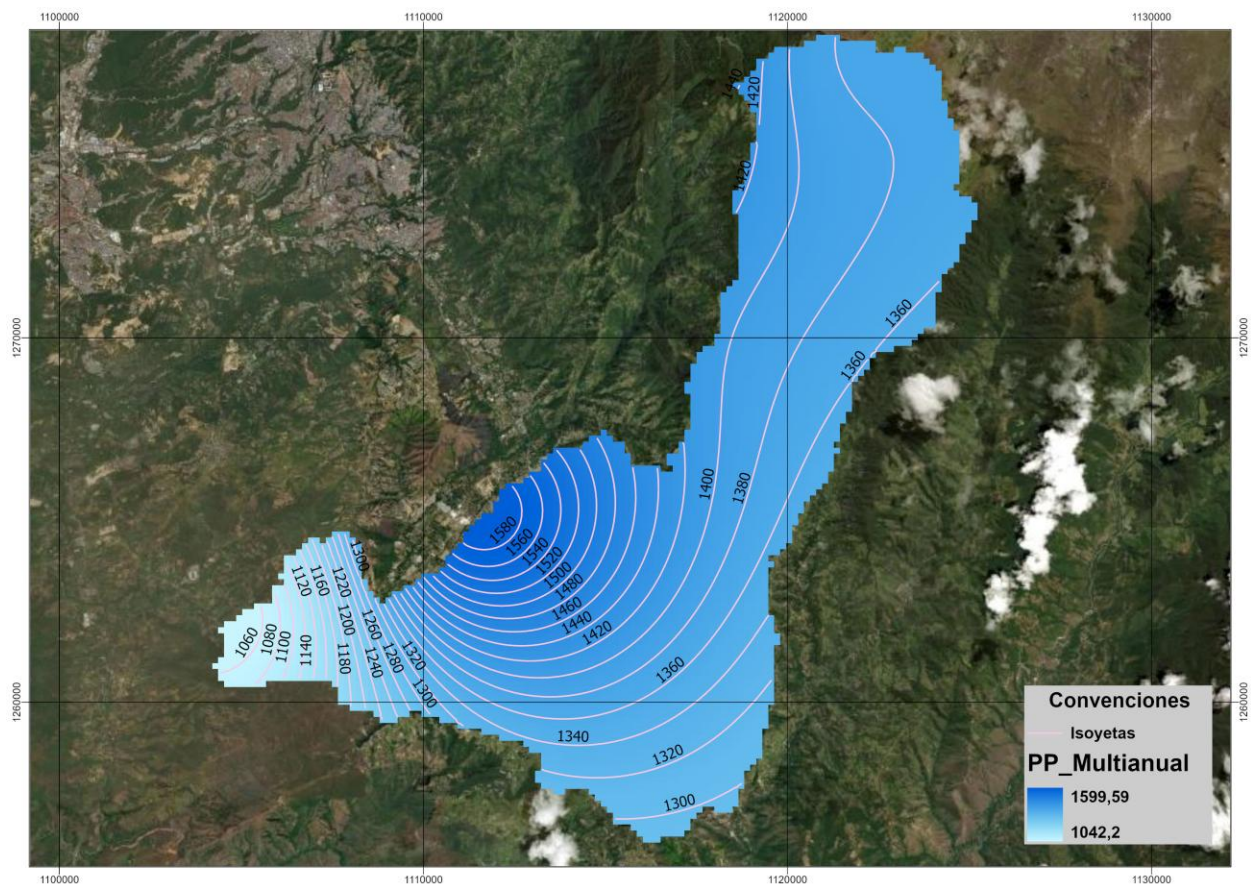
La precipitación de referencia para la cuenca Palogordo fue estimada a partir del análisis de los valores anuales multianuales de las estaciones seleccionadas, con base en los registros oficiales del periodo 2002–2019 disponibles en la plataforma DHIME del IDEAM. Como resultado, se determinó un valor promedio de 1.373,56 mm/año, representativo del comportamiento climático de largo plazo en la cuenca.

En concordancia con lo anterior, se identificó un gradiente espacial en la distribución de la precipitación, con un patrón decreciente desde el suroccidente hacia el noreste. Las zonas con menores registros, del orden de 1.060 mm/año, se ubicaron en el extremo suroccidental, mientras

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

que los valores más altos, que alcanzan hasta 1.580 mm/año, se concentraron en el centro-norte de la cuenca (ver **Figura 10**). Este comportamiento sugiere la existencia de zonas con mayor influencia orográfica o efectos de condensación asociados a la circulación de vientos húmedos, lo cual resulta relevante para la calibración del modelo hidrológico y la evaluación de la respuesta diferencial dentro de la cuenca.

Figura 10. *Precipitación anual multianual cuenca Palogordo*



Nota: Elaborado en ArcGIS Pro a partir de información de la plataforma IDHIME del IDEAM (2025)

4.1.11. Ajuste paramétrico mediante la calibración hidrológica

Para el caso de la cuenca Palogordo, el proceso de calibración del modelo hidrológico SHIA se ejecutó para el período comprendido entre el 1 de enero de 2002 y el 31 de diciembre de 2012, correspondiente a un total de 4.748 días. Durante esta etapa, se evaluaron los cuatro escenarios descritos con anterioridad, en este sentido, la **Tabla 6** compila las características generales de cada uno de los escenarios evaluados, incluyendo el método utilizado, el criterio de análisis y las herramientas utilizadas para la obtención de la información.

Tabla 6. *Métodos utilizados para la simulación de escenarios*

Método	Criterio Análisis	Herramienta Utilizada
IDW	Utilizado a diferentes parámetros de potencia iterando desde 0.5, 1.3, 2.0, 3.5 y 5.0	Google Colab, lenguaje Python
Ordinary Kriging	Modelo teórico de semivariograma (Gaussian)	Google Colab, lenguaje Python
Centroide	Interpolado con método IDW a un parámetro de potencia de 2	Microsoft Excel y SIG (ArcGIS PRO, QGIS)
Estación representativa	valor de precipitación específico para cada unidad de la cuenca, zona alta (estación 3), zona media (estación 1), zona baja (estación 2).	Microsoft Excel

Nota: Elaboración propia (2025)

De los escenarios analizados, los mejores resultados fueron obtenidos con la interpolación IDW usando una potencia $\beta = 1.3$, el cual mostró mayor correspondencia con los caudales observados. La calibración se consideró satisfactoria a partir del análisis visual de los hidrogramas simulados, así como de la curva de duración. En este sentido, la **Tabla 7** presenta los resultados obtenidos a

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

partir del esquema de calibración tipo Monte Carlo, los cuales permitieron identificar los parámetros óptimos del modelo.

Tabla 7. *Parámetros calibrados cuenca Palogordo*

Parámetro	Valor	Mínimo Sugerido	Máximo Sugerido
Almacenamiento Capilar - HU	370,000	20	600
Conductividad Capa Sup (mm/día) - Ks	45,565	1	100
Conductividad Capa Inf (mm/día) - Kp	4,110	0,01	10
Perdidas Subterráneas (mm)	0,000	0	10
Tiempo Medio de Residencia Flujo Superficial (días)	3,100	1	10
Tiempo Medio de Residencia Flujo Subsuperficial (días)	7,000	1	10
Tiempo Medio de Residencia Flujo Base (días)	121,205	50	200
Condiciones Iniciales (mm)			
Almacenamiento Capilar	270,00	0	370,00
Almacenamiento Agua Superficial	6,00	0	10,00
Almacenamiento Gravitacional Z Sup	12,00	0	30,00
Almacenamiento Gravitacional Z Inf (acuífero)	100,00	0	2000,00

Nota: Elaborado en el modelo SHIA (2025)

De acuerdo con lo anterior, el almacenamiento capilar (HU), con un valor de 370 mm, representa una capacidad media-alta del suelo para retener agua, lo cual atenúa los picos de escorrentía superficial (Rawls et al., 1982). La conductividad hidráulica de la capa superficial (Ks) de 45,57 mm/día indica una buena capacidad de infiltración en suelos permeables, mientras que la conductividad de la capa inferior (Kp) de 4,11 mm/día permite una contribución moderada al flujo base (Saxton & Rawls, 2006) . Teniendo en cuenta que no se cuenta con información en la cuenca,

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

no se consideraron pérdidas subterráneas, lo que implica que todo el excedente infiltrado se conserva dentro del sistema. Por su parte, los tiempos medios de residencia para los flujos superficial (3,1 días), subsuperficial (7 días) y base (121 días) regulan la velocidad con la que el agua fluye a través del sistema, generando una respuesta hidrológica rápida en superficie y más lenta en profundidad, característica de cuencas con drenaje mixto superficial-subterráneo.

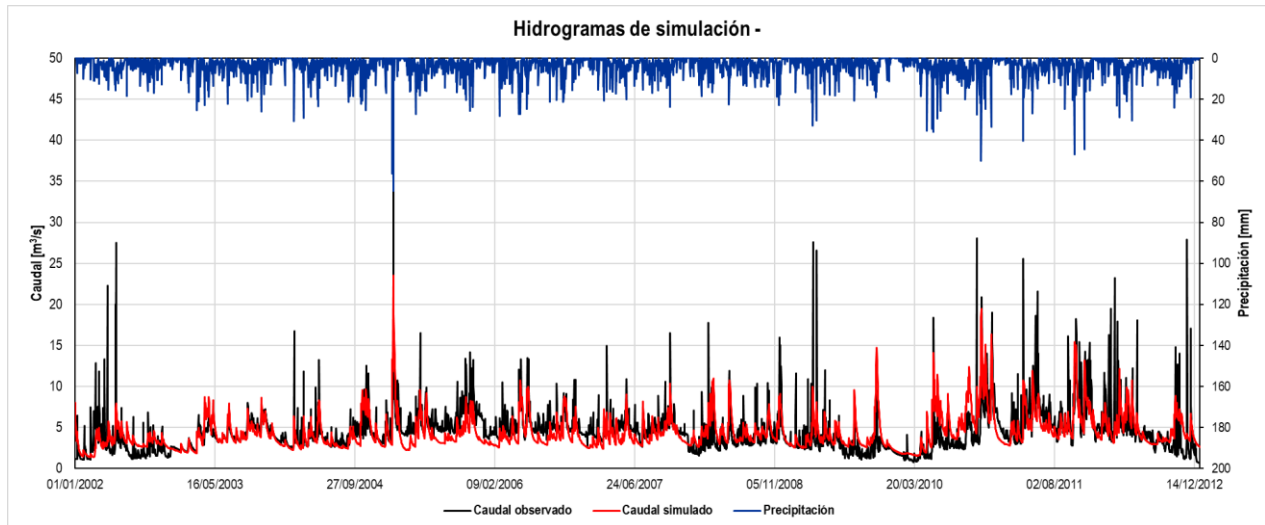
Ahora bien, el modelo calibrado, evaluado cuantitativamente mediante los indicadores de desempeño por defecto en el programa, arrojó un coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (ENS) de 0,403, lo que indica un nivel aceptable de ajuste entre los caudales simulados y observados (donde un valor de 1,0 representa un ajuste perfecto). Asimismo, el error porcentual en el balance (EB) fue de 0,023, lo cual se considera un valor cercano al óptimo teórico de 0,00, reflejando una adecuada conservación de masa en la simulación hidrológica.

El hidrograma resultante posterior a la calibración del modelo SHIA refleja un comportamiento hidrológico aceptable en términos de tendencia general y caudales base. Se observa que los caudales simulados (línea roja) reproducen de forma coherente la frecuencia y temporalidad de los eventos hidrológicos, especialmente en los periodos secos, donde el modelo mantiene una respuesta estable y sin sobreestimación significativa del flujo base. Esto evidencia que los parámetros asociados al almacenamiento profundo y la conductividad de la capa inferior fueron ajustados adecuadamente. No obstante, persiste una subestimación sistemática en los picos de caudal, lo cual sugiere que, si bien el modelo calibrado logra capturar la estructura general del régimen hídrico, presenta limitaciones frente a eventos extremos de corta duración o alta intensidad. Esta situación puede atribuirse a la capacidad de amortiguamiento del almacenamiento

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

capilar y al tiempo medio de residencia superficial, los cuales, aunque calibrados dentro de rangos técnicamente válidos, atenúan la respuesta directa a las precipitaciones intensas.

Gráfico 17. *Hidrogramas de simulación cuenca Palogordo*

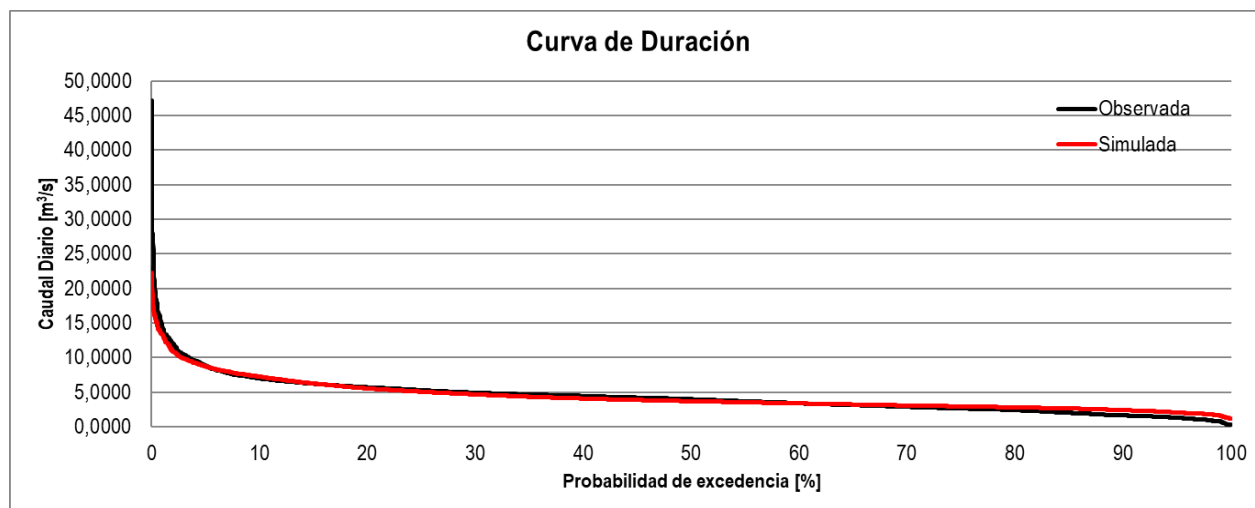


Nota: Elaborado en el modelo SHIA (2025)

La curva de duración obtenida tras la calibración del modelo SHIA evidencia un ajuste aceptable entre los caudales observados y simulados, particularmente en el rango de caudales medios y bajos, donde ambas curvas presentan un comportamiento muy similar entre las probabilidades de excedencia del 20 % al 95 %. Este resultado indica que el modelo representa adecuadamente las condiciones hidrológicas ordinarias y de estiaje, lo cual valida la configuración de parámetros como el almacenamiento base, la conductividad de la capa inferior y los tiempos de residencia subsuperficial y base. No obstante, se observa una divergencia en la parte inicial de la curva (probabilidades menores al 10 %), donde los caudales simulados subestiman los valores observados. Esta diferencia sugiere que el modelo tiende a atenuar los eventos extremos, posiblemente debido a un almacenamiento superficial elevado o tiempos de concentración

mayores, lo que limita su respuesta frente a lluvias intensas. A pesar de ello, el ajuste general de la curva es satisfactorio y refuerza la validez de la calibración, especialmente para fines de análisis hidrológico de largo plazo o planificación en condiciones medias y secas.

Gráfico 18. *Curva de duración cuenca Palogordo*



Nota: Elaborado en el modelo SHIA (2025)

Finalmente, la **Tabla 8** compila los datos generales del modelo calibrado para el periodo 2002 – 2012

Tabla 8. *Parámetros generales calculados del modelo*

Parámetro	Valor
Años de Simulación	13,00
P. Estimada [mm/año]	1407,17
P. Referencia [mm/año]	1373,56
Año Inicio	2002
Año Fin	2014
Fecha Inicio	1/01/2002
Fecha Fin	31/12/2014

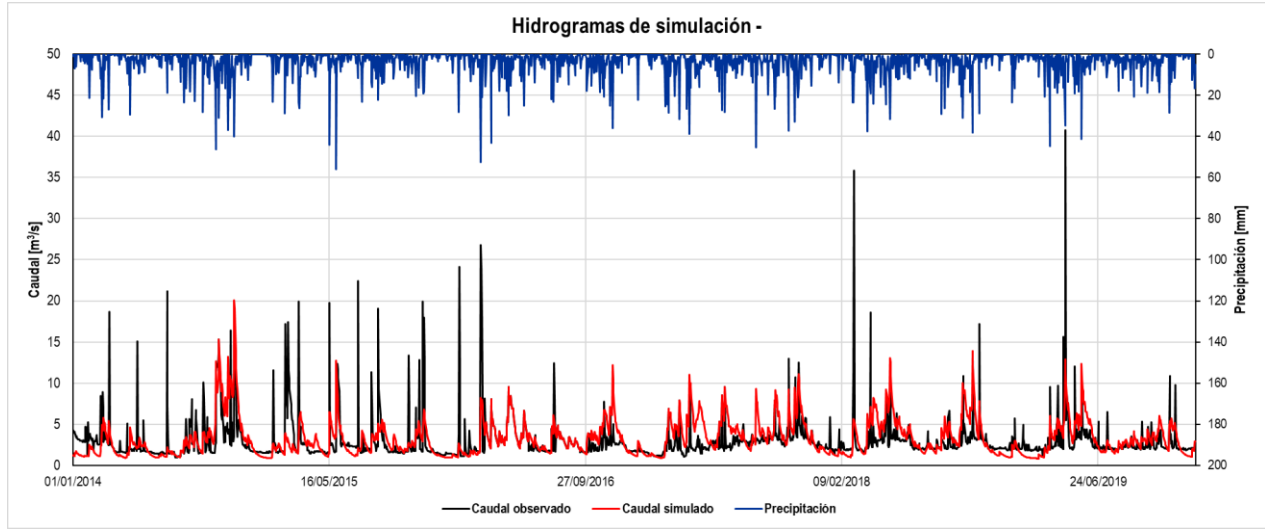
Parámetro	Valor
ETP (mm/año)	1089,7
ETR (mm/año)	842,8
Prom Caudal Observado [m ³ /s]	4,33
Prom Caudal Simulado [m ³ /s]	4,22
BE	0,027
ENS	0,443

Nota: Elaborado a partir del modelo SHIA (2025)

4.1.12. Validación del modelo

El proceso de validación se aplicó para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2014 y el 31 de diciembre de 2019. En términos generales, el modelo mostró una representación adecuada del comportamiento hidrológico de la cuenca. Se observó una buena reproducción de los caudales base y medios diarios, reflejando una correcta representación de los procesos de infiltración, almacenamiento superficial y flujo base en el sistema. Esto se confirma en el bajo error porcentual en el balance (0.084), el cual indica que el volumen total simulado y observado se encuentra bien compensado, es decir, el modelo conserva correctamente la masa de agua en el sistema, aun cuando se presentan diferencias en la dinámica de ciertos eventos.

Sin embargo, tal como se aprecia en el hidrograma de simulación, el modelo tiende a subestimar los picos de caudal generados por eventos de lluvia intensa. Esta limitación se refleja directamente en el ENS, que, si bien alcanzó un valor de 0.443 durante la etapa de calibración, descendió a 0.386 en la validación, mostrando una ligera pérdida de eficiencia predictiva.

Gráfico 19. *Hidrogramas de simulación etapa de validación*

Nota: Elaborado a partir del modelo SHIA (2025)

La subestimación observada en el modelo puede explicarse por múltiples factores. En primer lugar, es probable que los parámetros vinculados a la escorrentía directa no hayan sido calibrados adecuadamente para representar eventos hidrológicos extremos, o que el modelo no reproduzca con precisión el tiempo de concentración característico de la cuenca. No obstante, la causa de mayor relevancia se asocia a la influencia del área urbana del municipio de Piedecuesta, que representa aproximadamente el 17,97 % de la superficie total de la cuenca. Esta zona urbana altera significativamente el régimen natural de escorrentía, debido a que en el modelo no se han representado explícitamente las captaciones de agua para consumo humano ni los aportes localizados de vertimientos. Estas intervenciones antrópicas no consideradas generan un desfase entre los caudales observados y simulados, lo cual repercute negativamente en los indicadores de ajuste, particularmente en el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (ENS).

4.5 Simulación de Escenarios hidrológicos

Durante esta fase se analizaron los escenarios hidrológicos previamente definidos. En este orden de ideas, La **Tabla 9** resume los resultados de las simulaciones, destacando el comportamiento comparativo del modelo bajo cada uno de los enfoques de representación de la precipitación.

Tabla 9. Estadísticos de prueba de los métodos aplicados

Método	ENS	EB	R ²
IDW			
$\beta = 0.5$	0.3270	0.0585	0.3339
$\beta = 1.3$	0.3452	0.0361	0.3595
$\beta = 2.0$	0.2309	0.1281	0.3479
$\beta = 3.5$	-0.3460	0.2690	0.3000
$\beta = 5.0$	-0.7080	0.3189	0.2826
Ordinary Krigin	0.2641	0.0425	0.2758
Centroide Geométrico	0.2869	0.1036	0.3087
Estación 1	-0.8609	0.3366	0.2767
Estación 2	-0.3747	0.2956	0.1361
Estación 3	-0.4271	0.0559	0.1320

Nota: Elaboración propia (2025)

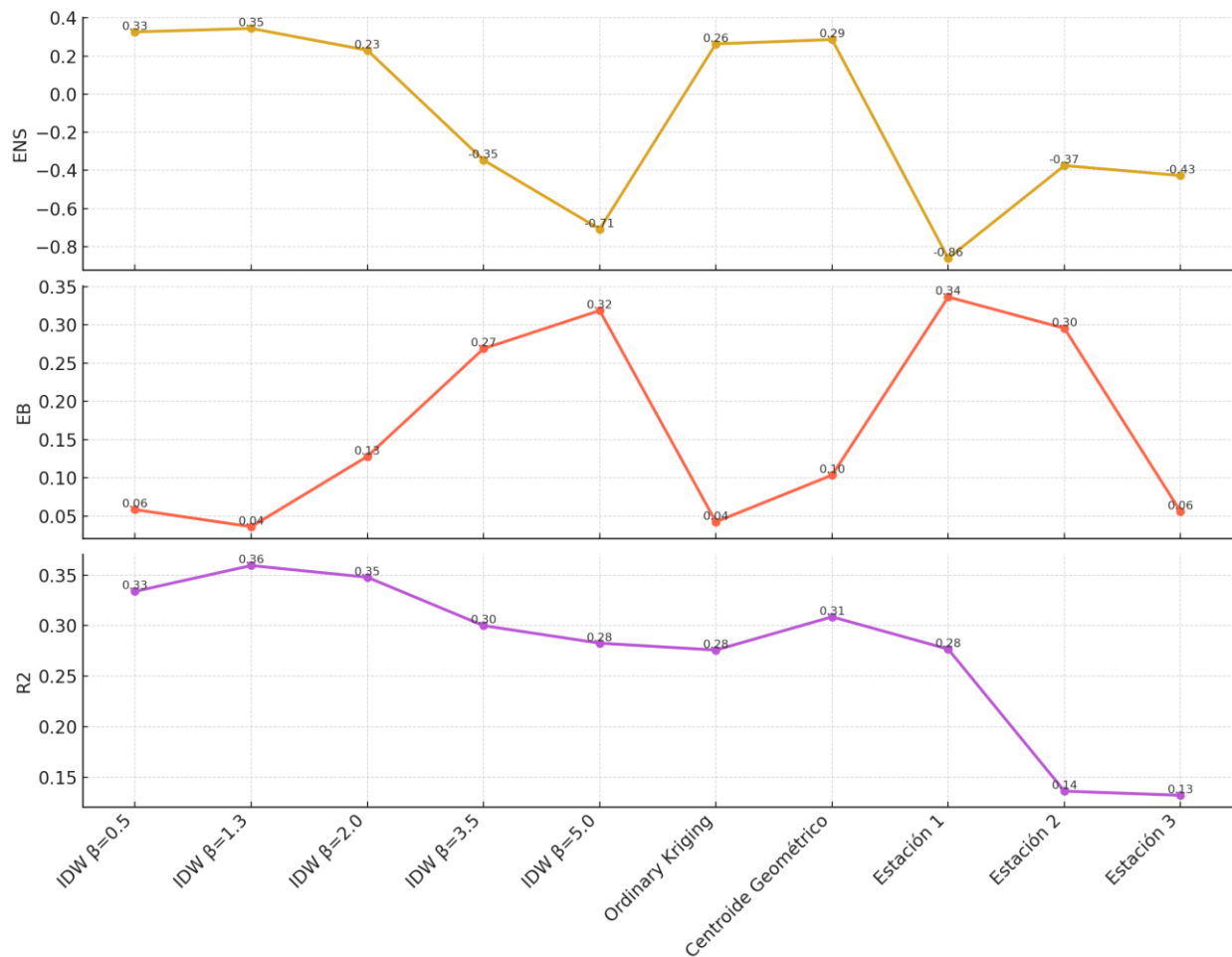
Los resultados obtenidos a partir de la comparación entre distintos métodos de interpolación espacial de precipitación muestran diferencias significativas en el desempeño del modelo hidrológico. En particular, el método IDW aplicado con distintos exponentes de potencia (β) evidencia que la elección del valor de β tiene un efecto determinante sobre la calidad de la simulación. El valor óptimo se obtuvo con un $\beta = 1.3$, que alcanzó un coeficiente de eficiencia de

Nash-Sutcliffe de 0.3452, un error porcentual en el balance de 0.0361, y un coeficiente de determinación de 0.3595, lo que refleja una adecuada representación tanto en forma como en volumen de los caudales simulados. Este resultado sugiere que este valor de potencia permite una ponderación balanceada entre la proximidad espacial de las estaciones y la suavización del gradiente pluviométrico, capturando correctamente la heterogeneidad espacial de la cuenca.

Por el contrario, al aumentar el exponente a valores elevados ($\beta = 3.5$ y $\beta = 5.0$), se observa una notable degradación del ajuste del modelo, con valores negativos de ENS (-0.3460 y -0.7080 , respectivamente) y errores de balance superiores al 0.26. Esto indica que una sobreponderación de las estaciones cercanas distorsiona la distribución espacial efectiva de la precipitación, afectando la generación de escorrentía y subestimando eventos de caudal alto. Asimismo, en el caso de $\beta = 0.5$, aunque presenta valores aceptables (ENS = 0.3270 y EB = 0.0585), no supera el desempeño de $\beta = 1.3$, confirmando la necesidad de una calibración del exponente según las características geomorfológicas de la cuenca (Ver **Gráfico 20**).

Gráfico 20. Desempeño por método en métricas ENS, EB y R^2

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN



Nota: Elaborado en lenguaje Python en Google Colab

El método de Kriging Ordinario mostró un rendimiento intermedio (ENS = 0.2641, EB = 0.0425), inferior al de IDW con $\beta = 1.3$. Aunque este método considera la autocorrelación espacial entre estaciones, su desempeño podría haberse visto limitado por la baja densidad o distribución irregular de los puntos de observación. De igual manera, el uso del valor de precipitación asignado al centroide geométrico de la cuenca presentó un ENS de 0.2869 y un EB de 0.1036, mostrando un ajuste razonable en tendencia general, pero con una mayor desviación en el balance hídrico.

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

Ahora bien, los escenarios que utilizaron únicamente el valor de una estación puntual (Estaciones 1, 2 y 3) fueron los que reflejaron el peor desempeño. Todos los casos arrojaron valores negativos de ENS, elevados errores en el balance (EB entre 0.29 y 0.33) y coeficientes R^2 bajos, lo que confirma que una sola estación no representa adecuadamente la variabilidad espacial de la precipitación en la cuenca. Estos resultados respaldan la necesidad de utilizar métodos de interpolación espacial calibrados como insumo fundamental para mejorar la precisión de las simulaciones hidrológicas en cuencas con condiciones topográficas y climáticas heterogéneas como el caso de la cuenca Palogordo.

En este sentido, el **Apéndice F** contiene los gráficos de los hidrogramas de simulación y curva de duración para cada uno de los escenarios hidrológicos simulados.

Finalmente, los valores bajos del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (ENS) obtenidos en la mayoría de los métodos evaluados evidencian deficiencias asociadas a la omisión de procesos antrópicos relevantes en la configuración del modelo hidrológico. Entre estos, se destacan las captaciones de agua para consumo humano y los vertimientos de aguas residuales, los cuales alteran de forma significativa el régimen hídrico natural. Según lo reportado por la Piedecuestana de Servicios Públicos E.S.P, (2020), la captación desde el río de Oro en la parte alta de la cuenca alcanza un caudal del orden de 470 litros por segundo, volumen que no fue representado como extracción dentro del balance hídrico del modelo. De manera complementaria, en la parte baja de la cuenca se estima un volumen de vertimiento de aproximadamente 196 litros por segundo, conforme a las proyecciones establecidas en el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) del municipio de Piedecuesta (PIEDECUESTA E.S.P., 2024).

La no inclusión explícita de estas intervenciones generó distorsiones en la simulación de caudales superficiales y del flujo base, afectando la representación del comportamiento hidrológico real de la cuenca. Esta discrepancia entre la dinámica observada y la simulada explica, en parte, la penalización observada en los indicadores de ajuste estadístico, especialmente en el ENS, y destaca la necesidad de integrar de manera explícita los procesos antrópicos en la estructura del modelo para mejorar su precisión y aplicabilidad en contextos de gestión integrada del recurso hídrico. En ese escenario cobran relevancia modelo como el HEC-HMS en el que se podrían introducir las extracciones y captaciones de agua realizadas por la intervención antrópica.

En este contexto, se identificó la pertinencia técnica de utilizar modelos con capacidad para representar de manera explícita los procesos hidráulicos antrópicos. En particular, el modelo HEC-HMS permite simular captaciones, extracciones, vertimientos, derivaciones y estructuras de regulación mediante componentes hidráulicos definidos, lo cual habilita una representación más precisa y ajustada de cuencas urbanizadas o con infraestructura hídrica. Por tanto, la aplicación complementaria de HEC-HMS se perfila como una estrategia metodológica robusta que puede mejorar sustancialmente la simulación hidrológica en escenarios donde los flujos naturales están significativamente modificados, fortaleciendo así su aplicabilidad en la gestión integrada del recurso hídrico y en la evaluación técnica de intervenciones en cauces y lechos.

4.6 Recomendaciones para fortalecer la modelación hidrológica en la Subcuenca

Con base en los resultados, se proponen acciones estratégicas que permitan consolidar una modelación hidrológica más robusta y coherente con la dinámica espacio - temporal de la precipitación en la subcuenca del río de Oro. Estas acciones están orientadas a optimizar su aplicación en procesos de planificación, diseño y gestión de infraestructura hidráulica.

4.1.13. Recomendaciones para fortalecer la modelación hidrológica en el marco de los permisos de ocupación de playas, cauces y lechos.

En el marco de los procesos de evaluación técnica requeridos para autorizar intervenciones sobre el cauce o su red de drenaje en proyectos de infraestructura hidráulica, se recomienda a la autoridad ambiental regional fortalecer los criterios de revisión con base en lineamientos técnicos rigurosos, de la siguiente manera:

- **Justificación técnica del método de interpolación**

Las entidades ejecutoras de proyectos deben presentar una justificación técnica clara del método de interpolación de precipitación adoptado (IDW, Kriging u otro), considerando la topografía y densidad de estaciones de la cuenca. Esta justificación debe evidenciar el impacto del método sobre la generación de caudales. Verificar la validez del periodo de calibración y validación

- **Validación de periodos representativos**

Resulta esencial emplear periodos de calibración y validación que reflejen adecuadamente la variabilidad climática e incluyan eventos extremos, de forma que se asegure el desempeño hidráulico en condiciones extremas.

- **Indicadores de validación y análisis de sensibilidad**

Es necesario incorporar indicadores como NSE, EB y R^2 para validar el modelo, junto con un análisis de sensibilidad enfocado en parámetros hidrológicos clave, lo que proporciona mayor certeza técnica en los resultados.

- **Uso de insumos espaciales confiables y actualizados**

La modelación debe sustentarse en insumos recientes y detallados, como mapas de uso y tipo de suelo, además de modelos digitales de elevación (MDE) con resolución adecuada, que permitan representar adecuadamente la escurrimiento.

- **Incorporación de resultados en el diseño hidráulico**

Los caudales simulados deben ser parte integral de los estudios técnicos que sustenten las dimensiones y estructuras hidráulicas propuestas en las solicitudes de intervención. Adicionalmente, se considera fundamental la representación gráfica de los resultados asociados a los tiempos de retorno, mediante productos cartográficos y archivos en formato shapefile, que permitan visualizar espacialmente el comportamiento hidráulico de la obra.

Unificación técnica a través de términos de referencia

El desarrollo de términos de referencia estandarizados que incorporen criterios técnicos mínimos sobre modelación hidrológica e hidráulica contribuirá a una evaluación homogénea, equitativa y técnicamente sustentada de los trámites.

4.1.14. Recomendaciones para la gestión de la cuenca

Teniendo en cuenta la relevancia que representa la modelación hidrológica en la planificación, diseño y regulación de obras hidráulicas, así como en la delimitación de franjas de conservación asociadas al componente hidrológico de la subcuenca del río de Oro, se formulan las siguientes recomendaciones orientadas al fortalecimiento de la gestión integral del recurso hídrico:

- **Incorporar modelos hidrológicos a escala de subcuenca**

Se recomienda que la autoridad ambiental regional adopte y promueva el uso de modelos hidrológicos calibrados y validados a escala de subcuenca, como insumo base en el marco de los

Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH). Esta medida permitiría contar con un insumo técnico uniforme y verificable para la evaluación de intervenciones sobre el cauce y su red de drenaje afluente, priorizando su uso sobre estudios individuales presentados por particulares. Asimismo, se sugiere que esta información esté georreferenciada, disponible públicamente, y de fácil acceso para empresas, entes territoriales y actores interesados en la planificación y construcción de infraestructura hidráulica.

- **Avanzar en el acotamiento de rondas hídricas**

Conforme al artículo 2.2.3.2.3.4 del Decreto 2245 de 2017 ⁵, se recomienda que la autoridad ambiental regional acelere el proceso de delimitación de las rondas hídricas en la subcuenca del río de Oro, considerando de manera integrada el componente hidrológico, ecosistémico y geomorfológico. Esta delimitación es fundamental para establecer las zonas de conservación, uso restringido y protección, y reducir la vulnerabilidad frente a eventos extremos.

- **Fomentar la capacitación técnica en modelación hidrológica**

Es fundamental que el equipo técnico de la autoridad ambiental fortalezca sus capacidades en el manejo, interpretación y validación de modelos hidrológicos (como SHIA o HEC-HMS), el análisis de indicadores de calibración (ENS, R², EB), así como en la interpretación de curvas de duración y simulaciones de escenarios. Esto garantizará una evaluación rigurosa y técnica de las solicitudes de ocupación de cauces y demás intervenciones sobre cuerpos de agua.

- **Implementar una base de datos georreferenciada de intervenciones sobre cauces**

⁵ Por el cual se reglamenta el artículo 206 de la Ley 1450 de 2011 y se adiciona una sección al Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con el acotamiento de rondas hídricas

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

Se recomienda establecer una base de datos centralizada y georreferenciada que registre las intervenciones aprobadas en cauces (tipo de obra, ubicación, longitud, caudal de diseño), cruzada con la información de zonificación de amenaza hídrica y resultados de simulaciones hidrológicas. Esta herramienta facilitaría la toma de decisiones, permitiría identificar acumulación de riesgos y fortalecería la trazabilidad y gestión integrada del recurso hídrico en la subcuenca.

5. Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian que la variabilidad espacio - temporal de la precipitación constituye un factor determinante en la modelación hidrológica de la subcuenca del río de Oro. La aplicación del modelo SHIA bajo distintos esquemas de entrada pluviométrica permitió observar diferencias significativas en los caudales simulados, especialmente cuando se contrastaron los escenarios generados mediante interpolación espacial y aquellos que utilizaron valores puntuales.

En este contexto, la utilización del método IDW con un exponente de potencia $\beta = 1.3$ arrojó el mejor desempeño, con un coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (ENS) de 0.3452 y un error porcentual en el balance (EB) de 0.036. No obstante, estos resultados contrastan con los reportados por (Velásquez et al., 2018), quienes identificaron mejores ajustes en simulaciones hidrológicas para valores de β entre 3.0 y 5.0 en cuencas de características similares. Esta divergencia sugiere que el valor óptimo de β no es universal, sino que debe ser calibrado en función de las condiciones específicas de cada cuenca, tales como la densidad de estaciones, el relieve y la distribución pluviométrica. En este sentido, se recomienda incorporar como criterio de ponderación en el método IDW el promedio anual multianual de cada estación seleccionada, lo cual permitiría asignar pesos más representativos y potencialmente mejorar la precisión en la estimación espacial de la precipitación.

Desde una perspectiva teórica, el estudio valida la importancia de emplear interpolaciones calibradas en modelos hidrológicos distribuidos. Investigaciones como la de Zhang et al., (2021) señalan que la calidad de la estimación pluviométrica condiciona directamente la simulación de procesos como escorrentía, infiltración y almacenamiento. Así, el presente trabajo respalda que la

selección del método de interpolación debe estar sustentada en pruebas empíricas, no siendo recomendable el uso de estaciones únicas como representativas de la cuenca, práctica común en algunos estudios presentados a autoridades ambientales como la CDMB.

Por otra parte, la inclusión de métricas de desempeño como NSE, EB y R^2 , permitió evaluar cuantitativamente la calidad del modelo hidrológico implementado. No obstante, la interpretación de estos indicadores debe complementarse con un análisis visual detallado mediante hidrogramas simulados y curvas de duración. Estas herramientas gráficas permiten identificar discrepancias puntuales entre los caudales observados y simulados, especialmente durante eventos extremos, y contribuyen a validar la coherencia temporal de la simulación. Tal como lo señalan (Moriassi et al., 2007b), una evaluación integral del modelo debe considerar tanto métricas estadísticas como el comportamiento dinámico del escurrimiento a lo largo del tiempo, a fin de garantizar que los modelos calibrados no solo reproduzcan valores promedio, sino también los patrones hidrológicos críticos para la toma de decisiones.

Desde el punto de vista metodológico, el desarrollo e implementación de herramientas computacionales mediante lenguaje Python en la plataforma Google Colab representó un aporte operativo sustancial al estudio, al permitir la automatización del procesamiento y análisis de 6.574 días de datos de precipitación. Esta estrategia redujo significativamente el riesgo de errores manuales y facilitó la estandarización del tratamiento de información hidrometeorológica, aspectos críticos en estudios de larga duración temporal. Además, se alinea con las recomendaciones de organismos internacionales como la Organización Meteorológica Mundial ((WMO), 2021) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2020), que

promueven el uso de soluciones digitales y de código abierto para fortalecer las capacidades locales en regiones con limitaciones tecnológicas y de acceso a software licenciado.

A nivel práctico, los resultados del presente trabajo tienen implicaciones importantes. En primer lugar, justifican la necesidad de que la autoridad ambiental regional exija la utilización de técnicas de interpolación calibradas a la cuenca en el marco de los tramites de ocupación de playas, cauces y lechos. En segundo lugar, abren la posibilidad de establecer modelos de referencia calibrados y de acceso público para subcuencas como la del río de Oro, reduciendo la dependencia de estudios individuales elaborados por terceros.

Entre las principales limitaciones identificadas en el presente estudio se destaca la disponibilidad restringida de estaciones pluviométricas activas con series temporales continuas y completas dentro del área de influencia de la cuenca Palogordo. Si bien el uso de métodos de interpolación espacial como IDW y Kriging permitió ampliar la cobertura espacial de los datos de precipitación, la precisión y confiabilidad de los resultados sigue condicionada por la densidad, distribución y calidad de los registros originales, una situación ampliamente reconocida en la literatura. Tal como lo señalan Ly et al. (2011), la efectividad de los métodos de interpolación se reduce significativamente en contextos donde la red de estaciones es escasa o presenta inconsistencias temporales, situación común en regiones con infraestructura técnica limitada. Esta limitación subraya la necesidad de fortalecer los sistemas de monitoreo hidrometeorológico a nivel regional y de acompañar los estudios con análisis de sensibilidad ante la distribución espacial de las estaciones.

Finalmente, como línea de investigación futura, se propone profundizar en la comparación entre el modelo SHIA y otros modelos hidrológicos con mayor capacidad para representar

procesos antrópicos, como HEC-HMS, con el propósito de evaluar su eficacia relativa en la simulación de eventos extremos en cuencas con condiciones similares a las del río de Oro. Esta evaluación permitiría contrastar el desempeño de ambos modelos frente a configuraciones con infraestructura hidráulica, extracciones y vertimientos, identificando fortalezas y limitaciones en las simulaciones hidrológicas bajo diferentes esquemas de entrada y parametrización.

De igual forma, con base en los aportes de Rendón-Álvarez et al., (2018), se sugiere explorar la implementación de métodos geoestadísticos más avanzados, como el Cokrigado Colocalizado Bajo un Proceso de Markov (CKCM). Este enfoque permite combinar la resolución espacial de sensores remotos con la precisión puntual de los datos pluviométricos, generando un campo de precipitación óptimo a partir de la integración multifuente. La aplicación de este tipo de algoritmos podría representar una mejora sustantiva en la calidad de las interpolaciones espaciales, especialmente en regiones con cobertura limitada de estaciones y alta variabilidad espacial de la lluvia.

6. Conclusiones

La variabilidad espacio - temporal de la precipitación impacta de manera determinante la precisión de las simulaciones hidrológicas, especialmente en cuencas con topografía compleja como la del río de Oro. La evaluación comparativa de cuatro escenarios de entrada pluviométrica evidenció que el método de interpolación IDW, con exponente de potencia $\beta = 1.3$, logró el mejor ajuste frente a los caudales observados ($ENS = 0.3452$; $EB = 0.0361$; $R^2=0.3595$). Este resultado refuerza la importancia de seleccionar técnicas de interpolación calibradas y contextualizadas, en lugar de aplicar métodos convencionales sin validación previa.

La calibración del modelo SHIA a escala de cuenca, utilizando insumos morfométricos, climáticos y edáficos precisos, permitió representar adecuadamente la dinámica hidrológica local, validando su aplicabilidad en estudios técnicos orientados a la planificación territorial e infraestructura hidráulica. La inclusión de indicadores estadísticos reconocidos (ENS , EB , R^2) garantizó una evaluación objetiva de su desempeño, en concordancia con estándares metodológicos como los propuestos por Moriasi et al., (2007).

Los resultados obtenidos permitieron constatar que la práctica común de utilizar una única estación pluviométrica como representativa del comportamiento hidrológico de toda una cuenca puede conducir a subestimaciones significativas de la dinámica de la cuenca, lo cual compromete la confiabilidad de los estudios hidrológicos y aumenta el riesgo de errores en la planificación de infraestructura y gestión del riesgo hídrico. En contraste, la aplicación de métodos de interpolación espacial basados en múltiples estaciones, como Kriging e IDW, ofrece una caracterización más realista de la distribución espacial de la precipitación, particularmente en cuencas con marcada heterogeneidad topográfica. Esta aproximación mejora sustancialmente la representatividad de las

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

simulaciones hidrológicas, lo que se traduce en una mayor fidelidad frente a los registros observados y, por tanto, en insumos más robustos para la toma de decisiones técnico-ambientales.

El desarrollo e implementación de un algoritmo en lenguaje Python, ejecutado en Google Colab, para la interpolación automática de datos y cálculo de estadísticas zonales, constituyó una innovación operativa significativa. Esta herramienta no solo permitió el procesamiento eficiente de 6.574 días de registros, sino que también estableció un marco replicable para estudios futuros, facilitando el análisis continuo de información hidrológica con menor carga manual y mayor trazabilidad.

La caracterización espacial de la cuenca, a partir de insumos como el Land Cover Explorer de ESRI y la base SoilGrids del ISRIC, permitió integrar propiedades físicas del territorio en el modelo, particularmente coberturas de uso del suelo y tipos texturales del suelo, que condicionan procesos clave como la infiltración y la generación de escorrentía. La combinación de variables geomorfológicas, pluviométricas y edáficas fortaleció la robustez del modelo, consolidando un enfoque integral y realista de simulación hidrológica. No obstante, cabe destacar que otros modelos hidrológicos como el HEC-HMS incorporan mecanismos más específicos para representar la interacción entre uso del suelo y tipo de suelo, como el uso del parámetro del número de curva (Curve Number, CN) del Soil Conservation Service (SCS), que permite una parametrización más detallada de la retención de agua superficial en función de las condiciones de cobertura y estructura del suelo. En este sentido, una comparación futura entre el modelo SHIA y HEC-HMS podría aportar elementos valiosos para optimizar la representación de dichos procesos.

Los bajos valores del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (ENS) obtenidos durante la simulación, reflejan limitaciones estructurales del modelo SHIA para representar

adecuadamente el comportamiento hidrológico en una cuenca intervenida, como es el caso del río de Oro. Esta deficiencia se relaciona principalmente con la omisión explícita de procesos antrópicos relevantes, como captaciones de agua y vertimientos, los cuales alteran significativamente el régimen natural de caudales. En consecuencia, se evidencia la necesidad de avanzar hacia modelos con mayor flexibilidad operativa, como HEC-HMS, que permiten incorporar de forma directa estas dinámicas mediante estructuras hidráulicas parametrizables. La adopción de estas herramientas contribuiría a mejorar la precisión de las simulaciones hidrológicas y fortalecería el sustento técnico en los procesos de evaluación ambiental, especialmente en el marco de los trámites de permisos de ocupación de cauces, playas y lechos, promoviendo una gestión más integrada, realista y eficiente del recurso hídrico.

Los resultados obtenidos en este estudio sustentan la necesidad de que la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) adopte lineamientos técnicos más rigurosos para la validación de estudios de ocupación de cauce, especialmente en áreas de alta sensibilidad hidrológica como la subcuenca del río de Oro. Se recomienda que dichos estudios estén sustentados en modelos hidrológicos previamente calibrados y validados a escala de subcuenca, así como en métodos de interpolación espacial que garanticen una representación precisa de la variabilidad pluviométrica. Además, se sugiere establecer como requisito obligatorio la inclusión de indicadores estadísticos de desempeño como el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (ENS), el error porcentual en el balance (EB) y el coeficiente de determinación (R^2), con el fin de evaluar cuantitativamente la fiabilidad de las simulaciones hidrológicas.

Referencias bibliográficas

- Alzate, D., Araujo, G., Rojas, E., Gómez, D., & Martínez, F. (2017). *Interpolacion Regnie para lluvia y temperatura en las regiones andina, caribe y pacífica de Colombia.*
- Andrés, C., Cruz, R., Fernando, D., & Alfonso, G. (2017). *4 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN EN MODELOS HIDROLÓGICOS DISTRIBUIDOS-CASO DE ESTUDIO: RESPUESTA HIDROLÓGICA Y SEDIMENTOS-MICROCUEENCA LA CHORRERA EMBALSE LA COPA.*
- Ángel, M., & Martínez, N. (2022). *Metodología y análisis comparativo de equipos solares prefabricados indirectos por termosifón.*
- Barrios Peña, M. I. (2011). *ESTUDIO DEL EFECTO DE ESCALA ESPACIAL EN UN MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO.* <https://doi.org/10.4995/THESIS/10251/14180>
- Cardona, B. (2020). *Conceptos Básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas.* https://es.scribd.com/document/594272812/35294551?utm_source=chatgpt.com
- Chen, Y., Li, J., Wang, H., Qin, J., & Dong, L. (2017). Large-watershed flood forecasting with high-resolution distributed hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(2), 735–749. <https://doi.org/10.5194/HESS-21-735-2017>,
- DNP. (2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda - CNPV.* <https://microdatos.dane.gov.co/index.php/catalog/643>
- Eregno, F. E., Xu, C. Y., & Kitterød, N. O. (2013). Modeling hydrological impacts of climate change in different climatic zones. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 5(3), 344–365. <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-04-2012-0024>
- ESRI. (2021). *Cómo funciona IDW—ArcGIS Pro | Documentación.* <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-idw-works.htm>

FAO. (2020). *OILSEEDS, OILS & MEALS MONTHLY PRICE AND POLICY UPDATE* *.

<http://www.fao.org/economic/est/publications/oilcrops-publications/monthly-price-and-policy-update/en/>.

Gelvez, E. (2018). *Curva Hipsométrica | PDF | Cuenca de drenaje | Arc Gis*.

https://es.scribd.com/document/461699432/Curva-hipsometrica-docx?utm_source=chatgpt.com

Hussain, I., Utpal, D. R., & Misra, K. (2018). MORPHOMETRIC ANALYSIS IN GIS FRAMEWORK: A CASE STUDY IN CHAMPABATI WATERSHED. *International Research Journal of Engineering and Technology*. www.irjet.net

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (2022). *Estudio Nacional del Agua*.

https://www.andi.com.co/Uploads/ENA%202022_compressed.pdf

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (2003). *Resolución 104 de 2003*.

Li, J., & Heap, A. D. (2014). Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environmental Modelling and Software*, 53, 173–189.

<https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2013.12.008>

Ly, S., Charles, C., & Degré, A. (2011). Geostatistical interpolation of daily rainfall at catchment scale: The use of several variogram models in the Ourthe and Ambleve catchments, Belgium. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(7), 2259–2274. <https://doi.org/10.5194/HESS-15-2259-2011>,

MADS. (2023). *Los ríos, claves para la salud del planeta* -.

<https://www.minambiente.gov.co/galeria-imagenes-minambiente/>

- Maidment, D. (1993). *Handbook of Hydrology*.
<https://es.scribd.com/document/448219042/Handbook-of-Hydrology-by-David-R-Maidment-www-CivilEnggForAll-com-1-pdf>
- Materano, L. (2015). *CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA EN LOS ANDES VENEZOLANOS A TRAVÉS DE TELEDETECCIÓN Y SIG*. 1–12. <http://epublica.saber.ula.ve/index.php/academia/article/viewFile/7541/7444>
- Miller, C. L. (1958). *The Theory and Application of the Digital Terrain Model*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/direccion-integral-de-recurso-hidrico/politica-nacional-para-la-gestion-integral-del-recurso-hidrico>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *Resolución 955 de 2012*.
<https://es.scribd.com/document/342746015/Ministerio-de-Ambiente-Resolucion-955-de-2012>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015, May 26). *Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *Decreto 050 de 2018*.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007a). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
<https://doi.org/10.13031/2013.23153>

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007b). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Patricia, S., & Jiménez, S. (2020). *Efectos de escala espacial y temporal en la modelación hidro-sedimentológica distribuida de una cuenca tropical. Caso de estudio San Lorenzo*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78159>
- PIEDRECUESTA E.S.P. (2024). *INFORME DE SEGUIMIENTO A PRESENTACION DE INFORMES DE SEGUIMEINTO Y AVANCES PSMV VIGENCIA 2024*. <https://piedecuestanaesp.gov.co/wp-content/uploads/2024/09/INFORME-DE-SEGUIMIENTO-A-INFORMES-PSMV-2024-1.pdf>
- Piedecuestana de Servicios Públicos E.S.P. (2020). *Piedecuestana de Servicios Públicos*. <https://piedecuestanaesp.gov.co/acueducto/>
- Racca, J. M. (2007, January). *Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales del terreno*. https://www.researchgate.net/publication/38305340_Analisis_hipsometrico_frecuencia_altimetrica_y_pendientes_medias_a_partir_de_modelos_digitaes_del_terreno
- Rasheed, N. J., Al-Khafaji, M. S., Alwan, I. A., Al-Suwaiyan, M. S., Doost, Z. H., & Yaseen, Z. M. (2024). Survey on the resolution and accuracy of input data validity for SWAT-based hydrological models. *Heliyon*, 10(19), e38348. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2024.E38348>
- Rawls, W. J., Brakensiek, K. E., & Saxton, K. E. (1982). *Estimation of Soil Water Properties*.

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

- Rendón-Álvarez, J. P., Restrepo, C. A., & Ealo, A. J. (2018). *XXIII SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA IBAGUÉ, 15 AL 17 DE AGOSTO DE 2018 UNA ESTRATEGIA PARA LA CALIBRACIÓN Y EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO HIDROLÓGICO SHIA EN ESCALA INTRADIARIA*.
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). *Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions*. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- U.S. Department of the Interior. (1982). *Guidelines For Determining flood, flow and frequency*. 17B.
- Velásquez, D. F. A., Carrillo, G. A. A., Barbosa, E. O. R., Latorre, D. A. G., & Maldonado, F. E. M. (2018). Regnie interpolation for rain and temperature in the andean, caribbean and pacific regions of Colombia. *Colombia Forestal*, 21(1), 102–118. <https://doi.org/10.14483/2256201X.11601>
- Vélez Upegui, J. I. (2001). *Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de crecidas*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=243052&info=resumen&idioma=SPA>
- (WMO), W. M. O. (2021). *State of the Climate in Asia 2020 (WMO-No. 1273)*. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10867
- WMO-No. 8. (2021). *Guide to Instruments and Methods of Observation Volume IV-Space-based Observations*. <https://library.wmo.int/records/item/68662-guide-to-instruments-and-methods-of-observation>

Yang, D., Yang, Y., & Xia, J. (2021). Hydrological cycle and water resources in a changing world:

A review. *Geography and Sustainability*, 2(2), 115–122.

<https://doi.org/10.1016/J.GEOSUS.2021.05.003>

Zambrano, A., Torres, J., & Ibarra, J. (2011). *Delimitación, codificación de las cuencas hidrográficas según los métodos de Pfasfetter y Strahler utilizando Modelos de Elevación Digital y técnicas de Teledetección*. 11105.

Zapata Atehortua, E. (2016). *Análisis de la capacidad de simulación hidrológica del modelo distribuido SHIA ante la caracterización por tramos de la geometría hidráulica del cauce*.

<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/56619>

Zhang, J., Wang, W., Li, Z., Li, Q., Zhong, Y., Xia, Z., & Qiu, H. (2021). Analytical Models of Velocity, Reynolds Stress and Turbulence Intensity in Ice-Covered Channels. *Water* 2021, Vol. 13, Page 1107, 13(8), 1107. <https://doi.org/10.3390/W13081107>

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

Apéndices

Apéndice A. Periodos de datos faltantes

GRANJA		0	PALOGORDO		108	PICACHO		61
			25/07/2004	10/08/2004	17	1/10/2000	31/10/2000	31
			1/01/2014	28/02/2014	59	1/08/2005	30/08/2005	30
			1/02/2019	4/03/2019	32			
TOPE		95	MESA LA		31	PANTANO EL		399
1/08/2002	31/08/2002	31	1/08/2000	31/08/2000	31	17/06/2003	8/07/2003	22
1/07/2003	31/08/2003	62				19/04/2004	29/04/2004	11
23/03/2012	23/03/2012	1				25/07/2010	7/10/2010	75
9/06/2012	9/06/2012	1				28/09/2011	28/09/2011	1
						1/06/2012	31/10/2012	153
						1/07/2013	14/11/2013	137
CEPITA		95	GALVICIA LA		1	LLANO GRANDE		723
1/08/2002	31/08/2002	31	15/09/2006	15/09/2006	1	10/12/2004	10/12/2004	1
1/07/2003	37864	62				6/09/2006	6/09/2006	1
23/03/2012	40991	1				1/09/2009	30/09/2009	30
9/06/2012	41069	1				1/10/2011	13/07/2013	652
						31/12/2013	31/12/2013	1
						6/03/2014	6/03/2014	1
						30/11/2014	30/11/2014	1
						31/05/2015	31/05/2015	1
						30/06/2015	31/07/2015	32
						30/09/2016	30/09/2016	1
						30/11/2016	30/11/2016	1
						31/12/2016	31/12/2016	1
PORTILLO		442	ZAPATOCA			ZAPATOCA		431
19/09/2001	4/10/2001	16	7/08/2002	7/08/2002	1	29/05/2016	29/05/2016	1
8/05/2003	10/05/2003	3	17/12/2002	17/12/2002	1	1/06/2016	5/06/2016	5
13/08/2004	15/08/2004	3	14/04/2004	14/04/2004	1	7/06/2016	7/06/2016	1
9/08/2007	9/08/2007	1	1/03/2005	31/03/2005	31	9/06/2016	9/06/2016	1
9/09/2007	39334	1	14/10/2005	14/10/2005	1	11/06/2016	13/06/2016	3
1/06/2011	31/12/2011	214	31/01/2006	28/02/2006	29	15/06/2016	15/06/2016	1
1/05/2012	41070	41	1/07/2007	2/09/2007	64	26/06/2016	28/06/2016	3
1/11/2012	6/11/2012	6	7/10/2007	7/10/2007	1	10/08/2016	11/08/2016	2
20/06/2014	41815	6,00	1/11/2007	6/11/2007	6	9/10/2016	9/10/2016	1
1/04/2016	11/04/2016	11	18/05/2008	18/05/2008	1	12/10/2016	15/10/2016	4
31/05/2018	30/09/2018	123	31/12/2009	31/12/2009	1	30/10/2016	30/10/2016	1

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

29/04/2019	30/04/2019	2	25/05/2011	28/05/2011	4	1/11/2016	1/11/2016	1
1/08/2019	5/08/2019	5	1/05/2013	30/06/2013	61	6/11/2016	7/11/2016	2
31/08/2019	31/08/2019	1	15/08/2013	31/08/2013	17	13/11/2016	13/11/2016	1
23/11/2019	30/11/2019	8	30/09/2013	30/09/2013	1	8/12/2016	8/12/2016	1
13/12/2019	13/12/2019	1	1/11/2013	31/12/2013	61	24/12/2016	24/12/2016	1
			8/03/2014	8/03/2014	1	6/05/2017	7/05/2017	2
			31/05/2014	31/05/2014	1	18/06/2017	18/06/2017	1
			2/08/2014	2/08/2014	1	31/10/2017	31/10/2017	1
			30/11/2014	30/11/2014	1	22/11/2017	26/11/2017	5
			28/02/2015	28/02/2015	1	1/03/2018	30/03/2018	30
			2/05/2015	2/05/2015	1	1/05/2018	8/05/2018	8
			18/06/2015	18/06/2015	1	10/05/2018	12/05/2018	3
			14/07/2015	15/07/2015	2	14/05/2018	31/05/2018	18
			18/11/2015	18/11/2015	1	17/08/2018	17/08/2018	1
			29/11/2015	30/11/2015	2	19/10/2018	19/10/2018	1
			15/01/2016	15/01/2016	1	23/10/2018	23/10/2018	1
			30/01/2016	31/01/2016	2	3/11/2018	3/11/2018	1
			27/02/2016	27/02/2016	1	26/04/2019	26/04/2019	1
			1/03/2016	31/03/2016	31	16/12/2019	16/12/2019	1

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

Apéndice B. Notebook en Lenguaje Python ejecutado en Google Colab

```
from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')
```

Drive already mounted at /content/drive; to attempt to forcibly remount, call drive.mount("/content/drive", force_remount=True).

```
[ ]
!pip install pandas numpy openpyxl
```

Mostrar el resultado oculto

```
[ ] from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')
```

```
[ ]
import pandas as pd
import numpy as np
from scipy.spatial import distance
```

```
# Ruta al archivo (ajusta según tu carpeta)
ruta_archivo = '/content/drive/MyDrive/Interpolacion_Cuenca/Interpolacion_2000/Datos_Precipitacion.xlsx'

# Cargar datos
df = pd.read_excel(ruta_archivo)
df['FECHA'] = pd.to_datetime(df['FECHA'])
estaciones = [col for col in df.columns if col != 'FECHA']
```

```
coordenadas = {
    "ESTACION_1": (6.993330, -73.0678),
    "ESTACION_2": (6.9675, -73.1331),
    "ESTACION_3": (7.1100, -72.9664),
    "ESTACION_4": (6.9397, -72.9317),
    "ESTACION_5": (6.7592, -73.0928),
    "ESTACION_6": (6.9975, -73.2303),
    "ESTACION_7": (6.7531, -72.9750),
    "ESTACION_8": (7.1244, -73.0572),
    "ESTACION_9": (7.0256, -73.1672),
    "ESTACION_10": (7.0278, -72.8044),
    "ESTACION_11": (6.7928, -73.2828)
}
```

```
[ ]
def idw_estimar(xy, z, punto_objetivo, power=2):
    d = distance.cdist([punto_objetivo], xy)[0]
    if np.any(d == 0):
        return z[d == 0][0]
    w = 1 / (d ** power)
    return np.sum(w * z) / np.sum(w)
```

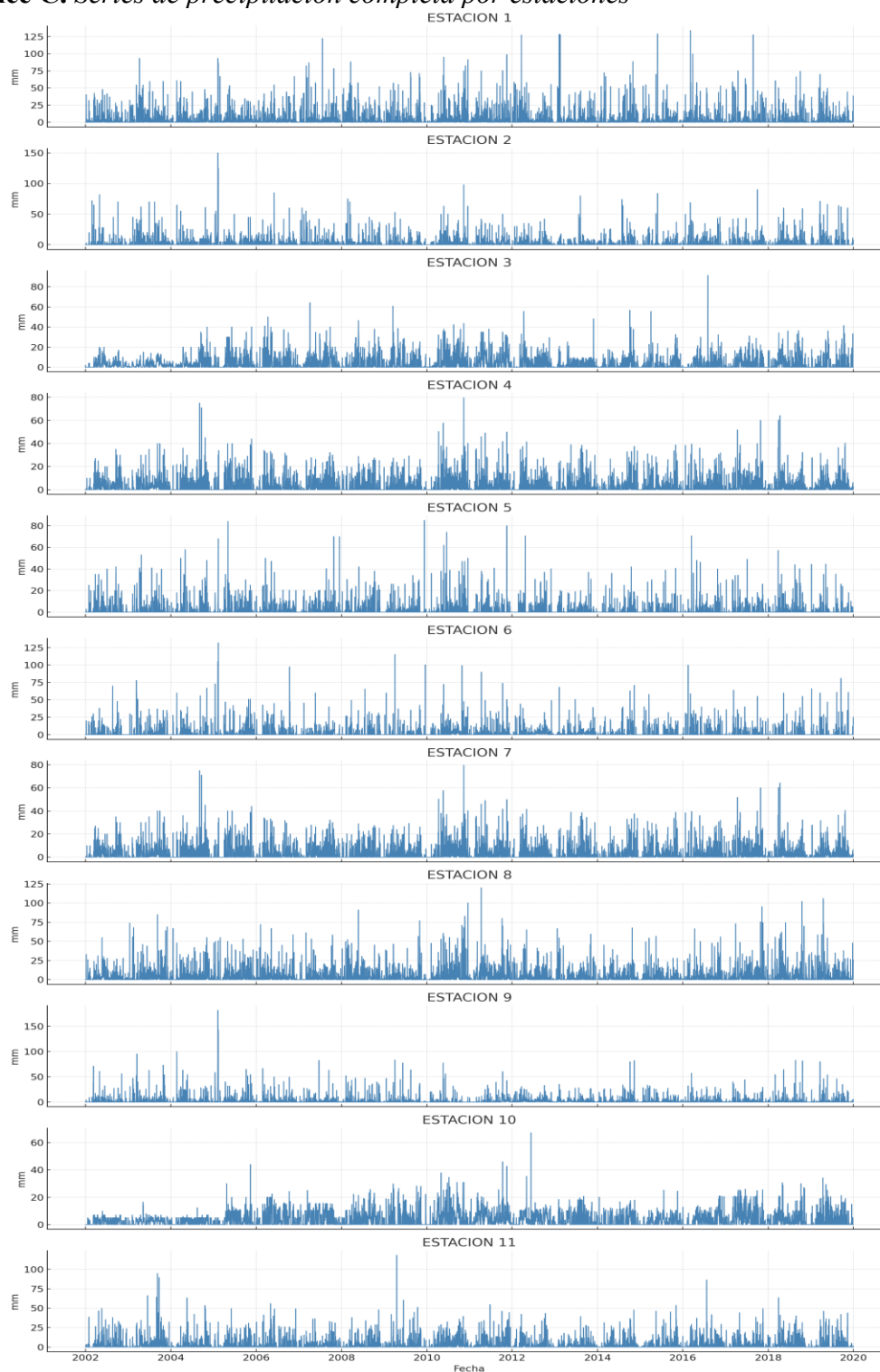
ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

```
df_relleno = df.copy()

for i, fila in df.iterrows():
    for est in estaciones:
        if pd.isna(fila[est]):
            vecinos = []
            valores = []
            for e in estaciones:
                if e != est and not pd.isna(fila[e]):
                    vecinos.append(coordenadas[e])
                    valores.append(fila[e])
            if len(valores) >= 3:
                estimado = idw_estimar(np.array(vecinos), np.array(valores), np.array(coordenadas[est]))
                df_relleno.at[i, est] = estimado

[ ]
# Guardar el archivo de salida
salida = '/content/drive/MyDrive/Interpolacion_Cuenca/precipitacion_rellena_IDW_WGS84.xlsx'
df_relleno.to_excel(salida, index=False)
print(f"Archivo generado: {salida}")
```

Apéndice C. Series de precipitación completa por estaciones

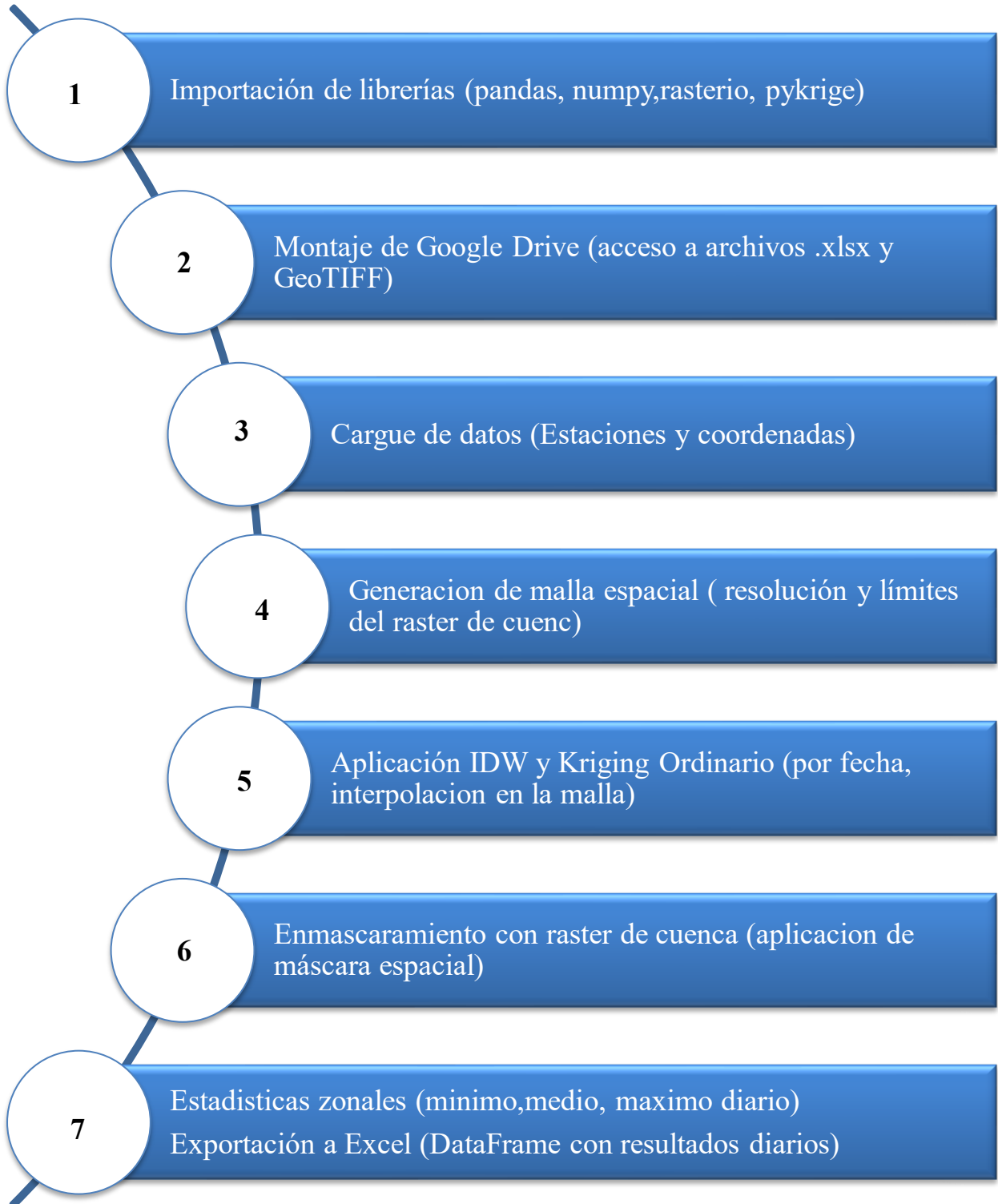


ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

Apéndice D. Nomenclatura de la USDA por tipo de suelo

Code	Name	Nomenclatura USDA	Value	Value Color	Color
Cl	clay	Arcilla	1	#d5c36b	
SiCl	silty clay	Arcillo Limoso	2	#b96947	
SaCl	sandy clay	Arcillo Arenoso	3	#9d3706	
ClLo	clay loam	Franco Arcilloso	4	#ae868f	
SiClLo	silty clay loam	Franco Arcillo Limoso	5	#f86714	
SaClLo	sandy clay loam	Franco Arcillo Arenoso	6	#46d143	
Lo	loam	Franco	7	#368f20	
SiLo	silt loam	Franco Limoso	8	#3e5a14	
SaLo	sandy loam	Franco Arenoso	9	#ffd557	
Si	silt	Limo	10	#fff72e	
LoSa	loamy sand	Arenoso Franco	11	#ff5a9d	
Sa	sand	Arena	12	#ff005b	

Apéndice E. *Procedimiento para la ejecución del código de interpolación en lenguaje Python*



Apéndice F. *NoteBook en Lenguaje Python ejecutado en Google Colab*

```
[ ] from google.colab import drive
    drive.mount('/content/drive')
```

Mounted at /content/drive

```
[ ] !pip install pandas numpy rasterio openpyxl
```

Mostrar el resultado oculto

```
[ ] import pandas as pd
    import numpy as np
    from scipy.spatial import distance
    import rasterio
```

```
[ ] ruta_excel = '/content/drive/MyDrive/Interpolacion_Cuenca/Interpolacion_2000/Datos_Precipitacion.xlsx'
    df = pd.read_excel(ruta_excel)
    df['FECHA'] = pd.to_datetime(df['FECHA'])
    estaciones = [col for col in df.columns if col != 'FECHA']
```

```
[ ] coordenadas = {
    "ESTACION_1": (6.9933, -73.0678),
    "ESTACION_2": (6.9675, -73.1331),
    "ESTACION_3": (7.1100, -72.9664),
    "ESTACION_4": (6.9397, -72.9317),
    "ESTACION_5": (6.7592, -73.0928),
    "ESTACION_6": (6.9975, -73.2303),
    "ESTACION_7": (6.7531, -72.9750),
    "ESTACION_8": (7.1244, -73.0572),
    "ESTACION_9": (7.0256, -73.1672),
    "ESTACION_10": (7.0278, -72.8044),
    "ESTACION_11": (6.7928, -73.2828)
```

```
[ ]
ruta_raster = '/content/drive/MyDrive/Interpolacion_Cuenca/Interpolacion_2000/palogordo.tif'
with rasterio.open(ruta_raster) as src:
    mask_array = src.read(1)
    nodata = src.nodata
    mask_array = mask_array != nodata if nodata is not None else mask_array != 0
    bounds = src.bounds
    res = src.res
    height, width = src.shape
    x_coords = np.arange(bounds.left, bounds.right, res[0])
    y_coords = np.arange(bounds.top, bounds.bottom, -res[1])
    xx, yy = np.meshgrid(x_coords[:width], y_coords[:height])
```

```
def idw(xy_known, values, grid_x, grid_y, power):
    grid_points = np.column_stack((grid_x.ravel(), grid_y.ravel()))
    dists = distance.cdist(grid_points, xy_known)
    weights = 1 / np.power(dists, power, where=dists != 0)
    weights[dists == 0] = 1e12
    interpolated = np.sum(weights * values, axis=1) / np.sum(weights, axis=1)
    return interpolated.reshape(grid_x.shape)
```

```
potencias = [0.5, 1.3, 2.0, 2.5, 4.0, 5.0]
resultados = []

for _, row in df.iterrows():
    fecha = row['FECHA']
    puntos = [coordenadas[e] for e in estaciones]
    datos = [row[e] for e in estaciones]
    xy = np.array(puntos)
    z = np.array(datos)

    fila_resultado = {'FECHA': fecha}
    for p in potencias:
        z_idw = idw(xy, z, xx, yy, power=p)
        z_idw_masked = np.where(mask_array, z_idw, np.nan)
        media_zonal = np.nanmean(z_idw_masked)
        fila_resultado[f'IDW_MEDIA_p{p}'] = media_zonal
    resultados.append(fila_resultado)
```

```
[ ]
df_resultados = pd.DataFrame(resultados)
salida = '/content/drive/MyDrive/Interpolacion_Cuenca/estadistica_zonal_media_por_potencia.xlsx'
df_resultados.to_excel(salida, index=False)
print(f"Archivo generado: {salida}")
```

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

```
[ ]
from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')
```

Mounted at /content/drive

```
[ ]
!pip install pandas numpy openpyxl pykrige rasterio
```

Mostrar el resultado oculto

```
[ ]
import pandas as pd
import numpy as np
from scipy.spatial import distance
from pykrige.ok import OrdinaryKriging
import rasterio
```

```
[ ]
ruta_excel = '/content/drive/MyDrive/Interpolacion_Cuenca/Interpolacion_2000/Datos_Precipitacion.xlsx'
df = pd.read_excel(ruta_excel)
df['FECHA'] = pd.to_datetime(df['FECHA'])
estaciones = [col for col in df.columns if col != 'FECHA']
```

```
[ ]
coordenadas = {
    "ESTACION_1": (6.993330, -73.067780),
    "ESTACION_2": (6.9675, -73.1331),
    "ESTACION_3": (7.1100, -72.9664),
    "ESTACION_4": (6.9397, -72.9317),
    "ESTACION_5": (6.7592, -73.0928),
    "ESTACION_6": (6.9975, -73.2303),
    "ESTACION_7": (6.7531, -72.9750),
    "ESTACION_8": (7.1244, -73.0572),
    "ESTACION_9": (7.0256, -73.1672),
    "ESTACION_10": (7.0278, -72.8044),
    "ESTACION_11": (6.7928, -73.2828)
}
```

```

ruta_raster = '/content/drive/MyDrive/Interpolacion_Cuenca/Interpolacion_2000/palogordo.tif'

with rasterio.open(ruta_raster) as src:
    mask_array = src.read(1)
    nodata = src.nodata
    mask_array = mask_array != nodata if nodata is not None else mask_array != 0
    bounds = src.bounds
    res = src.res
    height, width = src.shape
    transform = src.transform

    x_coords = np.arange(bounds.left, bounds.right, res[0])
    y_coords = np.arange(bounds.top, bounds.bottom, -res[1])
    xx, yy = np.meshgrid(x_coords[:width], y_coords[:height])

```

```

[ ]
def idw(xy_known, values, grid_x, grid_y, power=2):
    grid_points = np.column_stack((grid_x.ravel(), grid_y.ravel()))
    dists = distance.cdist(grid_points, xy_known)
    weights = 1 / np.power(dists, power, where=dists != 0)
    weights[dists == 0] = 1e12
    interpolated = np.sum(weights * values, axis=1) / np.sum(weights, axis=1)
    return interpolated.reshape(grid_x.shape)

```

```

resumen_zonal = []

for _, row in df.iterrows():
    fecha = row['FECHA']
    puntos = [coordenadas[e] for e in estaciones]
    datos = [row[e] for e in estaciones]

    xy = np.array(puntos)
    z = np.array(datos)

    # IDW
    z_idw = idw(xy, z, xx, yy)
    z_idw_masked = np.where(mask_array, z_idw, np.nan)

    # Kriging
    xk, yk = zip(*puntos)
    try:
        OK = OrdinaryKriging(xk, yk, z, variogram_model="spherical", verbose=False)
        z_krig, _ = OK.execute("grid", x_coords[:width], y_coords[:height])
        z_krig = np.flipud(z_krig)
        z_krig_masked = np.where(mask_array, z_krig, np.nan)
    except:
        z_krig_masked = np.full_like(z_idw_masked, np.nan)

    resumen_zonal.append([
        fecha,
        np.nanmin(z_idw_masked), np.nanmean(z_idw_masked), np.nanmax(z_idw_masked),
        np.nanmin(z_krig_masked), np.nanmean(z_krig_masked), np.nanmax(z_krig_masked)
    ])

```

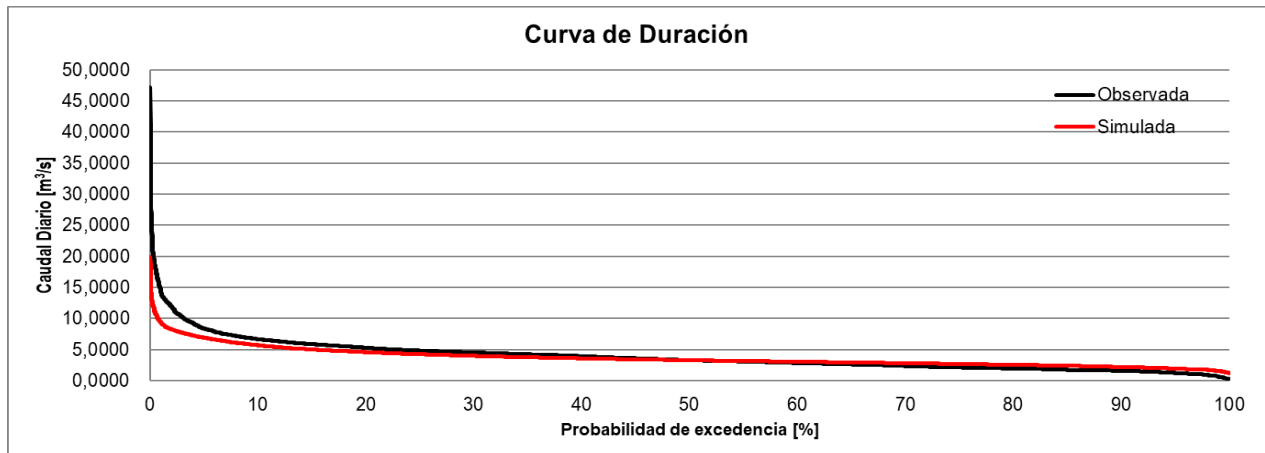
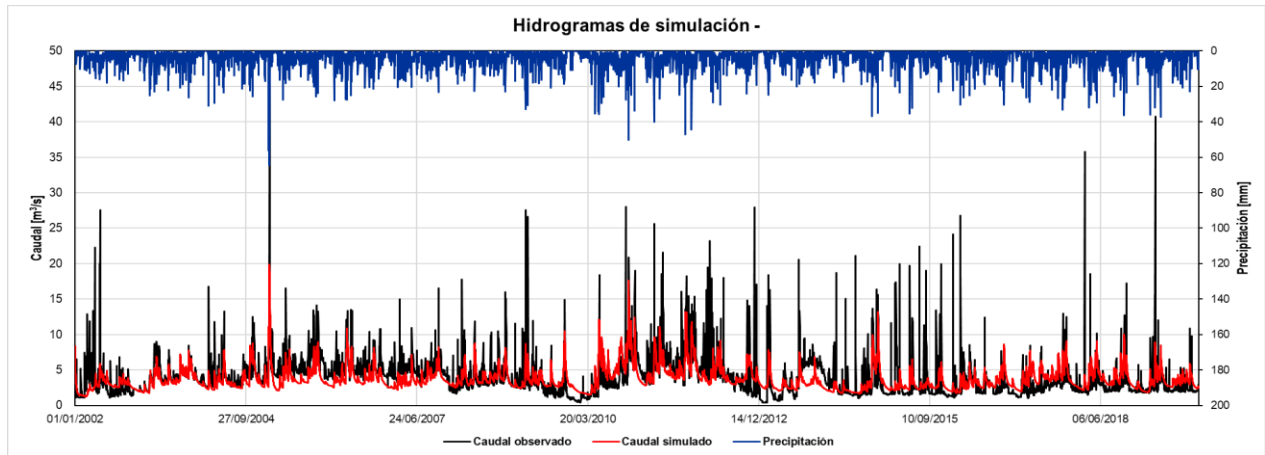
ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

```
[ ]
zonal_df = pd.DataFrame(resumen_zonal, columns=[
    'FECHA',
    'IDW_MIN', 'IDW_MEDIA', 'IDW_MAX',
    'KRIG_MIN', 'KRIG_MEDIA', 'KRIG_MAX'
])

ruta_salida = '/content/drive/MyDrive/Interpolacion_Cuenca/estadistica_zonal_diaria_completa.xlsx'
zonal_df.to_excel(ruta_salida, index=False)
print(f"Archivo generado: {ruta_salida}")
```

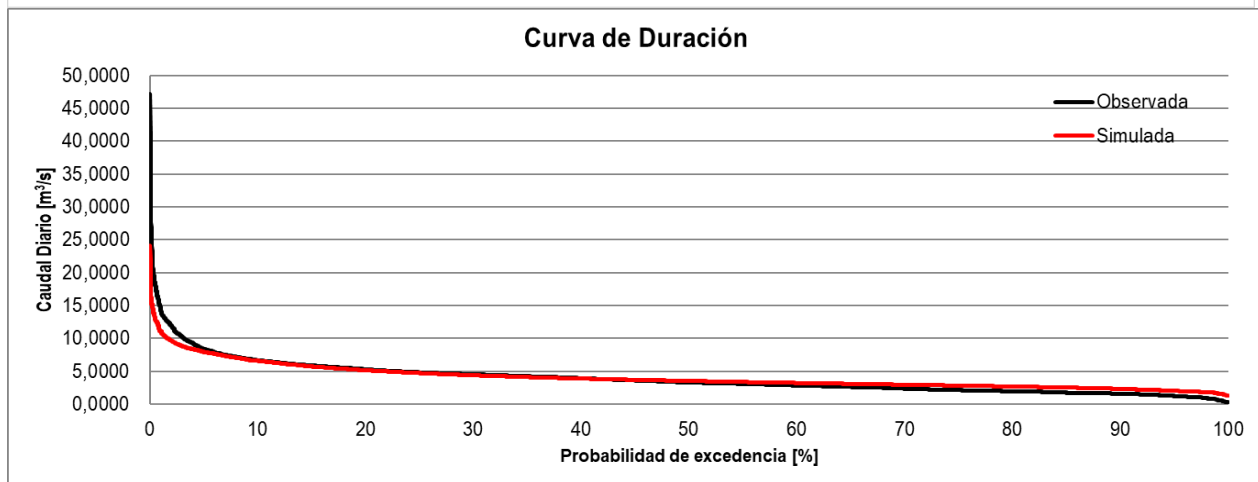
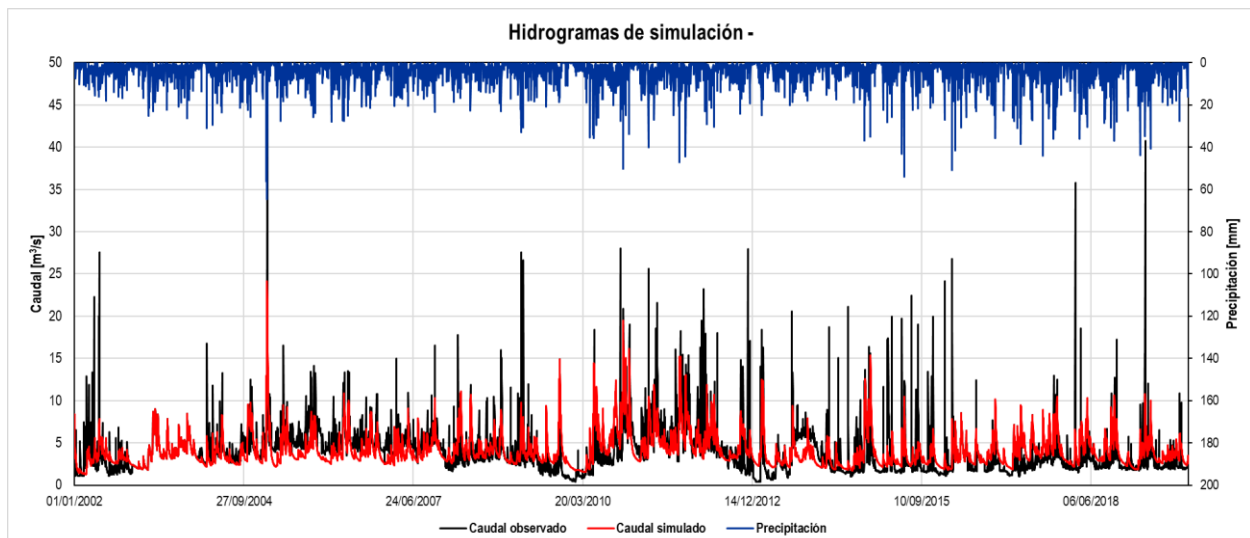
Apéndice G. Hidrogramas y curvas de duración – Escenarios hidrológicos

- IDW $\beta = 0.5$

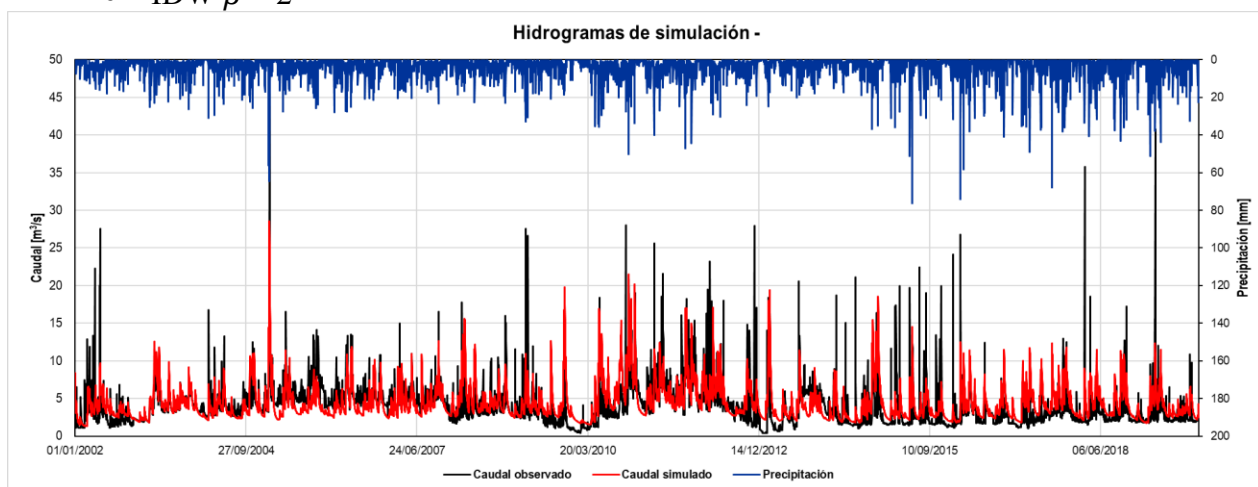


- IDW $\beta = 1.3$

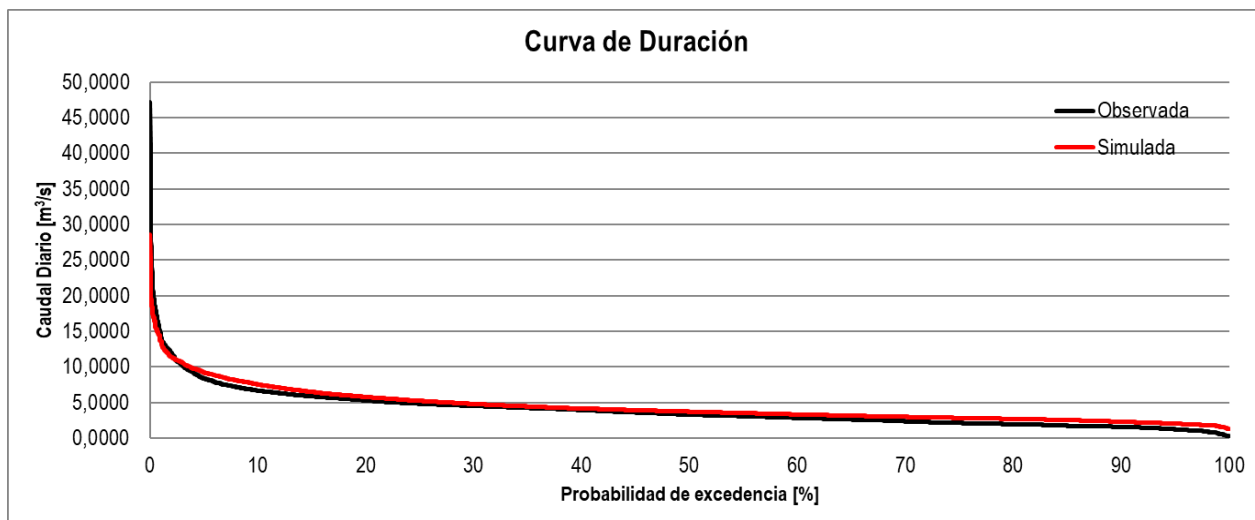
ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN



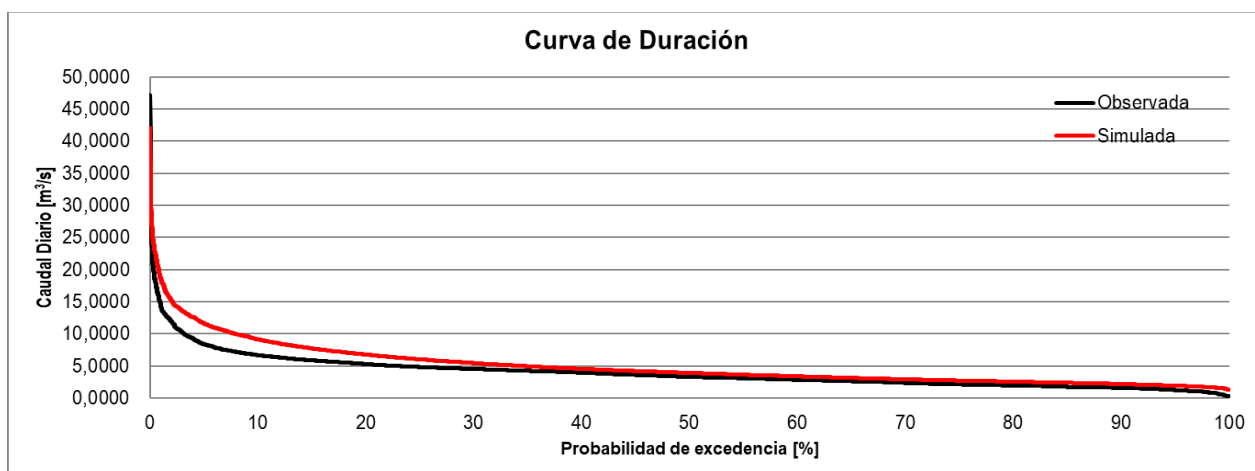
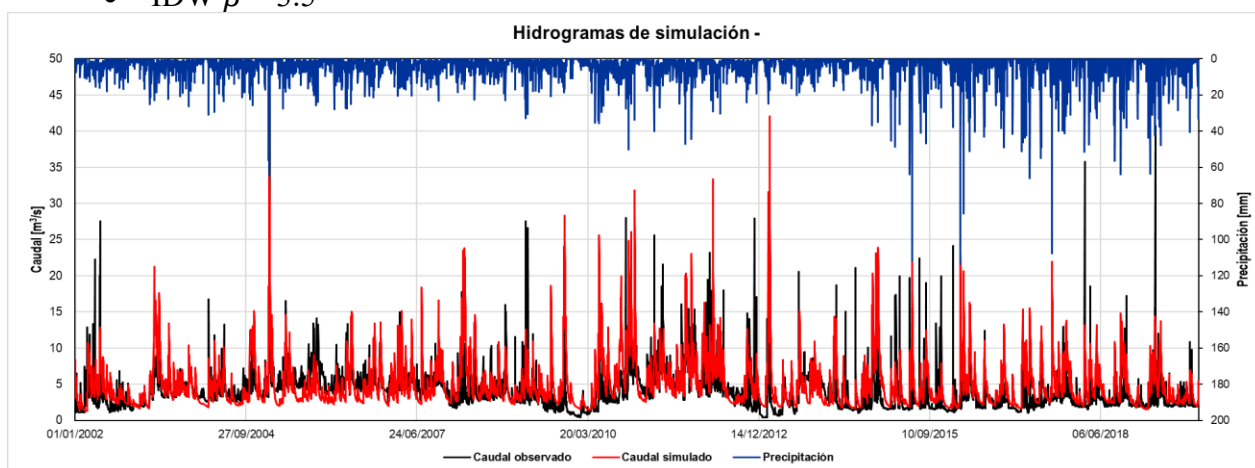
- IDW $\beta = 2$



ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

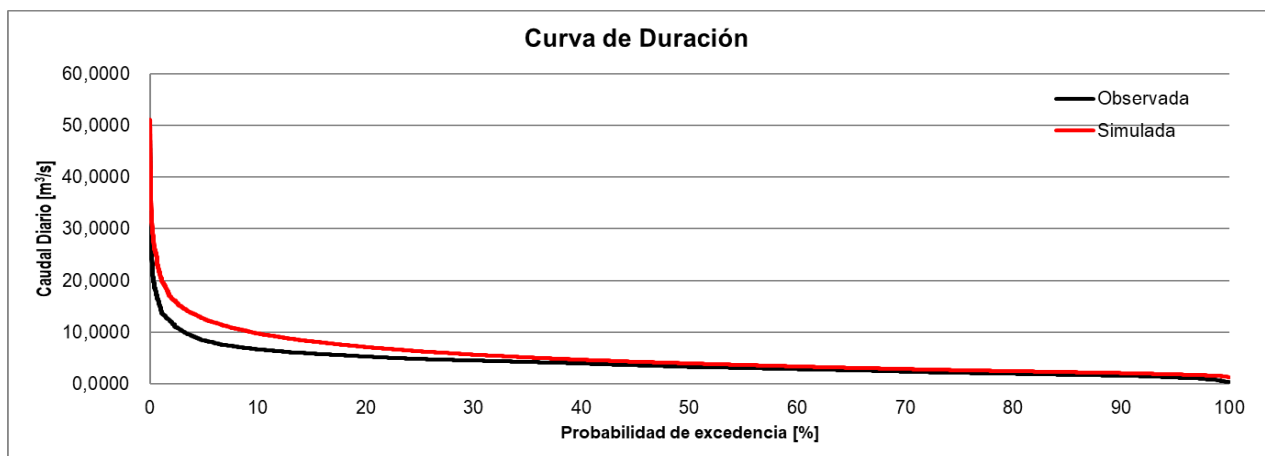
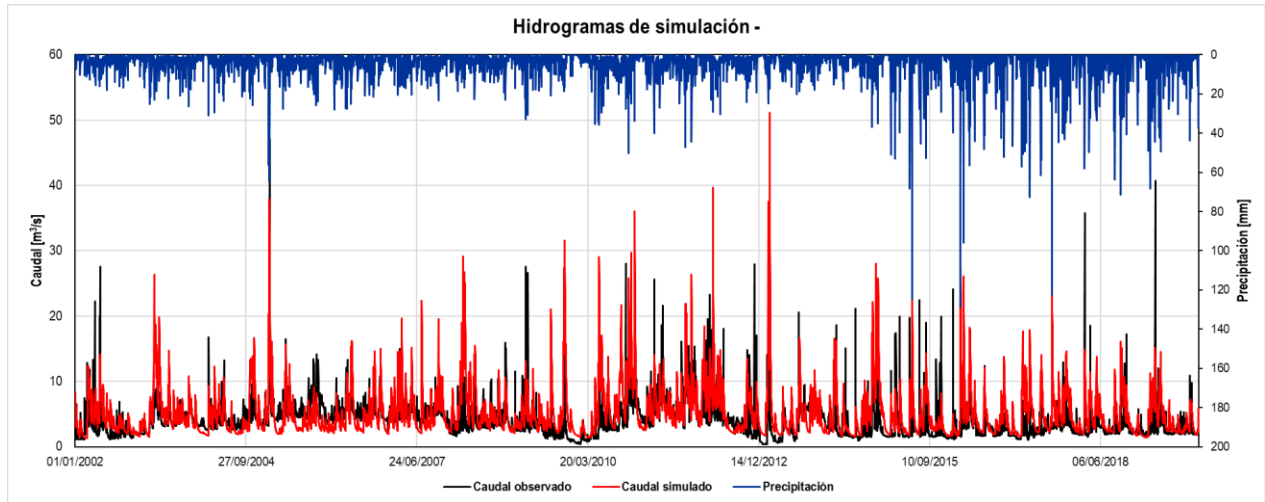


- IDW $\beta = 3.5$



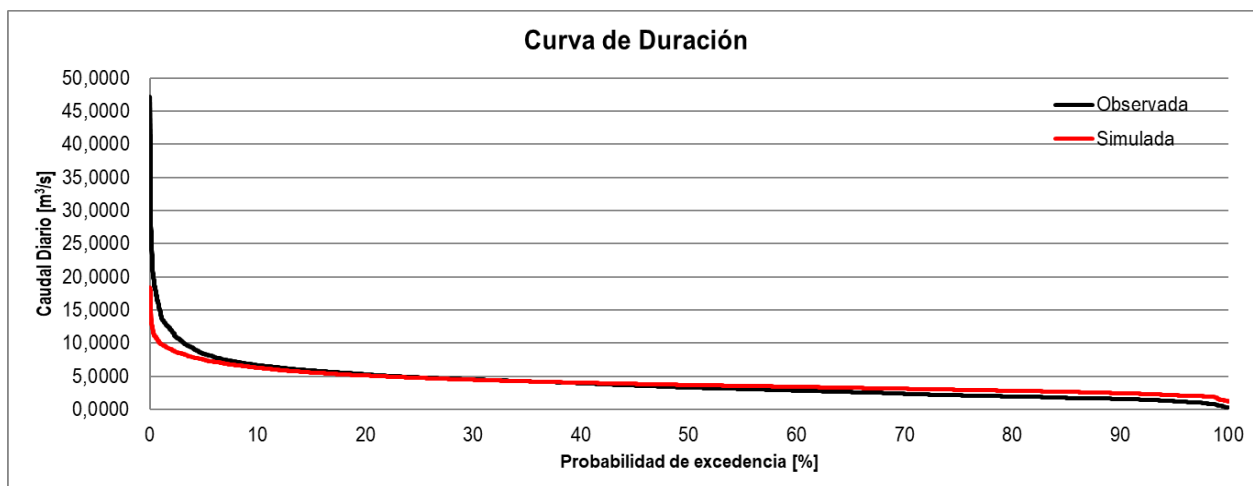
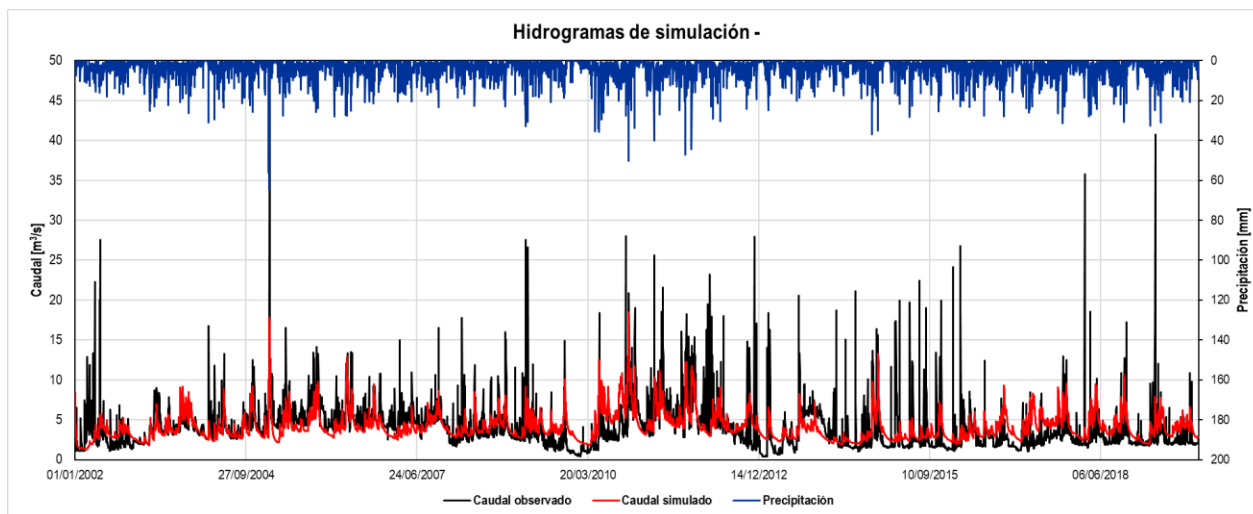
ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

- IDW $\beta = 5.0$

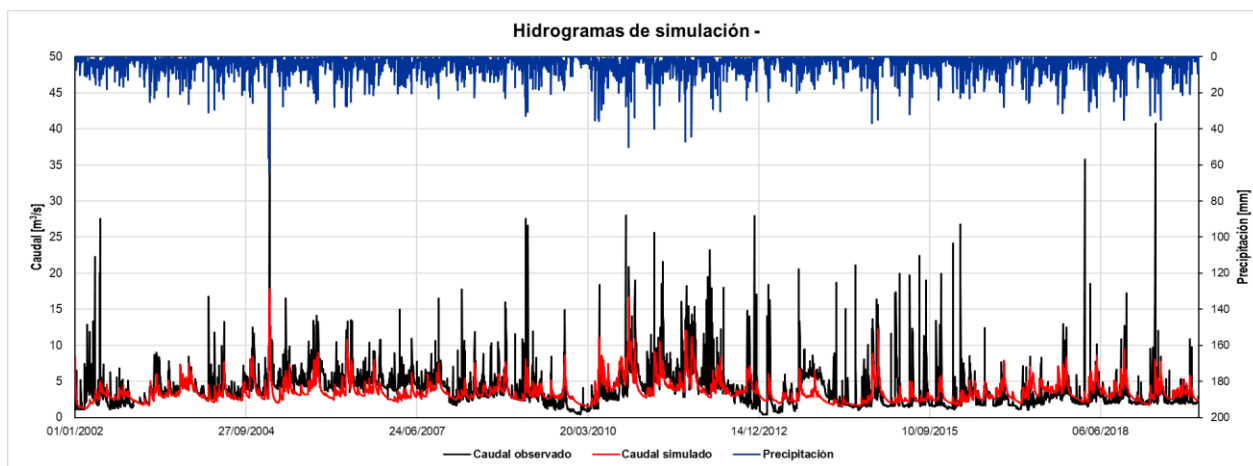


- Ordinary Krigin

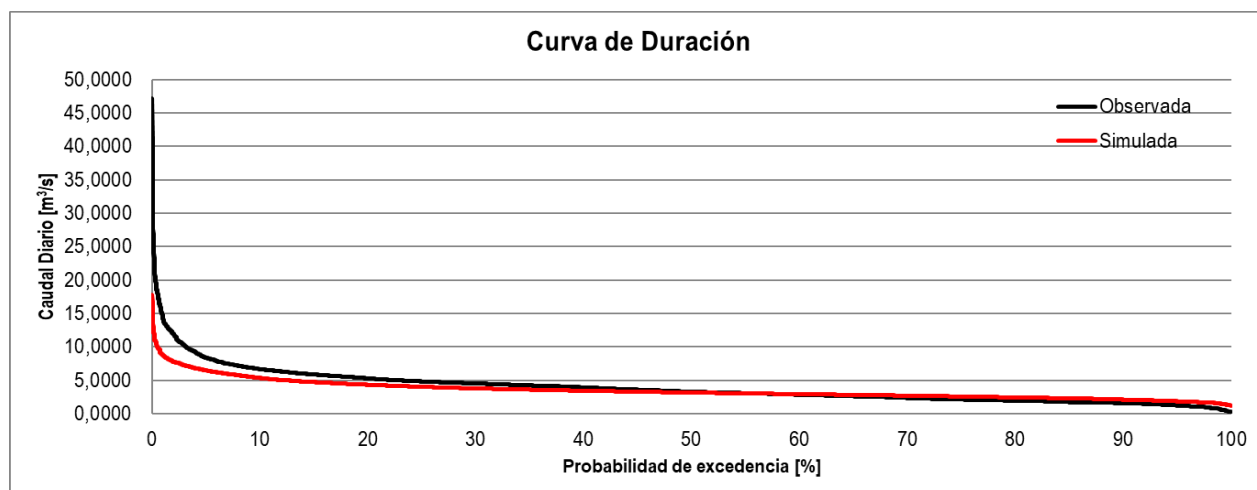
ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN



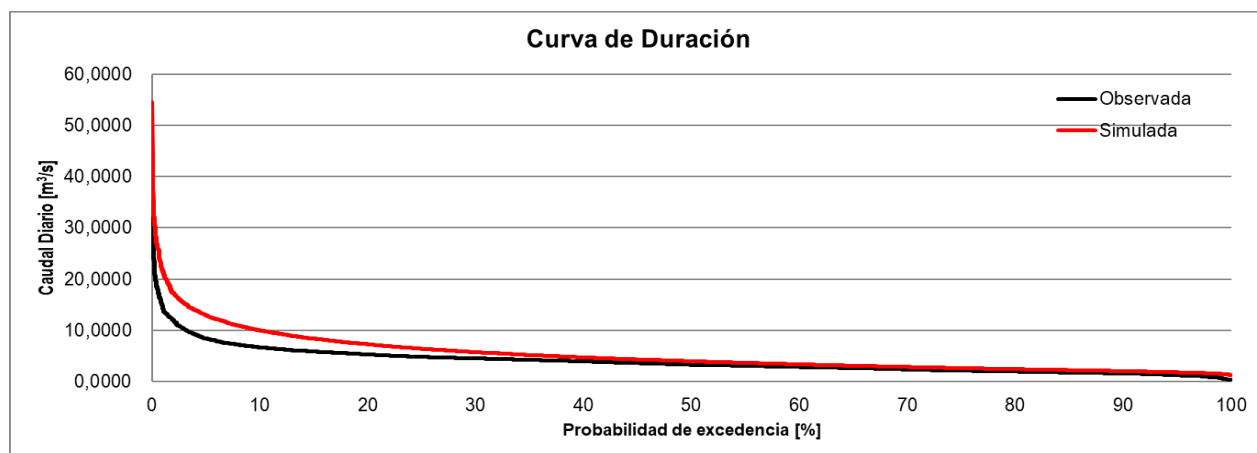
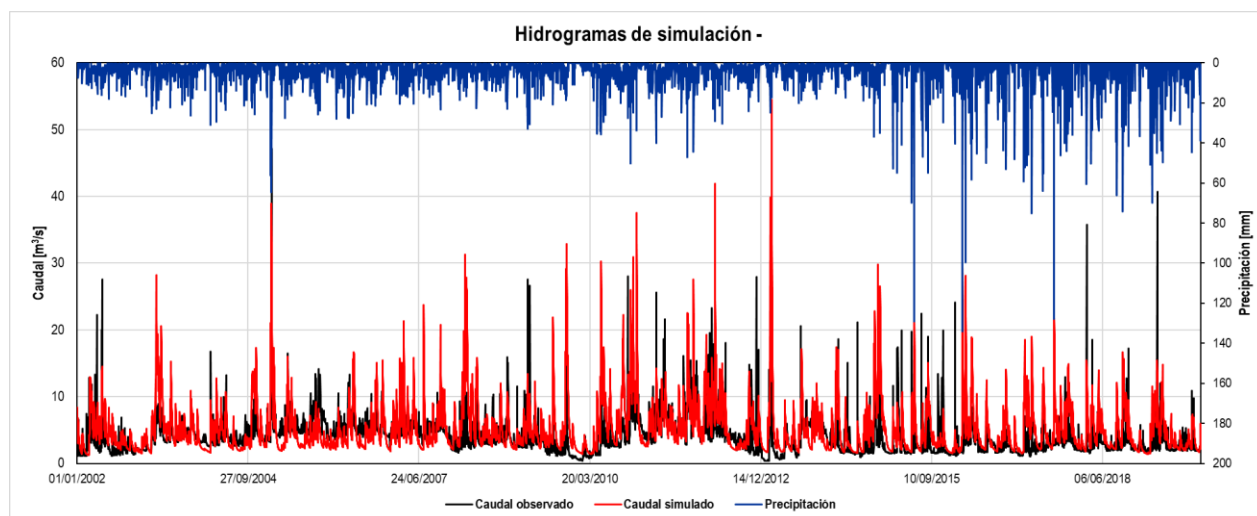
- Centroide Geometrico



ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

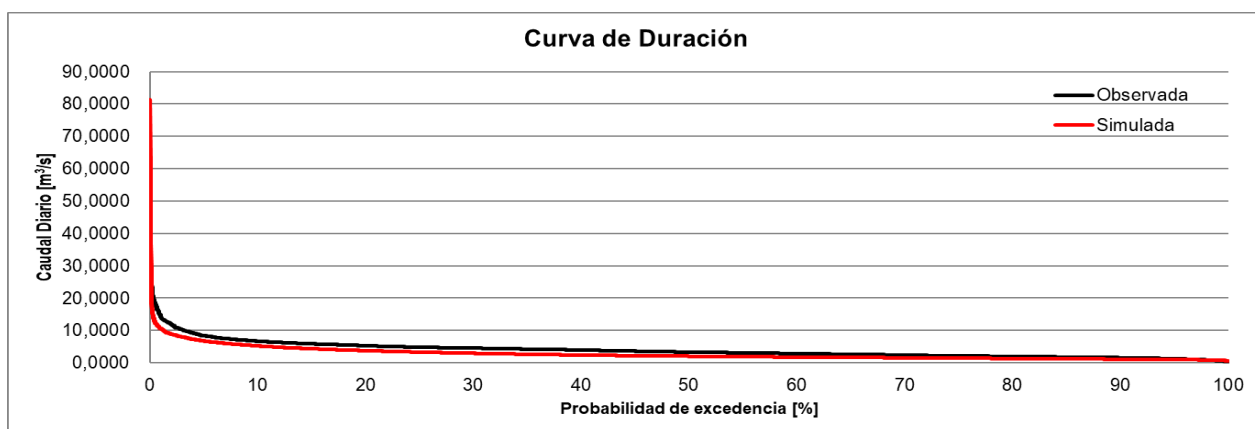
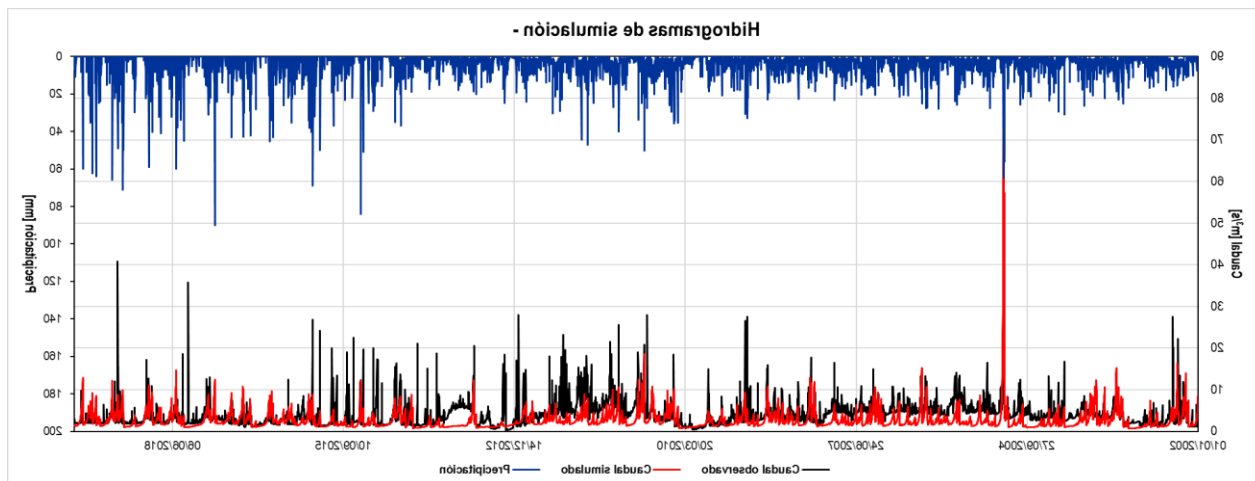


- Estación 1



ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

- Estación 2



- Estación 3

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIO - TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

